ОЧЕРКИ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ИДЕЙ

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
481	11 сн.	Индии	Китае
505	6 св.	$\mu_e = 1{,}00165\,\mu_0$	$\mu_e = 1{,}001165\,\mu_0$
505	8 св.	$\mu_\mu = 1{,}0096\,\frac{eh}{4\pi\mu c}$	$\mu_\mu = 1{,}0026\,\frac{eh}{4\pi\mu c}$

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

ОЧЕРКИ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ИДЕЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА · 1959

ОТВЕТСТВЕННЫЕ РЕДАКТОРЫ
А. Т. ГРИГОРЬЯН и Л. С. ПОЛАК

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наличие более или менее обстоятельных трудов по истории физики, в том числе вышедших в последние годы, делает необходимыми некоторые пояснения по поводу предлагаемой читателю книги. Она не претендует на подробное, хронологически связанное изложение основных физических открытий и концепций прошлого. Задача книги иная. Сейчас, в период коренного преобразования представлений о пространстве, времени, полях и элементарных частицах вещества, на пороге, быть может, еще более глубоких преобразований физической картины мира чрезвычайно усилился интерес к общим принципам и основным понятиям физики. Анализ последовательного возникновения и развития идей бесконечности и однородности пространства, относительности движения, сохранения энергии, необратимости макроскопических явлений, вероятностных и флуктуационных процессов, реальности электромагнитного поля, дискретности действия в микропроцессах представляет интерес не только для специалистов-физиков, но и для более широкого круга читателей, убедившихся в том, какое гигантское преобразующее воздействие на культуру и жизнь общества оказывает прогресс основных физических идей и открытий.

Этим несомненным интересом и была вызвана мысль, возникшая в коллективе сектора истории физико-математических наук Института истории естествознания и техники Академии наук СССР,— собрать в одной книге очерки, посвященные основным физическим идеям прошлого и настоящего.

Можно надеяться, что такая книга в некоторой мере поможет усвоению современной теоретической физики. Каждый, изучавший теорию относительности и квантовую механику, убедился, вероятно, что наибольшая трудность заключается не в усвоении математического аппарата, а в уяснении физического смысла новых теорий. Быть может, историческая картина развития основных идей физики окажет в этом отношении некоторую помощь.

В современных исследованиях по истории физики, в том числе в сводных монографиях, видны напряженные поиски некоторой общей принципиальной схемы, связующей и объединяющей конкретные исторические факты. Необходимость такого изложения физических идей становится особенно явной при рассмотрении истории физики.

В самом деле, сводить сложные зигзаги и кривопутья действительного научного прогресса, его конкретные формы, зависящие от различных весьма сложных исторических причин, к последовательному непрерывному усложнению и накоплению положительных знаний было бы неправильно; но так же неправильно отрицать прогрессивное, все более приближающееся к объективной действительности направление развития науки, пробивающей себе дорогу через все, порой иррациональные, формы, которые оно принимает в зависимости от исторических, социальных условий.

Последовательное включение в научную картину мира новых идей связано в конечном счете с производством. Именно производство создает экспериментальные возможности, позволяющие выделить определенные ряды явлений, найти их закономерности и вместе с тем сосредоточить внимание исследователей на определенном круге физических явлений. Развитие производства и общественных форм объясняет, почему физические представления, отображающие объективную действительность, появились в определенное время, в определенной научной среде и в определенной форме.

Когда объектом производственно-технического опыта были механические явления, с которыми люди сталкивались, возводя сооружения и применяя простые машины, позволявшие использовать человеческую силу, то собственно физические яв-

ления могли быть предметом лишь непосредственного наблюдения. Хотя земледелие и требовало некоторого знакомства с эмпирическими закономерностями изменения температур воздуха и почвы и т. п., но здесь, разумеется, не могло быть и речи не только о специальных экспериментах, но даже о таком воздействии на ход процессов, какое имелось в отношении чисто механических явлений.

В мастерской средневекового ремесленника гораздо чаще, чем в античной латифундии, вмешивались в ход собственно физических процессов. Но это еще не эксперимент, это технологический опыт, не выделившийся из ремесленного труда. Тем не менее уже он привел к значительному расширению физических сведений. С XVII в. (а спорадически — гораздо раньше) мы встречаем уже собственно экспериментальное изучение физических процессов, в первую очередь макроскопических.

Эксперименты Уильяма Гильберта и Галилея, маятник и наклонная плоскость, а в дальнейшем применение наряду с весами таких измерительных физических приборов, как термометр и электрометр, означают начало сперва качественного, а затем количественного экспериментального изучения макроскопических явлений.

В XIX в. создается экспериментальная техника исследования и измерения электромагнитного поля.

Для дальнейшего развития физики существенное значение имело экспериментальное изучение скоростей, сравнимых со скоростью света, и специфических микроскопических явлений. Однако новые экспериментальные методы, появляющиеся на каждом новом этапе развития физики, зависят не только от технических возможностей, но и от основных физических идей, обобщающих результаты, к которым физика пришла в предыдущий период.

Поэтому вопросы «что изучали» и «как изучали» недостаточны для периодизации истории физики. Они приводят к вопросу — какая реальная сторона объективного мира могла быть выделена и могла стать предметом специального изучения в данный период; а это характеризует позитивные идеи, к которым пришла физика: «что узнали».

Таким образом, исходная историческая схема, с которой следует подходить к фактическому материалу, уже включает некоторое представление о том, «что узнали» в каждый период, т. е. какая основная физическая идея сообщила тому или иному периоду его специфическую окраску. Отсюда вытекает значение исследований, посвященных крупным физическим идеям, для более детального обзора. Оба эти жанра историко-научных работ развиваются во взаимодействии: детальное исследование и привлечение новых фактических материалов позволяет по-иному оценивать историческую роль крупных обобщений; в свою очередь уточнение общих схем позволяет глубже охватить материал конкретного исследования в исторической перспективе. Поэтому разделение историко-физических исследований на детальные обзоры и «крупноблочные» работы, конечно, не может быть полным. И в предлагаемой читателю книге авторы подчас давали много фактического материала, в том числе сравнительно нового. Здесь не может быть общего рецепта. Из самого содержания книги видно, что очерки основных идей физики древности, средневековья и Возрождения по самому характеру науки того времени связаны с гораздо бóльшим привлечением конкретных фактов и, соответственно, с бóльшим объемом очерков, чем например, итоговые исторические оценки, относящиеся к классической физике XVII—XIX вв.

Изложение истории физики, оставляющее в стороне детальную картину отдельных экспериментов, открытий и обобщений, имеет немного прецедентов. Существует известная книга Эйнштейна и Инфельда «Эволюция физики», охватывающая основные принципы физики от динамики Галилея до теории относительности и квантовой механики. Но здесь, по существу, рассматривается логическая схема современной науки, исходные принципы которой излагаются в порядке постепенного усложнения. В этом — высокая дидактическая ценность книги. Можно ли, однако, изложить *историческую* схему без исторических деталей, которые, собственно, и показывают непрерывность научного прогресса? По-видимому, в каком-то законном и разумном приближении это можно сделать. Можно говорить о генезисе *основных* физических идей, не превращая

историю физики в расписанную по периодам и датам логику современной науки.

Авторы этой книги попытались коллективно подойти к решению указанной задачи.

Они, естественно, отказались от иногда встречающейся в коллективных исследованиях нивелировки взглядов отдельных авторов на те или иные конкретные проблемы. Если в обзоре фактических событий можно в известной мере отрешиться от индивидуальных взглядов, то в исследовании, посвященном физическим идеям и их оценкам, это привело бы к обеднению содержания. Поэтому в предлагаемой читателю книге взгляды автора каждого очерка, относящиеся к частным проблемам, остаются на его совести. Вместе с тем книга претендует на известную цельность. Речь идет о сквозных идеях, объединяющих отдельные очерки. При всем разнообразии научных интересов авторы этой книги стоят на общих позициях в коренных проблемах истории физики. Это позиции советской школы историков физики. Наряду с указанной общностью исходных позиций, в освещении даже специальных проблем не могла не сказаться многолетняя совместная работа, постоянное научное общение, единый долго обсуждавшийся и вынашивавшийся план книги, общее представление об ее возможном читателе.

Очерки, посвященные генезису и развитию различных физических идей и соответственно различным периодам, объединены общим представлением о последовательном приближении физической картины мира к объективной действительности. Это — основной тезис диалектико-материалистического взгляда на историю физики, противостоящий всем разновидностям идеализма и агностицизма; он конкретизируется применительно к историческим проблемам древней, средневековой, классической и современной физики.

Здесь можно привести лишь некоторые примеры научных проблем, поставленных в отдельных очерках. Задача очерков, посвященных древности, средневековью и Возрождению, состояла в использовании очень большого количества новых материалов, раскрытых историками древности и в еще большей степени медиевистами за последние десятилетия. Эти материалы

позволяют поставить и решить новые проблемы. Физические представления древности включают большое число идей, получивших впоследствии строгую и систематическую форму. Сейчас можно проследить непрерывное развитие этих идей в цивилизациях древнего Востока, в Греции, в эллинистических государствах и в Риме. С другой стороны, современное состояние изучения истории древнего мира позволяет ближе и конкретнее указать связь между общими физическими идеями и накоплением отдельных относящихся к физическим явлениям наблюдений, тесно связанных с практикой производства.

В отношении средневековья, наряду с анализом науки этой своеобразной эпохи, было необходимо показать, что апологетическая мысль Дюэма о предвосхищении всех основных физических идей XVII в. в схоластической литературе средних веков противоречит историческим фактам. Вместе с тем действительность далека и от распространенной, к сожалению, в исторической литературе картины абсолютного отсутствия научного прогресса в средние века. Средние века подготовили Возрождение, которое не было, конечно, лишь возрождением античной древности, а опиралось на гораздо более широкую техническую, экономическую и культурную базу. Разумеется, характеристика физики средних веков и Возрождения может быть сколько-нибудь полной лишь при сопоставлении ее с физикой XVII в. и последующего периода. Поэтому оценки физических идей средневековья и Возрождения, данные в первых очерках настоящей книги, связаны с оценками, встречающимися в последующих очерках.

Среди проблем, поставленных в очерке о физических идеях Возрождения, следует отметить проблему соотношения между математикой, еще в XV—XVI вв. достигшей значительных успехов, и механикой, которая вплоть до XVII в. стояла гораздо дальше от математики, чем в последующий период, в последней четверти XVII в. и в XVIII в.

Физика XVII в. рассматривается под углом зрения генезиса механических представлений о природе. Речь идет именно о генезисе таких представлений; их результаты — превращение механической физики в систему однозначных законов, выраженных строгими дифференциальными уравнениями, систему,

сводящую физические процессы к основам классической механики,— были делом следующего периода. В очерке, посвященном генезису механического объяснения физических процессов, показано, как механическое объяснение уже начало «работать», т. е. воплощаться в реальные достижения науки, но еще не приводило к дифференциальным уравнениям физических законов и кинетическим моделям, столь характерным для XVIII в.

Классическая физика XIX в. в свете современной физики, естественно, представляется авторам этой книги отнюдь не окончательным ответом на вопросы о веществе, силовых полях, пространстве и времени. В очерках, посвященных классической термодинамике и классической электродинамике, выделены нерешенные проблемы, которые в конце концов привели физическую науку к неклассическим решениям. В обзоре развития идеи превращения энергии, наряду с первым началом термодинамики, большое внимание уделено развитию идеи энтропии, столь ярко демонстрирующей несводимость собственно физических закономерностей к механике обратимых процессов. В очерке о развитии электродинамики, подчеркнуты идеи, подготовившие теорию относительности. Учитывая наличие большой обзорной и монографической литературы о развитии классической физики, редакция сократила объем этих очерков. Они написаны под определенным углом зрения и тесно связаны с последующими очерками, которые как бы бросают свою тень на обзор классической физики XIX в. В этом, может быть, яснее всего сказывается связь между различными частями книги.

Теория относительности и квантовая механика рассматриваются как великий взлет познания природы. С этой точки зрения было необходимо подчеркнуть историческую роль собственно физических принципов теории относительности по сравнению с ее формальными достижениями. В очерках о теории квант и квантовой механике наибольшее внимание уделено также не математической форме, а собственно физическим идеям. Очерки, посвященные неклассическим идеям современной физики, представляются не факультативным добавлением к изложению прошлого, а необходимым эле-

ментом, без которого история классической физики не получила бы необходимого освещения [1].

Таковы были намерения авторов и редакторов настоящего издания, которые далеки от мысли, будто только такое историческое освещение основных идей физики соответствует нуждам науки и запросам читателя. Быть может, более сильный коллектив поставил и решил бы эту задачу шире и глубже и вместе с тем достиг бы большей связи между отдельными очерками. Нам же, при определении задачи и характера книги, при предварительном обсуждении намерений каждого автора и авторского коллектива в целом приходилось исходить из собственных, реальных сил. Речь может идти именно о намерениях. Как их удалось выполнить,— об этом предстоит судить читателю.

---

[1] Содержание очерков, посвященных квантовой теории и теории относительности, изложено в опубликованных ранее статьях Л. С. Полак. Квантовая физика от Макса Планка до Нильса Бора (сб. «Макс Планк», М., Изд-во АН СССР, 1958), Б. Г. Кузнецов. К вопросу о генезисе и развитии специальной теории относительности («Труды Института истории естествознания и техники Академии наук СССР», т. 17, 1957), Д. Д. Иваненко, Исторический очерк общей теории относительности (там же).

В. П. Зубов

ФИЗИЧЕСКИЕ ИДЕИ ДРЕВНОСТИ

Как бы далеко ни уходили физические представления от идей, появившихся в цивилизациях древнего Востока, в классической Греции, в эллинистических государствах и в Риме, древность всегда будет представлять интерес для истории физики. В древности были сформулированы идеи, которые затем подтверждались и конкретизировались всем многовековым развитием науки — идеи бесконечности мира, идеи континуума и дискретной структуры вещества. В древности была высказана идея естественной закономерности, которая приобрела четкую и вместе с тем гибкую форму в учении даосизма, а впоследствии в античной науке. В древности появились отвлеченные понятия пространства, времени и движения, без которых наука не могла бы прийти к проблемам изотропности и однородности пространства, необратимости времени и другим основным элементам физической картины мира.

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

Первые знания о физических явлениях восходят к древнейшим периодам истории человечества: они возникают одновременно с появлением сознательной деятельности человека. По словам Энгельса, «ни одна обезьянья рука не изготовила когда-либо хотя бы самого грубого каменного ножа»[1]. Обработка камня, кости, дерева, позднее — знакомство с металлами и их обработкой, текстильное и гончарное производство, строи-

[1] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 133.

тельное дело, так же как охота или война, — все эти области практической деятельности человека не могли бы совершенствоваться без накопления эмпирических знаний, без каких-то, хотя бы и смутных представлений о закономерности природных явлений.

Величайшим событием в истории первобытного человечества было овладение огнем; именно огонь явился одним из первых средств, позволившим человеку перейти от простого использования того, что дает природа, к активному ее *преобразованию* (приготовление пищи, добывание и обработка металлов).

Подробное рассмотрение всех достижений первобытного периода заставило бы нас писать историю материальной культуры и отвлекло бы от нашей прямой задачи. Необходимо, однако, показать на отдельных примерах, какой огромный путь должно было пройти человеческое сознание, прежде чем были достигнуты первые научные абстракции и обобщения.

Данные археологии и этнографии подтверждают, что мышление людей на ранних ступенях общественного развития было очень конкретным. В языке североамериканских гуронов глагол «есть» имел различную форму в зависимости от того, какую пищу человек ест, а глагол «видеть»— в зависимости от того, видит ли говорящий человека или камень. У североамериканских индейцев существует множество непереводимых названий для форм облаков; особое название имеет солнце, светящее сквозь тучи, и особое название — просветы голубого неба. У лапландцев есть 20 названий для льда, 11 — для холода, 41 — для снега, 26 для заморозков и оттепели. У одного из племен Южной Африки имеются разные обозначения для разных видов дождя. Но вместе с такой исключительной наблюдательностью к окружающему бросается в глаза скудость абстрактных, обобщающих терминов. Так, пользуясь особыми обозначениями для разновидностей попугаев, южноамериканские бакаири не имеют общего наименования попугая. То же относится и к пальмам. Отсутствуют также общие, родовые понятия: «животное», «минерал» и т. п.

Люди, стоящие на первобытных ступенях развития, обладают огромной зрительной памятью, позволяющей им без компаса хорошо ориентироваться в море и в лесу. Этой конкретной наглядности мышления соответствует разнообразие указательных местоимений; так, например, мы довольствуемся простым различием «этот» и «тот», тогда как у одного из племен североамериканских индейцев существует восемь обозначений, характеризующих различную степень удаленности предмета от говорящего. Преобладание памяти над способностью к абстракции характеризуется и тем, что сложные архаические системы мер (например, английская) быстрее усваивались некоторыми афри-

канскими племенами, нежели общий принцип построения метрической системы.

Приведенных примеров, нам кажется, достаточно, чтобы убедиться в некоторых особенностях конкретного мышления первобытного человека и вместе с тем отдать себе отчет в том, какое расстояние отделяло его от широких научных обобщений. В настоящее время это расстояние может быть пройдено быстро. Так, в наше время ученик средней школы без особого труда усваивает физические законы, явившиеся результатом длительной работы человеческой мысли. Но исторически для прохождения этого пути потребовались целые века. Австралийцы научились владеть бумерангом задолго до того, как были изучены научные законы его полета. Энгельс отмечал, что «практическое открытие превращения механического движения в теплоту так старо, что от него можно было считать начало человеческой истории» [2]. Однако потребовались тысячелетия для того, чтобы добиться обратного процесса — превращения теплоты в механическое движение и раскрыть действительную связь, существующую между обоими явлениями. «Вероятно прошли многие тысячелетия со времени открытия добывания огня трением до того, как Герон Александрийский (около 120 г. до хр. э.) изобрел машину, которая приводилась во вращательное движение вытекающим из нее водяным паром. И прошло еще снова почти две тысячи лет, пока не была построена первая паровая машина, первое приспособление для превращения теплоты в действительно полезное механическое движение» [3]. И. М. Сеченов в одной из своих работ описывал инструмент африканских негров, виденный им в Кенсингтонском музее, указывая, что эти негры «предвосхитили одну из блистательнейших мыслей Гельмгольца — употреблять ряд полых сферических резонаторов, настроенных на разные тоны» [4]. Однако и в данном случае нельзя забывать о различии между простой эмпирической констатацией, сделанной ощупью, и широкой теорией, охватывающей целую группу явлений. Разница здесь примерно такая же, как между мускульным ощущением законов удара, которым обладают игроки в биллиард, и обобщающей теорией удара как разделом механики.

И все же, оттеняя разницу, нельзя забывать, что перед нами звенья одной цепи. Было бы абсолютно неверно, как это делали и делают некоторые буржуазные ученые, считать пропастью разрыв между «первобытным» и научным мышлением, противопоставляя их и заявляя, что они несоизмеримы друг с другом.

---

[2] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 80.
[3] Там же, стр. 81.
[4] И. М. Сеченов. Избранные философские и психологические произведения. М., 1947, стр. 207.

В особенности Леви-Брюль и его школа настаивала на «мистическом» характере первобытного мышления, утверждая непереводимость форм этого мышления на язык нашей логической мысли.

Нет сомнения, разумеется, что рациональные знания, почерпнутые из практического опыта, были связаны в первобытном мышлении со множеством фантастических представлений: картина мира первобытного человека — есть в значительной мере фантастическое отражение действительности в человеческом мозгу, свидетельствующее о беспомощности человека перед природой. Но это не дает еще права говорить о качественной разнице двух видов мышления: «дологического» и логического.

Из дальнейшего изложения будет видно, что прогресс человеческого сознания именно и заключался в очищении мышления от фантастических примесей и искажений. И в данном случае также незачем подробнее вдаваться в анализ археологических и этнографических данных. Нельзя только не напомнить, что процесс научного абстрагирования протекал в непрерывном преодолении *иррациональных элементов* первобытного мышления.

О «первых шагах» древней науки обычно судят, сопоставляя их с *последующим* развитием или даже с современным знанием; естественно, что тогда они имеют младенческий вид и недооцениваются исторически. Наоборот, если рассмотреть первые научные представления древнего Востока или древней Греции на фоне предшествующей многовековой эволюции, то тогда они несомненно должны будут предстать во всей своей прогрессивности. «Вода» Фалеса как начало всего существующего — это нечто принципиально новое по сравнению с мифическими существами — создателями мира.

С такой исторической точки зрения несовершенные и даже неверные физические объяснения получают свой прогрессивный смысл как определенные этапы научного мышления. Ниже будет подробнее идти речь об аристотелевой теории радуги. С современной точки зрения она неверна, в особенности в части объяснения спектральных цветов. Тем не менее это была научная гипотеза, стремившаяся опереться на физико-математическое доказательство (на геометрическое построение). Сопоставим это объяснение с религиозно-мифологической точкой зрения на небесные явления (затмения, кометы, ложные солнца и т. п.) как на «знамения», «вестники» чьей-то воли, появление которых зависит от этой воли. Такова Радуга-Ирида, «вестница богов», или та радуга, которую, по библейскому сказанию, бог показал Ною после потопа в качестве символа своего примирения с человеком. После подобного сопоставления историк физики будет менее строго судить об аристотелевой теории раду-

ги. Другие примеры читатель найдет дальше в тексте (например, объяснение молнии у Лукреция, в котором античный автор усматривал могущественное средство освободиться от суеверных страхов религии, но которое, разумеется, неудовлетворительно с точки зрения современной науки). И здесь, пожалуй, единственно общим для античного и современного ученого осталось утверждение *физической закономерности* явления.

Без «предыстории», уходящей корнями в далекое прошлое, останутся непонятными и многие весьма живучие пережитки, сохранявшиеся на протяжении веков в физической науке. Так, к древнейшим космогоническим идеям восходит *гипостазирование противоположностей*, представления о холоде и тьме не как о чисто отрицательных понятиях, а как о реальных объектах. Представления о парообразном и газообразном состоянии как своего рода «душе» сохранялись долгое время в учении о «пневме» и «животных дýхах», газообразных и летучих веществах. Первобытные представления о связи теплоты, горения и жизни отразились в учении античных и средневековых медиков о «врожденной теплоте». Наконец, представления о действии на расстоянии, о «симпатии» и «антипатии», существующих между объектами Вселенной, имеют своим прототипом первобытные классификации природных предметов. Так, у австралийцев в родственных отношениях с «тотемом» (мифическим родоначальником племени) мыслятся не только «люди черного кактуса», но и кенгуру, лето и осень, ветер, а «люди морского орла» представляются находящимися в родстве с дымом и жимолостью. Подобные «тотемистические классификации» охватывают одновременно основные направления в пространстве (сéвер — юг, восток — запáд, верх — низ) и цвета и т. д. С пережитками их можно встретиться в различных физических учениях не только древнего мира, но и позднейших эпох.

ДРЕВНИЙ ВОСТОК

Ф. Энгельс сжато и точно охарактеризовал последовательное развитие отдельных отраслей естествознания в следующих строках: «Сперва *астрономия*, которая уже из-за времен года абсолютно необходима для пастушеских и земледельческих народов. Астрономия может развиваться только при помощи *математики*. Следовательно, приходилось заниматься и последней. — Далее, на известной ступени развития земледелия и в известных странах (поднимание воды для орошения в Египте), а в особенности вместе с возникновением городов, крупных построек и развитием ремесла развилась и *механика*. Вскоре она становится необходимой также для *судоходства* и *военного* дела.— Она тоже нуждается в помощи математики и таким об-

разом, способствует ее развитию. Итак, уже с самого начала возникновение и развитие наук обусловлено производством» [5].

Астрономия и математика достигли в странах Востока такого высокого развития, что об их истории могут быть написаны целые книги. Иначе обстоит дело с физикой, которая еще не выделилась из общего учения о природе в качестве самостоятельной отрасли естествознания. Источниками сведений о физических представлениях являются лишь общефилософские произведения, а косвенным образом можно судить об уровне их развития на основании памятников материальной культуры. Это в полной мере относится и к механике, которая ранее других областей физики начала формироваться в качестве самостоятельной отрасли.

И в данном случае мы не можем подробнее касаться вопросов истории техники, в частности строительной, и ограничимся напоминанием о больших ирригационных сооружениях древнего мира (Двуречье, Урарту, Хорезм, Китай), о пирамидах Египта, о стенобитных и метательных машинах Ассирии, о кораблях финикинян. Возведение грандиозных сооружений древнего Востока было основано на простой кооперации большого числа рабочих рук с использованием подъемных и транспортных устройств. В странах Ближнего Востока были известны все так называемые «простые машины»: рычаг, наклонная плоскость, блок, клин, винт. В древнем Египте существовала зубчатая передача. Однако эти знания еще не были письменно зафиксированы: нам неизвестны не только специальные трактаты, посвященные вопросам механики, но и какие-либо эпизодические упоминания о них в других литературных памятниках.

Нам придется оставить в стороне и облеченные в мифологическую или полумифологическую форму философемы, касающиеся вопросов о происхождении мира, где в основе лежали не столько отвлеченные общие *начала*, сколько олицетворения или образы сверхъестественных *существ*. Таковы, например, египетские тексты, излагающие учение о первичной воде Нун, содержащей зародыши жизни, или вавилонские сказания о происхождении мира из первоначального хаоса — моря, пребывавшего в лоне матери всего сущего Тиамат.

Отметим лишь одну черту, свойственную многим восточным космологиям и космогониям, появившуюся, правда, на сравнительно позднем этапе развития: представление об огромных масштабах пространства и времени или даже об их безграничности. В результате этих представлений неизмеримо расширяется первобытная картина мира, ранее, как правило, ограни-

[5] Ф. Энгельс, Диалектика природы. Госполитиздат, 1955 стр. 145.

ченная узким кругом предметов и явлений. Значительность таких широких представлений о мироздании станет вполне ясной, если вспомнить, что библейская космология, продолжавшая оказывать свое отрицательное влияние вплоть до момента зарождения новоевропейского естествознания, ограничивала время существования Вселенной хронологическими рамками всего лишь нескольких тысячелетий.

Напротив, в поэтических и философских произведениях индусов можно встретить представления об огромных масштабах мирового пространства и времени, значительно отличающиеся от соответствующих представлений библейской космогонии. Согласно эпической поэме «Вишнупурана», мир состоит из 14 районов, одним из которых является Земля и которые отделены друг от друга расстояниями, равными в переводе на метрические меры приблизительно 16 млн. км. Бесконечная Вселенная есть соединение 1000 миллионов таких миров. Единицей измерения космического времени служит «день творца Брахмы», равный 432 млн. лет. Чередование таких «дней» и «ночей» (т. е. периодов возникновения и распада, или возвращения в хаос) составляет ряд, не имеющий начала: Вселенная не имеет начала во времени [6].

Интересны соображения о бесконечности Вселенной, высказанные китайским мыслителем Лю Цзя (IV в. до н. э.): если бы верх, низ и восемь направлений розы ветров имели границу, то за пределами безграничного было бы нечто ограниченное, полагающее ему предел; такого ограничивающего предела не может быть и внутри безграничного. Следовательно, заключал он, «я могу понять бесконечность и безграничность, но не могу понять ни границу, ни предел» [7].

Приведенное рассуждение свидетельствует уже о высоком уровне абстрактного мышления. Но и в более древней китайской философии нетрудно найти примеры той же абстрагирующей мысли. В книгах «Шу-цзин» и «И-цзин» («Книга истории» и «Книга перемен»), написанных в VII—V вв. до н. э. (традиционная датировка — IX—VII вв. до н.э.), изложены начала философии природы. На основе «И-цзина» был создан анонимный трактат «Си цы чжуань» (V—III вв. до н. э.), исходивший из представления о борьбе двух начал: *ян* (Солнце, свет, мужское начало) и *инь* (Луна, тьма, женское начало). В результате их борьбы возникают пять первоэлементов: вода, огонь, дерево, металл и земля. Эти элементы образуют круговую после-

[6] С. Чаттерджи и Д. Датта. Введение в индийскую философию. ИЛ, 1955, стр. 33—34.

[7] C. de Harlez. Textes tâoistes. P., 1891, p. 321—322 (Annales du Musée Guimet, t. XX); см. также A. Forbes. The world conception of the chinese. London, 1925, p. 46.

довательность: каждый предшествующий способен «победить» последующий,— вода гасит огонь, огонь сжигает дерево и т. д.; земля в свою очередь образует преграду воде [8].

Китайские мыслители приводили в соответствие с пятью элементами разнообразные чувственные качества, различные предметы и явления природы. Так, воде соответствует соленое, огню — горькое, дереву — кислое, металлу — едкое, земле — сладкое. Четырем элементам (исключая землю, находящуюся в центре) приравнивались четыре страны света и четыре времени года. Из движений огню приписывалось движение вверх, воде — движение вниз; дереву — стремление вверх (так произрастают растения), металлу — стремление книзу (прогиб металлических предметов) и т. д.

Подобного рода распределение предметов и явлений по группам отчасти напоминает «тотемистические классификации», о которых говорилось выше. Но вместе с тем здесь еще более заметна работа абстрагирующей мысли, устанавливающей сходства и несходства между самыми различными явлениями. Нельзя не отметить, что в качестве элементов были выбраны основные вещества, с которыми человек имел дело в своей практике, а взаимоотношения между ними устанавливались по линии их возможных воздействий друг на друга, «обработки» одного другим: металл и дерево, огонь и металл и т. п. Характерно, что «неуловимый» воздух еще не фигурирует здесь в качестве особого элемента.

Другое важное понятие, с которым мы встречаемся в древнекитайской философии, это — понятие *естественного закона*. Оно было развито так называемыми даосистами. Основоположником даосизма является полулегендарный Лао Цзы (конец VI — начало V в. до н. э.). В труде «Да-дэ-цзин» («Книга о дао и дэ») [9] изложено это учение и определено понятие *дао*, т. е. пути или закона, лежащего в основе мироздания и управляющего движением постоянно изменяющихся вещей. «Дао», в отличие от «небесной воли» традиционной религии, мыслится как необходимость самой природы, «естественность». Таково же и «дэ», проявление «дао». Постижение «дао» каждой вещи дает человеку возможность овладеть ею и наиболее целесообразно с нею оперировать.

В последующие времена истолкование основных понятий даосизма пошло по двум диаметриально противоположным направлениям. С одной стороны, даосизм получил идеалистические толкование и окраску. К числу представителей этого

[8] Дошедшая до нас редакция текста относится ко времени не ранее IV—III вв. до н. э.

[9] Дошедшая до нас редакция текста относится ко времени не ранее IV—III вв. до н. э.

направления принадлежали конфуцианец Мэн Цзы (372—289 гг. до н. э.), упоминавшийся ранее Лю Цзя, а также Гуань Цзы (IV—III вв. н. э.). Во II — III вв н.э. даосизм осложнился новыми для него элементами магии и алхимии. Так, Куо Пхо (276—324 гг. н. э.), развивая космологические идеи даосизма (дуализм начал *ян* и *инь*), вместе с тем занимался псевдонаукой fêng shui («ветер и вода»), посвященной гаданиям.

Но, с другой стороны, с древним даосизмом было связано и мировоззрение материалиста и атеиста Ян Чжу (время расцвета — IV в. до н. э.) [10]. Материалистически настроенные авторы в своем толковании идей даосизма ставили на первый план идею естественной закономерности явлений, содержащуюся в понятии дао. Так, в космогоническом учении, которое изложено в книге «Лунь юйе» («Беседы и суждения», V—IV вв. до н. э.), проводится мысль, что все природные явления протекают независимо от неба и божества. Математик Сюнь Цзы также отрицал существование «небесной воли» и считал небо частью природы. Всеобщее распространение получило в III в. до н. э. материалистическое учение «фацзя» («законников»). Его представитель Хань Фэй (ум. в 233 г. до н. э.) подчеркивал, что *дао* — естественный путь развития природы.

Выдающимся материалистом несколько более позднего времени был Ван Чун (27 — прибл. 97 г. н. э.). В трактате «Лунь Хэн» («Критические рассуждения») он утверждал материальную природу неба, однородность неба с землей, вечность их. Мировой процесс, по Ван Чуну, это процесс, подчиненный закону необходимости: явления природы возникают в силу естественных причин. Отрицая телеологическую точку зрения, Ван Чун оспаривал мнение тех, кто думает, будто небо производит хлеб для того, чтобы прокормить людей, а шелковичные нити и коноплю — чтобы одеть их [11]. Основной субстанциальный элемент мироздания Ван Чун обозначал термином *ци*. Ци является основой пяти элементов или стихий (идея единства материи). Ци — это тончайшее материальное вещество, заключающее в себе начало жизни. Таким образом, представление о материи у Ван Чуна еще имело черты гилозоизма. Большое влияние на этого мыслителя оказал астроном и философ Хуань Тань (40 г. до н. э.— 30 г. н. э.).

Идея превращения материи, ее перехода в различные состояния нашла свое отражение у китайских писателей и в отношении

[10] Сочинения этого автора до нас не дошли. О его воззрениях можно судить лишь по пересказам в произведениях идеалистических философов, местами исказивших его мысли.

[11] См. А. А. Петров. Ван Чун — древнекитайский материалист и просветитель. Изд-во АН СССР, 1954, стр. 58.

конкретных вопросов метеорологии. По Лю Цзя (IV в. до н. э.), радуга, облака, туман, ветер, дождь, т. е. основные атмосферные явления, обусловлены скоплениями и видоизменениями воздуха и образуют небо. Горы и холмы, реки и моря, металлы и камни, т. е. все, имеющее определенную форму и образующее земной мир, также являются видоизменениями одного и того же начала.

В древнекитайской литературе можно найти самые различные объяснения таких явлений, как ветер или гром, начиная от истолкования их как «голоса» или «небесного повеления» до чисто физической интерпретации как движения воздуха, столкновения влажных начал или «взрыва» влажного начала «ян» и т. п. Облака, туман, дождь, роса — все это модификации одного начала «ян».

Наряду с такими общефилософскими понятиями о природе следует особо упомянуть о важнейших открытиях и изобретениях древних китайцев, имеющих отношение к физике.

Астроному Чжан Хэну (78—139 гг. н. э.) приписывается изобретение своеобразного, первого в мире сейсмоскопа: внутри полого шарообразного сосуда из тонкой меди диаметром около 2,5 *м*, украшенного изображениями гор, черепах, птиц и животных, помещался вертикальный маятник; к нему прикасались восемь пружин — рычагов, выведенных наружу. К наружному концу каждого рычага была прикреплена металлическая голова дракона; в пасть его помещали медный шарик. Вызванное движением маятника падение шарика в раскрытую глотку металлической жабы, находившейся внизу, позволяло узнать, в каком из восьми направлений произошло землетрясение. Описание сейсмоскопа сохранилось в сочинении «Ху-хан-шу», истории восточной ханьской династии, написанной ученым Фан Йе (ум. в 445 г. н. э.). В этом сочинении рассказывается, что однажды механизм дракона пришел в движение, а землетрясения, казалось, не было; все ученые столицы пришли в смятение, пока, наконец, не прибыл гонец, сообщивший о землетрясении в отдаленной местности. С тех пор все поверили в удивительное изобретение, и одному из астрономов было поручено вести летописи землетрясений [12].

Другим изобретением китайцев является компас. Долгое время магнит применялся лишь для ориентировки в сухопутных путешествиях и поездках, при разбивке строительных участков и лишь позднее нашел применение в морских плаваниях (см. ниже, стр. 93).

В китайских источниках упоминается о повозках с прибо-

---

[12] A. Forbes. The world conception of the chinese. London, 1925, p. 19.

ром, указывающим южное направление. Об этом говорится в историческом сочинении Сы Ма-таня (ум. в 110 г. до н. э.) и его сына Сы Ма-цяня (род. ок. 145 — ум. в 86 гг. до н. э.), в котором это изобретение отнесено к легендарному времени — 1110 г. до н. э. Еще дальше, ко времени мифического императора Хуан Ти (2698—2598 гг. до н. э.), отнесено оно в сочинении «Ку-кин-чу» («О старых и новых вещах») автора IV в. н. э. Куо Пхо. С примерно такой же датировкой мы встречаемся и в большом историческом сочинении XII в. н. э. «Тун-чен-кан-му», где изобретение датировано 2634 гг. н. э. (впрочем, там же оно приписано и императору Чжоу Гуну, XII—XI вв. до н. э.).

В китайских источниках можно встретиться и с первыми попытками *описать и объяснить* действия магнита. Так, в словаре «Шо-вень», составленном около 120 г. н. э. ученым Хю Чином, к слову tseu (магнит) дано разъяснение, что это наименование «камня, посредством которого дают направление игле». В другом, более позднем словаре, имевшем целью дать этимологические разъяснения к классическим текстам, а именно в словаре «Чин-цан-хи» лексикографа конца VI в. н. э. Лу Те-мина говорится, что «магнит притягивает железо так, как нежная мать сзывает к себе своих детей», и что отсюда он получил свое название «любящий камень». Другие китайские названия его означают: «камень, который направляет», «камень, который соединяется с железом».

О свойствах янтаря приводятся сведения в сочинении упомянутого выше Куо-Пхо, который писал: «Магнит притягивает железо так же, как янтарь горчичное зерно. Это есть дуновение, которое проникает непостижимо и быстро, и которое незаметно передается тому, что отвечает ему в других телах. Это явление — необъясненное»[13]. Позднее медик-алхимик Тао Хун-кин (451—536 гг. н. э.) в сочинении «Мин-и-пу-лу» сообщал, что настоящий янтарь можно отличить от поддельного тем, что настоящий янтарь начинает притягивать горчичные зерна, если натирать его рукой до тех пор, пока он не разогреется.

Большой интерес представляют памятники древнеиндийской философской литературы.

Представителями наиболее строгого материализма в древней Индии были сторонники системы *чарвака*; другое ее название — *локаята* (дословно — распространяющаяся только о земном). Возникновение материалистических учений относится к весьма отдаленным временам и предшествовало формированию идеалистических школ. Уже в так называемых Упанишадах, приблизительно за 1000 лет до н. э., имеется ссылка

[13] A. Urbanitzky. Elektrizität und Magnetismus im Altertum. Wien, 1887, S. 106.

на учение, ничего кроме материи не признававшее. За 500 лет до н. э., во времена Будды, уже существовало несколько школ, которые ничего не признавали, кроме «четырех великих элементов» [14].

Сторонники системы чарвака, основываясь на сенсуалистической теории познания, отвергали существование бога и бессмертие души, отрицательно относились к религиозным обрядам. Согласно этой системе, действительно существует лишь то, что доступно органам чувств. Поэтому есть лишь четыре первичных элемента: земля, вода, воздух, огонь; что касается эфира (*акаша*), то чарваки, в отличие от других древнеиндийских школ, отвергали его существование, основываясь на том, что он недоступен для чувственного восприятия. Сознание есть продукт особой комбинации материальных элементов; подобно тому как бетель, известь и орех, если жевать их одновременно, приобретают красноватый цвет, которого они раньше не имели, или бурая патока приобретает новые, опьяняющие свойства при брожении, так и материальные элементы способны в особой своей комбинации приобрести новые свойства сознания.

Односторонне сенсуалистическая точка зрения приводила систему чарвака к отрицанию закона причинности: нет никакой гарантии,— заявляли они,— что одинаково воспринимавшееся в прошлом будет восприниматься так же и в будущем. Впрочем, следует заметить, что большая часть источников, относящихся к системе чарвака, утеряна или же уничтожена и искажена ее противниками, а потому в отношении многих сторон этого учения нет достаточной ясности.

Для истории физики особый интерес среди других древнеиндийских школ или систем представляет система *вайшешика* (в буквальном переводе — характерная, типичная), зарождение которой относится, по-видимому, к V в. до н. э. Ее связывают с именем мудреца Улука, получившего прозвище Канада[15]. Согласно этому учению, материальные тела состоят из мельчайших неделимых частиц, атомов (*параману*). Атомы неразрушимы, так как разрушить — значит разделить на части; они существуют извечно, так как всякое возникновение основано на комбинации частей, которых атомы не имеют. Первоначальная комбинация двух атомов называется *двьянука* (двойка). Комбинация трех двоек или триада (*трьянука*) является минимальным воспринимаемым объектом; ни атом, ни двьянука

[14] См. Ф. И. Щербатской. К истории материализма в Индии. Восточные записки, 1, Л., 1927, стр. 1—10.

[15] Это прозвище (в переводе «пожиратель зерен») одни объясняют тем, что Улука вел аскетический образ жизни и питался зернами кукурузы, которые он подбирал на сжатом поле; другие усматривают в нем насмешку: ум этого мудреца питался мельчайшими частицами, атомами.

для чувств недоступны. Всего существуют четыре вида атомов, качественно отличных друг от друга: атомы земли, воды, воздуха и света. Они порождают сооветствующие чувственные ощущения — обонятельные, вкусовые, осязательные и зрительные,— которым отвечают объективно существующие качества в самих первичных элементах.

Наряду с четырьмя элементами, согласно системе вайшешика, существует всепроникающий эфир (акаша), прямо не воспринимаемый чувствами, но являющийся субстратом воспринимаемых звучаний. Остальные четыре вида субстанций нематериальны: это время, пространство, душа и ум. Кроме указанных четырех качеств, присущих первичным элементам, а также качества звука, связанного с эфиром, в системе вайшешика признается существование и других видов качеств, общим числом 24. К ним относятся: число, величина, усилие, тяжесть, текучесть, вязкость, стремление и др. Тяжесть определяется как причина падения тел, вязкость (присущая исключительно воде)— как причина сцепления частиц; видами стремления являются скорость, характеризующая движение вещи, упругость, восстанавливающая форму вещи, и т. д. Видов физического действия или движения насчитывается в этой системе пять: подъем, опускание, расширение, сжатие и перемещение (к последнему виду относятся все движения, не входящие в четыре ранее указанных).

Физические представления школы вайшешика были усвоены и школой *ньяя* (дословно — правило, основание, метод, логический вывод или логика вообще); эта школа возникла приблизительно в конце I в. н. э. и связывается с именем мудреца Готамы. Черты сходства (в области учения о физических субстанциях) с системой вайшешика обнаруживает и система *санкхья* (дословно — совершенное знание), связываемая с именем мудреца Капилы; расцвет ее относится ко II—VII вв. н. э. Система санкхья также признавала существование пяти тонких элементов (*танматра*), ставя их в соотношение с пятью видами чувственных качеств, хотя и считала, что сами элементы для чувственного восприятия недоступны и постигаются лишь путем логического умозаключения. Земля обладает пятью свойствами: звуком, осязательными качествами, цветом, вкусовыми свойствами и запахом; вода — четырьмя (она лишена запаха); свет, или огонь — тремя (лишен вкуса и запаха); воздух — двумя (звуком и осязательными качествами). Эфир обладает только одним свойством — звуком. Развитие Вселенной объяснялось в этой системе дуалистически — из взаимодействия двух одинаково первичных начал: первоматерии (*пракрити*) и духа (*пуруша*).

Не будем детальнее сопоставлять древнекитайские и древнеиндийские представления с древнегреческими, хотя ряд ана-

логий и напрашивается, как в области учения об элементах, так и в области взглядов на единство и преобразование материи. Отметим лишь, что в отличие от древнегреческого атомизма индийские атомисты наделяли тела объективно существующими качествами и что согласно системе вайшешика атомы не заключали в себе самих источника своего движения: первоисточником движения последователи Канады объявляли волю бога, который управляет миром и вносит в него порядок.

Подводя общий итог, следует отметить, что в философских произведениях древних китайцев и древних индийцев существовали общие, абстрактные категории, распространяющиеся на всю природу. Предметом размышления были такие общие понятия, как время, пространство, движение, такие свойства, как тяжесть, текучесть, вязкость и т. п. Появляется понятие о материальном субстрате мира, видоизменяющемся и разнообразящемся в бесчисленных своих проявлениях. К этому нужно присоединить то, с чего мы начали,— прогресс техники, значительно расширивший совокупность эмпирических знаний и способствовавший в первую очередь успехам математики и астрономии.

ФИЗИКА В ДРЕВНЕЙ ГРЕЦИИ И ДРЕВНЕМ РИМЕ

Общеизвестны слова Энгельса о том, что «в многообразных формах греческой философии уже имеются в зародыше, в процессе возникновения, почти все позднейшие типы мировоззрений». «Поэтому,— продолжает Энгельс,— и теоретическое естествознание, если оно хочет проследить историю возникновения и развития своих теперешних общих положений, вынуждено возвращаться к грекам»[16].

Если и можно проводить аналогии между учениями древнего Востока и древних греков, а в отдельных случаях и намечать возможные линии прямой преемственности, то в целом нельзя забывать, что наука древней Греции явилась неповторимо своеобразным звеном исторического развития и что именно античное наследие легло в основу последующей эволюции европейского естествознания.

Самый термин «физика» получен нами от греков, хотя в античную эпоху он не имел того значения, которое имеет сейчас. Он охватывал тогда общее учение о природе. Первоначальное значение слова фисис — то, что первично, устойчиво, что лежит в основе вещей, в противоположность вторичному, изменяющемуся и производному. Можно было бы сказать, что

[16] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 25.

оно в известном смысле соответствует китайскому понятию *дао*, как устойчивого естественного закона.

В первой части настоящего обзора мы постараемся дать в хронологической последовательности общую характеристику античных представлений о природе и той среды, в которой эти представления развивались. Во второй части будут детальнее рассмотрены физические знания и идеи по отдельным отраслям физики (механика, оптика, акустика, представления о теплоте, магнетизме и электричестве).

Первый подъем греческой науки происходил в VI в. до н. э. в торговых городах малоазийского побережья — в Милете и Эфесе. Об «отце греческой философии» Фалесе Милетском, жившем в последней четверти VII и первой половине VI в. до н. э., известно, что он был купцом, много путешествовал, был в Египте. Относительно других уроженцев Милета — Анаксимандра (611—565) и Анаксимена (566—499?) мы не располагаем подробными биографическими данными. Однако все трое имеют друг с другом много общего. Сродни милетской натурфилософии (в своем учении о природе) и Гераклит Эфесский [(540 (530)—~470]. Более резко отличается от «ионийских натурфилософов» выходец из Ионии Ксенофан (570—470), проживший значительную часть своей жизни в Элее (греческой колонии в южной Италии).

В ионийской натурфилософии были сформулированы в виде гениальных догадок некоторые общие положения о природе. Стихийные материалисты, ионийские натурфилософы пришли к выводу, что при всем разнообразии видимых явлений материя едина: все тела в природе — лишь различные стадии уплотнения или разрежения единого первичного вещества. Таким первичным веществом для Фалеса являлась вода, для Анаксимена — воздух, для Гераклита — огонь. Анаксимандр считал первоначалом «беспредельное» (под которым, однако, возможно, следует понимать невидимый и прозрачный воздух). Картина взаимного перехода одного вещества в другое наиболее четко запечатлена в описании Анаксимена, согласно которому воздух, утончаясь, переходит в огонь, а уплотняясь — в ветер, облака, воду, землю и, наконец, в камни; град — это замерзшая вода, отделившаяся от облаков, снег — замерзшие облака. Гераклит различал «путь вверх», переход от земли через воду и воздух в огонь, и «путь вниз», обратный переход от огня к земле; молнии — это воспламенившиеся испарения, зарницы — вспыхивающие и угасающие тучи. Таким образом, идея единой материи, видоизменениями которой являются все разнообразные вещества, встречаемые в природе, служила не только для объяснения того, что мы называем теперь агрегатными состояниями (твердое, жидкое, газообразное), но и для

объяснения самых различных природных процессов и явлений. Она же лежала в основе представлений о возникновении и развитии мира.

Наряду с явлениями неорганического мира, на представления ионийских натурфилософов о первичной материи повлияли, разумеется, и наблюдения над живыми существами. Значение влаги для прорастания семян и развития животных, процессы дыхания, роль тепла — все эти факторы принимались во внимание при рассуждениях о воде, воздухе, огне как «началах сущего». В частности, нельзя не отметить, что вода, которую Фалес признал первоначалом всего сущего,— единственное вещество, которое в естественных условиях встречается во всех трех агрегатных состояниях (лед и снег, жидкость, пар) и вместе с тем необходима для поддержания жизни.

Небесные явления истолковывались в полном соответствии с земными. Для Ксенофана Солнце состоит из воспламенившихся облаков, из скопления мелких искр. Другие светила гаснут и загораются ежедневно, «точно угольки». Явления астрономические и метеорологические, правда, не везде бывали правильно разграничены: кометы для того же Ксенофана — это воспламенившиеся облака. Но подобные представления о кометах как явлениях метеорологических держались чрезвычайно долго; принципиально важно, что единство материи распространялось, по воззрениям ранних греческих философов, на всю Вселенную.

Другим большим завоеванием натурфилософской мысли ионийцев было представление о бесконечности мира. Наиболее отчетливо мысль о бесконечности Вселенной в пространстве и о бесконечном числе миров проступила в высказываниях Анаксимандра. Мысль о бесконечности мира во времени, т. е. его вечности, выражена в словах Анаксимандра: беспредельное начало не возникает и не уничтожается, оно является неиссякаемым источником для возникающих и уничтожающихся миров. По Гераклиту, мир не был создан никем из богов или людей,—«он всегда был, есть и будет вечно живым огнем, мерами вспыхивающим и мерами угасающим» [17]. В этих словах нашла свое выражение еще одна мысль, характерная для древних греков: убежденность в цикличности мироздания, вечном круговороте бытия. Гераклит пытался даже определить точно величину «великого», или мирового, года, завершающегося «мировым пожаром». Представление о цикличности, в свою очередь, явилось одной из форм для выражения мысли о строгой закономерности мирового процесса. По образному выражению Герак-

[17] А. Маковельский. Досократики, ч. I. Казань, 1914, стр. 152.

лита, «Солнце не преступит меры, в противном случае его настигнут Эриннии, блюстительницы Правды» [8].

Как будет видно дальше, гениальные догадки древних греков о единстве материи, вечности мира, бесконечности Вселенной далеко не сразу получили признание и дальнейшее развитие в науке. Христианско-библейское, а позднее мусульманское представление о сотворении мира богом «из ничего» веками тормозило это развитие; научной мысли приходилось с величайшим трудом преодолевать подобные представления, так же как и представления об ограниченности мира в пространстве, о качественной противоположности «неба» и «земли». Передовая мысль средневековья и раннего Возрождения—«еретическая» с точки зрения господствующей религии — прямо или косвенно питалась именно этими гениальными идеями древних греков, имевшими еще характер догадок и смелых прозрений.

Натурфилософия ионийских ученых была стихийно диалектичной. Эту наивную, первоначальную диалектику нетрудно заметить в представлениях милетских философов о текучести единой материи, принимающей разные обличия и формы. С еще большей определенностью она выражена в философии Гераклита, утверждавшего, что «все течет», что «нельзя дважды вступить в одну и ту же реку». По учению Гераклита, все возникает из борьбы противоположностей, «все рождается благодаря распре и необходимости», «война есть отец всего, царь всего». Эти противоположности диалектически связаны друг с другом; отсюда упреки Гераклита по адресу «учителя большинства» Гесиода, который не понял, что день и ночь — одно [19].

Почему же в дальнейшем развитии греческой науки не сказались в такой же мере диалектические черты, свойственные этой ранней стадии? Причины заключались не только в общественных условиях, но и в логике развития самой науки. Первоначальный, наивный, хотя по сути дела и правильный взгляд на мир, присущий древнегреческой философии, верно схватывал общий характер всей картины явлений, но он оказался недостаточен для объяснения частностей, поскольку эти частности не были еще изучены, а без такого изучения было невозможным и действительно научное познание их взаимных диалектических связей. По глубоко справедливому замечанию Энгельса: «Чтобы познавать отдельные стороны (частности), мы вынуждены вырывать их из их естественной или исторической связи и исследовать каждую в отдельности по ее

[18] Там же, стр. 162.
[19] Там же, стр. 142, 157.

свойствам, по ее особым причинам и следствиям, и так далее. В этом состоит прежде всего задача естествознания и исторического исследования, т. е. тех отраслей науки, которые, по вполне понятной причине, занимали у греков классических времен лишь второстепенное место, потому что грекам нужно было раньше накопить необходимый для этого материал» [20].

Отмечая большие сдвиги в представлениях греков о природе, нельзя закрывать глаза и на то, что в ионийской натурфилософии оставались еще сильными пережитки антропоморфных, анимистических и мифологических представлений. Фалес объяснял известные ему магнитные и электрические явления (притяжение железа магнитом, легких тел — натертым янтарем) указанием на существование «души» у магнита и янтаря. Сохранилось его изречение: «все полно богов и демонов». Представления Фалеса о воде как праэлементе обнаруживают еще известное родство с мифологическими представлениями о первоначальном Океане, окружающем Землю,— лоне всего существующего.

Примитивными оставались представления о форме Земли. По Фалесу, Земля имеет форму плоского диска, плавающего на поверхности безграничного океана. По Анаксимену, плоская Земля имеет форму стола, по Анаксимандру, Земля — цилиндр.

Не существовало правильного объяснения и таких явлений, как затмения Солнца и Луны. Древние авторы сообщают, что Фалес предсказал солнечное затмение 585 года до н. э. Если это сообщение и верно, то во всяком случае отсюда нельзя еще сделать вывод, что Фалесу были известны истинные причины затмений. Закономерность и периодичность лунных затмений, происходящих в определенном месте, была известна вавилонянам; это позволяло с определенной вероятностью предсказывать и солнечные затмения. Предполагали, что на подобных способах предвидения мог основываться и Фалес, однако новейшими исследованиями установлено, что открытие указанной периодичности вавилонянами относится к более позднему времени (V—IV вв. до н. э.) [21]. Во всяком случае, Фалес мог предсказать только год, но не день затмения, на что и указывал еще Геродот [22]. В позднейшей античной литературе рассказ о Фалесе повторялся не раз и является одним из ранних исторических примеров, свидетельствующих о возрастающей уверенности в силе научного предвидения.

[20] К. Маркс и Ф. Энгельс. Избранные произведения, т. II. Госполитиздат, 1955, стр. 120.

[21] См. G. Sarton. A history of science. Ancient Science through the golden age of Greece. London, 1953, p. 170.

[22] Геродот, кн. I, гл. 74.

Что касается объяснения затмений, то примером их примитивности могут служить воззрения Гераклита: Солнце имеет вид чаши, в которой скапливаются лучи влажных возгорающихся испарений; затмения бывают тогда, когда чаша поворачивается к нам своей выпуклой стороной, обращая вогнутую сторону вверх.

Предание связало множество математических открытий с именем Пифагора (VI в. до н. э.) и древнейших пифагорейцев. Однако в данном случае мы большей частью имеем дело с позднейшими легендарными наслоениями. В частности так называемая Пифагорова теорема уходит корнями в науку древнего Востока. Притом соотношение между суммой квадратов катетов и квадратом гипотенузы могло быть известно Пифагору не в обобщенной форме, а лишь для тех случаев, когда стороны прямоугольного треугольника являются рациональными числами (введение иррациональных отношений и величин относится к следующему, классическому периоду).

Таковы основные достижения так называемого архаического периода древней Греции. В следующий — классический период (V—IV вв. до н. э.) наука достигла новых значительных успехов.

V в. до н. э. явился временем максимального подъема экономики и социально-политической жизни Греции. Рабовладельческий способ производства вступил в стадию своей полной зрелости. Значительно дифференцировался труд, возросла роль свободных высококвалифицированных ремесленников. Государственный строй, установившийся во второй половине Vв. в Афинах при Перикле, явился кульминационной точкой демократии, возможной в условиях рабовладельческого общества. «Век Перикла» был одновременно «золотым веком» древнегреческой культуры, временем расцвета литературы и искусства. Значительны были успехи материалистической науки (Гиппократ, Демокрит), расширились географические и исторические горизонты. Передовая философия расшатывала устои традиционных религиозных верований.

В IV в., в обстановке начавшегося кризиса полиса, с одной стороны, борьба враждебных идеологических направлений обострилась, но, с другой стороны, начавшаяся специализация наук, продолжавшаяся в последующую, эллинистическую эпоху, до известной степени освобождала естественнонаучные исследования от того прямого и непосредственного влияния философских школ и направлений, которое они испытывали раньше.

В IV в. появились первые организованные по-новому научные коллективы, совмещавшие педагогическую работу с исследовательской: Академия Платона и Ликей Аристотеля; юриди-

чески они существовали на правах религиозных культовых товариществ. И Академия, и Ликей не были только философскими школами, хотя философские направления и накладывали свой отпечаток на проводившиеся исследования. С Академией были связаны астроном и математик Евдокс, астроном Гераклид Понтийский, с Ликеем — занимавшийся ботаникой и минералогией Феофраст (372—288), теоретик музыки Аристоксен и другие ученые.

В целом развитие науки характеризовалось в рассматриваемый период несколькими основными чертами: во-первых, усилившимся стремлением к *количественному*, математическому исследованию природных явлений и, во-вторых, усилившейся в науках (особенно в математике) тягой к научному *доказательству*, к обоснованию выдвигаемых положений. О том, какое значение придавал научному доказательству великий материалист древности Демокрит, свидетельствует его выразительный афоризм: «Найти одно научное доказательство для меня значит больше, чем овладеть всем персидским царством».

Выше было отмечено, что ионийская натурфилософия имела черты стихийной диалектики. Кардинальные вопросы движения продолжали стоять в центре внимания мыслителей классической эпохи. Однако на новой стадии отчетливо раскрылись и те трудности, с которыми встречается мысль при логическом анализе этого понятия. Раскрытие их явилось большой исторической заслугой так называемой элейской школы. Идейным вдохновителем ее был уже упоминавшийся ранее Ксенофан, видными представителями — Парменид (~515 г. до н. э.—?) и Зенон (~490—430?). Для самих элеатов вскрытые ими трудности служили поводом к идеалистическим и метафизическим выводам, к утверждению, что наши чувства нас обманывают, что движение иллюзорно, что реален лишь мир неизменно-сущего. Вот почему свое физическое учение Парменид предлагал лишь как некую условную, гипотетическую картину мира, не имеющую, по его мнению, права претендовать на соответствие подлинной действительности.

Всемирную известность получили знаменитые парадоксы, или апории («трудности») Зенона. Независимо от философского истолкования, которое они получили у элеатов, эти парадоксы толкали мысль к дальнейшему изучению проблем пространства и времени, непрерывности и дискретности, бесконечно-большого и бесконечно-малого, поднимали вопросы, над разрешением которых человечество трудилось впоследствии на протяжении многих столетий. К числу зеноновых апорий принадлежит парадокс, согласно которому быстроногий Ахилл не может догнать черепаху: если предположить, что Ахилл движется вдвое быстрее, чем черепаха, то когда он пройдет

отделяющее их расстояние, черепаха продвинется на половину этого расстояния; когда он пройдет эту половину, черепаха продвинется на четверть и т. д.; таким образом, Ахилла от черепахи всегда будет отделять известное, бесконечно уменьшающееся расстояние. Это значит, заключал Зенон, что Ахилл никогда не догонит черепаху. Другой парадокс основан на относительности движения: скорость движения на стадионе будет различной в зависимости от того, измеряется ли она по отношению к неподвижному телу или к другому телу, находящемуся в движении. Парадокс «летящей стрелы» утверждает, что такая стрела неподвижна, поскольку в любой момент времени она находится (покоится) в той или иной точке. Следовательно, заключал Зенон, движение есть не что иное, как сумма состояний покоя.

Новым этапом в представлениях о материи, лежащей в основе вещей, явились учения мыслителей Эмпедокла (495—435) и Анаксагора (~500—428). Вместо одной первоначальной стихии, принимающей различные состояния и формы, как это представляли ионийские натурфилософы, Эмпедокл насчитывал четыре не переходящих друг в друга стихии или элемента: огонь, воздух, воду и землю. По Анаксагору, первичных элементов — бесчисленное множество, они различны по виду, цвету и вкусу. И Эмпедокл, и Анаксагор считали, что неизменные элементы *не превращаются* один в другой, они неуничтожимы, вечны; всякое возникновение есть лишь соединение, а уничтожение — разъединение. Эмпедокл говорит об элементах:

> К ним ничто не прибавится, в них ничто не иссякнет:
> Если бы гибли они беспрерывно, их ныне б не стало [23].

По Анаксагору, «совокупность вещей никогда не становится ни больше, ни меньше, а всегда остается одной и той же» [24].

Наряду с элементами Эмпедокл и Анаксагор признавали существование особых движущих сил. Такими источниками движения были для Эмпедокла Вражда и Любовь, для Анаксагора — Ум, породивший первый вихрь, из которого возник мир. Любовь и Вражда мыслились Эмпедоклом как протяженные начала, имеющие вес, а Ум Анаксагора — это живое самодвижущееся тело. Тем не менее нельзя не видеть в концепции обоих философов отход от первоначального гилозоистического материализма ионийцев, наделявших движением и жизнью материю как таковую.

---

[23] Эмпедокл. Отрывки из поэмы «О природе», стихи 30—31 (в книге: Лукреций. О природе вещей, т. 2. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 666).

[24] H. Diels. Die Fragmente der Vorsokratiker. 4. Aufl., Berlin, 1922, S. 402.

Вместе с тем нетрудно обнаружить у Анаксагора и прежнее, «ионийское» представление об однородности земных и небесных тел. По Анаксагору, Солнце и другие светила — воспламенившиеся камни, оторвавшиеся от Земли. Возможно, этот вывод о родстве земного и небесного был подкреплен в глазах Анаксагора падением большого метеорита, которое он наблюдал около Эгоспотам (во Фракийском Херсонесе) в 467 г. до н. э. Позднейшая легенда приписала ему *предсказание* этого падения (сравни с предсказанием солнечного затмения Фалесом); легенда показательна для античных представлений о силе научного предвидения. Не менее показательно, что в 434 г. Анаксагор был обвинен в безбожии и вынужден был покинуть Афины.

Своей кульминационной точки в этот период греческий материализм достиг в системе Демокрита (470—370). Предшественником Демокрита считают Левкиппа. Но наши сведения о нем до сих пор остаются весьма скудными, и потому не всегда удается отслоить в античных сообщениях действительный факт от позднейшего легендарного вымысла.

Демокрит был родом из Абдер, города Фракии. Античные биографы сообщают о его путешествиях в Египет, Персию, Вавилон и перечисляют написанные им многочисленные произведения по математике, физике, технике, филологии и этике.

Вместе с Левкиппом Демокрит является родоначальником античного атомизма. Согласно демокритовскому учению, в действительности существуют только атомы и пустота. Атомы отличаются друг от друга своей формой, положением и сочетанием. Демокрит иллюстрировал этот тезис сравнением с буквами; так, например, можно сказать, что А и Н отличаются формой, N и Z — положением, АН и НА сочетанием (или порядком). Подобно тому как небольшое число букв алфавита дает огромное число различных сочетаний в поэме, так и весь мир состоит из сочетания атомов и разделяющей их пустоты: возникновение есть соединение, уничтожение — разъединение атомов. Аналогичный взгляд на возникновение и уничтожение высказывали, как уже говорилось, Эмпедокл и Анаксагор. Однако Демокрит не признавал существования мироупорядочивающего начала, подобного Уму Анаксагора, или Вражде и Любви Эмпедокла. Движение искони присуще атомам,— они движутся всегда.

Нетрудно видеть, что увеличение числа первичных элементов и попытка свести разнообразие физических явлений к различному количественному и пространственному сочетанию этих элементов явились шагом вперед по сравнению с монизмом ионийских натурфилософов. Глубокая идея единства материи, устанавливавшая связь между всеми природными явле-

ниями, при недостатке фактического материала не давала ключа к объяснению *различия* в этих явлениях. Признание множественности элементов оказалось на данной стадии необходимым этапом научного исследования.

В материализме Демокрита все качественное разнообразие вещей объясняется количественными различиями атомов, их положениями и движениями. В соответствии с этим различали два вида познания: одно лишь чувственное познание является «темным» и «незаконнорожденным», если не дополняется деятельностью «законнорожденной мысли», т. е. разума. По выражению Демокрита, истина находится «на дне глубокого колодца». Непроверенные и неочищенные показания чувств обманывают нас так же, как образ весла, которое при погружении в воду кажется переломленным. Разум приводит через критический анализ чувственных показаний к подлинной действительности — к атомам и их движениям. Разумеется, идеал математико-механического объяснения природы при недостаточном количестве изученных фактов и недостаточном совершенстве математического аппарата должен был оставаться в греческой науке постулатом, но это не уничтожает исторической значительности самого требования.

В связи с механицизмом атомистов стоит последовательно проводимый ими принцип необходимости, или сквозной причинности. По Левкиппу, «все происходит по необходимости», «необходимость и рок одно и то же», «ничто не происходит попусту, но все — по определенной причине и в силу необходимости». Демокрит отождествлял эту необходимость с мировым вихрем. Мир возник в результате вихря, явившегося причиной того, что более тяжелые тела скопились в центре, а более легкие выталкивались к периферии. Таким образом, в центре мира оказалась земля, далее — вода, воздух и, наконец, огонь.

По Демокриту, существуют бесчисленные миры, различные по величине. В одних нет ни Солнца, ни Луны, в других Солнце и Луна больше, чем наши, в третьих их больше и числом. Некоторые миры не имеют животных и растений и вовсе лишены влаги. Одни миры еще растут, другие находятся в расцвете, третьи уже разрушаются. В одних местах в одно и то же время миры возникают, в других погибают. Душа, по мнению Демокрита, есть особого рода огонь и теплота. Она состоит из круглых, наиболее тонких и подвижных атомов.

Во второй, специальной части настоящего раздела будут подробнее рассмотрены взгляды Демокрита на некоторые физические явления.

Значительно шагнули вперед в V—IV вв. математические знания. Показательными для этого прогресса являются труды Демокрита и Гиппократа Хиосского, а также труды пифагорей-

цев и примыкавших к ним ученых (Архита Тарентского, Феэтета, Феодора Киренского, Евдокса). Этих пифагорейцев конца V и IV вв. следует отличать от древнейших пифагорейцев, о которых упоминалось ранее (стр. 29) и роль которых в математике была сильно преувеличена. В трудах этих ученых впервые стала математически разрабатываться стереометрия. Так, Демокрит определил объем конуса и пирамиды, цилиндра и призмы; пифагорейцы разрабатывали теорию пяти правильных многогранников; знаменитая задача об удвоении куба исследовалась Гиппократом и т. д. В связи с запросами музыкальной акустики получила развитие теория пропорций. Предметом специального исследования были вновь открытые иррациональные величины и соотношения.

В области астрономии должны быть отмечены новые представления о шарообразности Земли и светил, что сделало возможным появление более правильной теории солнечных и лунных затмений. У пифагорейцев нового направления появляются и первые мысли о том, что Земля не занимает центрального положения среди планет: в центре Вселенной находится некий центральный огонь, вокруг которого движутся в прозрачных сферах Земля, Солнце, Луна, пять планет, а также сфера неподвижных звезд. По-видимому, для того, чтобы довести число мировых тел до десяти — числа, которое пифагорейцы считали совершенным—они ввели еще гипотетическую «противоземлю». Расстояния от небесных сфер до центрального огня выражались, согласно пифагорейцам, в простейших («музыкальных») числовых отношениях; отсюда — учение о так называемой гармонии сфер. Нельзя не видеть в этом одну из попыток математизации законов, лежащих в основе Вселенной. Однако практическая неприменимость и гипотетичность пифагорейских построений явились причиной того, что они не могли получить широкого распространения.

В IV в. Евдокс предложил так называемую теорию гомоцентрических сфер, т. е. сфер, объемлющих одна другую и имеющих общий центр, в котором находится Земля. Каждая сфера вращается равномерно вокруг осей, расположенных под известным углом одна к другой. Внутренняя сфера претерпевает движение всех обнимающих ее сфер. Для определенного периода теория Евдокса (ее разделял и Аристотель) давала достаточно удовлетворительное объяснение видимых планетных движений (впоследствии ее сменила более сложная теория Птолемея; см. ниже, стр. 38). Другой астроном IV в. Гераклид Понтийский выдвинул теорию, согласно которой Меркурий и Венера движутся вокруг Солнца, а оно, в свою очередь, движется вместе с прочими планетами вокруг Земли. Подобные теории предполагали значительно более развитый математический аппарат,

нежели тот, который находился в распоряжении ученых архаического периода.

Одним из наиболее решительных сторонников крайнего идеализма явился ученик Сократа, Платон (427—347). Чувственно воспринимаемому миру изменчивых вещей он противопоставил мир неизменных идей, несовершенным отблеском которых являются материальные предметы. Постигая общее, идею, разум постигает действительно-сущее, которое более реально, чем единичное, познаваемое чувствами: математический треугольник, освобожденный от всех несовершенств реально начерченного на земле или доске треугольника, является предметом подлинного познания. Действительное математическое доказательство, согласно Платону, должно быть чуждо «нечистой геометрии» линейки и циркуля, «несовершенных» чисел, с которыми оперируют торговцы и ремесленники. С пренебрежением относился Платон к тем теоретикам музыки, которые занимаются акустическими экспериментами и которые, по его словам, «не дают покоя струнам и пытают их, натягивая на колки»[25].

Таким путем Платон оторвал научное познание от чувственного опыта, от практики, которые, согласно его взглядам, лишь мешают действительному постижению предмета и уничтожают строгость научного доказательства.

Сын врача Никомаха, слушатель Платона в Афинах, воспитатель Александра Македонского, Аристотель (384—322) был разностороннейшим ученым, энциклопедистом. Ему принадлежат труды по философии, естествознанию, истории, экономике, политике и теории поэзии. Внимание к философским и научным взглядам своих предшественников привело к тому, что Аристотель явился одним из первых в Греции историков философии и науки. Великий греческий философ родился в Стагире (Македония). В Афинах им была основана школа (Ликей). От находившегося в этой школе места прогулок, или «гульбища» (перипатос), последователи Аристотеля получили прозвище перипатетиков (неверно объяснение, будто это название произошло от того, что самое преподавание велось во время прогулок по садам Ликея).

Занятия Аристотеля вопросами естествознания были причиной того, что в области философии природы он во многих пунктах приближался к материализму. В противоположность Платону Аристотель придавал объективное значение показаниям наших чувств. Признавая объективность качеств, он рассматривал механическое движение лишь как один из частных случаев «движения» в более общем и широком смысле, т. е. изме-

[25] Платон. Государство, VII, 531 *b*.

нения вообще (другими видами такого движения были для него качественное изменение, «рост», возникновение и уничтожение). Признание объективности качеств позволяло Аристотелю (в отличие от чисто количественного, механистического подхода Демокрита) оперировать в физике такими противоположностями, как холодное и теплое, легкое и тяжелое, которым он придавал объективное значение. С другой стороны, Аристотель категорически отвергал реальное существование противоположностей, не основанных на показаниях чувственного опыта, например, телесности и пустоты, из которых первая является, а вторая не является предметом ощущения (на противопоставлении тела и пустоты, как мы знаем, была основана физика древних атомистов).

В отличие от теорий Демокрита мы несколько подробнее рассмотрим здесь, а не в специальной части, основные положения аристотелевской физики, так как именно эти общие воззрения (а не частные наблюдения и теории в специальных физических отраслях) имели наибольшее историческое влияние и продолжали жить столетиями у различных народов Востока и Запада.

В своей физической системе Аристотель исходит из двух основных представлений: 1) мировое пространство сплошь заполнено материей, делимой до бесконечности,— пустоты не может существовать ни между отдельными телами, ни между мельчайшими составляющими их частицами, 2) движение тел является первичным фактом, который не может быть подвергнут сомнению; все теории, приводящие к отрицанию реальности движения, уже тем самым являются ложными. Исходя из этого принципа несомненности движения, Аристотель подвергал критике апории Зенона, основанные на понятии «неделимых», т. е. представления, что линия состоит из точек, время из мгновений: коль скоро такое допущение «неделимых» приводит к отрицанию движения, оно неприемлемо.

Чтобы движение могло иметь место, утверждал Аристотель, вовсе нет необходимости предполагать наличие пустоты: тела могут уступать друг другу место одновременно, как это бывает в вихревых движениях и в движениях жидкостей (с подобной аргументацией мы встретимся позднее у Декарта). Более того, Аристотель полагал, что понятие пустоты приводит к абсурдным выводам: чем меньше сопротивление среды, тем больше скорость движущегося тела, следовательно, в пустоте, где сопротивление равно нулю, скорость должна стать бесконечной, что в случае механического движения (перемещения), по Аристотелю, невозможно (для того, что он называл качественным изменением, такие мгновенные перемены он считал допустимыми; например свет, являющийся качеством прозрачной среды,

может, по его мнению, сразу заполнить любое пространство). К подобным же несообразным выводам приводит, по взгляду Аристотеля, утверждение, что мир бесконечен в пространстве: тело бесконечно большого веса (массы) невозможно, ему нельзя приписать никакого движения, в частности вращательного (а это движение для Аристотеля было неоспоримым фактом, вытекающим из движения «сферы неподвижных звезд»). Таким образом, логические трудности, заключенные в понятии бесконечно большого, служили Аристотелю тем орудием, при помощи которого он доказывал и невозможность пустоты, и невозможность бесконечности Вселенной в пространстве.

Отвергая существование пустого пространства, отличного от материального тела, Аристотель, определял место («топос») как «границу объемлющего тела», а не как тот объем, который занимает само «объемлемое тело». Перемена места предполагает, следовательно, наличие по меньшей мере двух тел. Не довольствуясь, однако, этим определением, которое могло бы привести к признанию полной относительности всякого движения, Аристотель дополнил его другим: место не просто «сосуд», по отношению к которому происходит движение, а *неподвижный* сосуд. Если, например, мы рассматриваем корабль на реке, то его «место» в первом значении меняется непрерывно — даже тогда, когда корабль стоит на якоре — поскольку он непрерывно оказывается в соприкосновении с разной «объемлющей» его водой; но в отношении реки *как целого* положение корабля не меняется. В результате Аристотель приходит к выводу, что «место» является не только и не столько границей *непосредственно* примыкающего тела, сколько границей всеобъемлющей мировой сферы: ею и центром этой сферы определяется то, что можно было бы назвать абсолютным положением тела.

Но дальше, говоря о вращении мировой сферы, Аристотелю уже невозможно было свести концы с концами и сохранить тезис, согласно которому перемена места определяется по отношению к «объемлющему» телу, ведь за пределами мировой сферы, по Аристотелю, нет ничего. Отступив от прежнего своего определения, он поэтому в данном случае утверждал, что движение мировой сферы следует рассматривать по отношению к неподвижному телу, находящемуся в *центре* (т. е. по отношению к Земле). Нужно подчеркнуть: именно *телу*, а не математической точке. Аристотель и в данном случае не считал возможным отказаться от своего принципа, согласно которому движение есть перемена положения одного тела относительно другого. Геоцентризм Аристотеля был, следовательно, теснейшим образом связан с общими положениями его физики. Лишь в дальнейшем, в системах Гиппарха (160—125)

и Птолемея (70—147 гг. н. э.), также разделявших геоцентрическую точку зрения, была допущена возможность движения небесных тел вокруг воображаемых точек (абсолютного) пространства: чтобы объяснить видимое движение планет, Гиппарх ввел предположение об эксцентрических кругах, центры которых не совпадают с центром Земли, а Птолемей дополнил это предположение гипотезой эпициклов — круговых движений вокруг точки, в свою очередь перемещающейся благодаря движению по эксцентрическому кругу или по так называемому деференту (т. е. по кругу, «переносящему», или перемещающему эпицикл).

Не лишено противоречий и аристотелево понятие времени, которое он определял как «меру» и «число» движения: без движения тел нет и времени. Но точно так же, как понятие относительности перемещения дополнялось представлением об абсолютных координатах мировой сферы, только что приведенное определение дополнялось указанием, что «мерой по преимуществу» является равномерное круговое движение мировой сферы. Стремясь избежать вывода о множественности времен, подсказываемого исходным определением, Аристотель колебался в самой расшифровке своего определения. Он различал числа именованные («счисляемые») и числа отвлеченные («счисляющие»): десяток овец не то же, что десяток собак, хотя «счисляющее» их число (отвлеченное) и тождественно. Начав с определения времени как числа «счисляемого» (т. е. движения), Аристотель кончал временем как числом «счисляющим», т. е. отвлеченным, а отсюда делал дальнейший неправомерный вывод: счисляющее предполагает то, что способно счислять, т. е. «душу и разум», а следовательно, «без души не может существовать и время». Эти колебания Аристотеля сказались на позднейших средневековых теориях времени, в которых одни авторы подчеркивали материалистические, а другие, наоборот, раздували идеалистические элементы его учения.

Воззрения Аристотеля на пространство были тесно связаны с учением об элементах (стихиях) и их движении. Ставшие традиционными четыре стихии (земля, вода, воздух, огонь) Аристотель мыслил объемлющими одна другую и делил их на две группы: первые две «естественным образом» движутся к центру мира («вниз»), остальные две — к его периферии («вверх»), притом тем быстрее, чем более они приближаются к своему «естественному месту». Первые две стихии Аристотель называл тяжелыми, вторые две — легкими. Не следует, однако, понимать это противопоставление в абсолютном смысле, поскольку, во-первых, стихии способны переходить одна в другую, т. е. из «тяжелых» становиться «легкими», а во-вторых, «тяжесть» и «легкость» меняются, по Аристотелю, в зависимости от той среды, в ко-

торой тела находятся: ниже расположенная стихия, перемещаясь в более высокую и более легкую, приобретает «тяжесть» (например, воздух, окруженный огнем); наоборот, выше расположенная стихия, перемещаясь вниз (например, вода в землю), приобретает «легкость» и всплывает вверх. Не имея под собой ниже расположенной стихии, земля не может иметь «легкости», а огонь за отсутствием более высокой стихии — «тяжести». Относительность понятия «веса» и «тяжести» у Аристотеля явствует хотя бы из такого указания, что 100 фунтов дерева «тяжелее» 1 фунта свинца в воздухе и легче в воде (поскольку дерево всплывает). Возможно, что и утверждение о различной скорости падения тел различного «веса» следует понимать в контексте изложенных идей, тем более что согласно собственному указанию Аристотеля все тела должны были бы в пустоте падать с равной скоростью (от применения этого правильного тезиса в физике Аристотель отказался, считая пустоту физической бессмыслицей, и воспользовался им только как средством «довести до абсурда» взгляд защитников пустоты).

Представления об ограниченности Вселенной и о распределении четырех стихий в ее пределах приводили Аристотеля к выводу, что всякое движение по прямой вверх или вниз (от центра или к центру) имеет конец и заканчивается в «естественном месте» каждого элемента. Движение же Вселенной Аристотель считал вечным, не имеющим ни конца, ни начала. Это приводило его к убеждению, что должен существовать пятый элемент, эфир, для которого круговое движение является «естественным», т. е. не имеет причин для своего прекращения; отсюда Аристотель делал вывод о неуничтожимости и неизменности самого эфира, или «небесной материи», неспособной превращаться в другие, «земные» элементы.

Уже из изложенного можно усмотреть слабые и сильные стороны физики Аристотеля. Восставая против гипостазирования абстракций, против отрыва пространства и времени от движущихся материальных тел, Аристотель вместе с тем отказывался от всякого абстрактного рассмотрения простейших случаев, от которых можно было бы далее идти обратно к конкретному, к случаям более сложным. Так поступил позднее Галилей, начав с анализа законов падения тел в пустоте и вводя затем лишь необходимые поправки. Правильно определяя происхождение математических истин (геометрия, по взгляду Аристотеля, изучает в абстракции определенные свойства и соотношения физических тел), он тем не менее довольно скромно использовал математический аппарат в естествознании.

Идеализм Аристотеля наиболее сильно сказался в его учении о перводвигателе, источнике движения в мире, и в его

общебиологических воззрениях (понятие целесообразно действующей нематериальной силы — «энтелехии»). Эти стороны аристотелизма были впоследствии подняты на щит средневековой схоластикой, тогда как положительно материалистические черты оказались забытыми и искусственновытравленными (в частности, учение о несотворенности и вечности мира). Вот почему зарождение естествознания в XV в. проходило под знаком борьбы с догматизированным (схоластическим) аристотелизмом, что не помешало сохранению рационального зерна подлинного аристотелизма в преобразованном и развитом виде.

Нужно подчеркнуть еще одну особенность физики Аристотеля, не понятую и вытравленную его схоластическими толкователями. Пользуясь такими понятиями, как «сущность», «форма» и т. п., Аристотель видел в них лишь «феноменологические», качественные характеристики явления, а не средства причинного объяснения: у схоластов же эти «сущности», «формы» приобрели характер потусторонних реальностей, вызывающих и обусловливающих явление. Так, например, говоря, что химическое сочетание двух веществ имеет «форму», которая отлична от «формы» его компонентов, Аристотель лишь *констатировал*, что химическое соединение приобретает качества, отличные от качеств его компонентов, а отнюдь не объяснял эти новые качества привнесением тех таинственных «субстанциальных форм», против которых так энергично ратовал впоследствии Бойль.

Временем завоеваний Александра Македонского (336—323 гг.) начался новый период истории Греции, носящий название периода *эллинизма*. Концом его принято считать 30 г. до н. э., когда Египет был превращен в римскую провинцию (ранее, во II в. Римом уже были покорены Македония, Греция и часть Малой Азии).

В период эллинизма значительно расширились торговые сношения Греции с Передним Востоком, усилился обмен культурными ценностями между Западом и Востоком. В классический период центрами ремесла и торговли были города материковой Греции. Теперь ими стали новопостроенные города на окраинах эллинистического мира—Александрия, Антиохия и др. В центре пересечения новых путей оказался теперь остров Родос. Неслучайно при построении карты (еще лишенной сетки географических координат) Эратосфен воспользовался двумя вспомогательными линиями, проходящими через эти новые центры: линия с запада на восток была проведена через Родос, линия с севера на юг — через Александрию. Уроженцем Родоса были стоик Панэтий (180—110/109), а другой стоик, Посидоний (ок. 135—50) основал на Родосе школу, в которой училась римская молодежь.

Научным центром Александрии был Музей (в дословном переводе «Обитель муз») с крупнейшей библиотекой. При Музее жили, получая вознаграждение от государства, выдающиеся ученые. Из них достаточно назвать Евклида (время деятельности: 323—285 гг. до н. э.) и Эратосфена (273—192 гг. до н. э.).

При дворе сиракузского тирана Гиерона в Сицилии протекала деятельность величайшего математика и механика древности Архимеда (285 — 212).

Архимеду древние авторы приписывали изобретение (правильнее сказать, усовершенствование) так называемой «улитки»— водяного винта, служившего для поливки полей в Египте. Из античных источников известно о сконструированной Архимедом небесной сфере, при помощи которой можно было демонстрировать фазы Луны, движения планет, солнечные и лунные затмения; предполагают, что они приводились в движение посредством водяного двигателя. Рассказывают также, что при помощи механических приспособлений Архимед без труда передвигал по суше тяжело нагруженный корабль сиракузского тирана Гиерона (свидетельства древних расходятся относительно того, каковы были эти приспособления: одни говорят о рычаге, другие — о полиспасте, третьи — о зубчатых колесах, четвертые — о винте, т. е. указывают почти все так называемые «простые машины»). Во время осады Сиракуз римлянами, по рассказу Плутарха, жители города применяли для обороны военные машины, сооруженные Архимедом: орудия, метавшие снаряды на любое расстояние, поворотные краны («клювы»), которые низвергали огромные камни на вражеские корабли; привязанные к цепям железные лапы, которые захватывали нос корабля и ставили его вертикально на корму, и т. д. Сравнительно поздняя легенда, впервые приводимая у Лукиана и Галена (II в. н. э.), сообщает, что Архимед сжег римский флот при помощи зажигательных зеркал[26]. К трудам Архимеда мы вернемся и рассмотрим их подробнее в разделах, посвященных механике и оптике.

Важным научным центром в эллинистический период стало Пергамское царство (в Малой Азии), соперничавшее в III в. до н. э. с Александрией. Аттал I, который царствовал с 241 по 197 г. до н. э., собрал при своем дворе крупных ученых и философов. Здесь образовалась математическая школа, выдающимися представителями которой были Евдем Родосский (время расцвета деятельности: около 320 г. до н. э.) и Аполлоний из Перги (род. ок. 262 г., год смерти неизвестен), автор классичес-

[26] Принципиальная невозможность этого показана в книге: Г. Г. Слюсарев. О возможном и невозможном в оптике. Изд-во АН СССР, 1944.

кого труда о конических сечениях, проживший значительную часть своей жизни в Александрии, а затем, видимо, переселившийся в Пергам.

Одной из характерных черт эллинистической эпохи было появление первых трудов по истории науки. Уже Аристотель в своих сочинениях давал историко-критические обзоры учений своих предшественников, начиная с Фалеса. Его ученик, только что упомянутый Евдем, написал труды по истории арифметики, геометрии и астрономии. Другой ученик Аристотеля и друг Евдема, Феофраст написал специальную историю физики (в широком, античном значении этого слова). Все это показывает, что появилась потребность подвести итоги накопленным знаниям и дать критическое освещение трудам предшественников. Как мы видим, особенной любовью история науки пользовалась среди перипатетиков.

Крупным ученым-естествоиспытателем был ученик Феофраста Стратон (340—269), ставший после смерти своего наставника руководителем афинской школы аристотеликов. Приглашенный в Александрию на рубеже IV и III вв. в качестве воспитателя Птолемея Филадельфа, он провел в этом городе несколько лет, что позволило ему вступить в личное общение с такими учеными, как Евклид, Герофил и др. Главное его внимание было устремлено на естественнонаучные дисциплины, хотя сохранились упоминания и о написанных им сочинениях по логике и этике. За то, что Стратон проявлял интерес преимущественно к естествознанию, он получил прозвание «физика».

В перипатетические теории Стратон внес существенные изменения под явным воздействием атомизма Демокрита. Прежде всего он отверг аристотелевское противопоставление тел тяжелых и легких: все тела обладают тяжестью, и можно говорить лишь о телах более легких сравнительно с другими. Он отверг также аристотелевское противопоставление естественных и насильственных движений, свойственных определенным элементам (стихиям). Соответственно отпала и необходимость в особом элементе — эфире, для которого, по Аристотелю, естественным является вечное круговое движение.

Стратон подверг, наконец, пересмотру и аристотелевское учение о времени: во-первых, время есть нечто непрерывное, а поэтому не может быть «числом движения», как думал Аристотель; во-вторых, время само по себе не быстро и не медленно — быстрое и медленное мы оцениваем, принимая в расчет *результаты* действия. Поэтому Стратон определял время как «количественную сторону действия»: если «количество действия» незначительно, а результат велик, мы называем действие быстрым; если, наоборот, оно значительно, а результат невелик, то действие медленно. Поскольку время есть «количествен-

ная сторона действия», правильнее было бы говорить, что время существует в вещах, а не вещи во времени. Выражение «вещи существуют во времени» употребляется в таком же несобственном значении, как выражения: «город находится в смятении» или «человек в страхе», поскольку в действительности смятение — в городе и страх — в человеке.

Любопытны замечания Стратона об ускорении тел, падающих под действием тяжести. Струя воды, стекающей из желоба, разрывается на капли, приближаясь к Земле. По Стратону, это указывает, что вода движется с возрастающей скоростью. На то же указывают звуки и удар падающего камня: они незначительны при незначительной высоте и усиливаются при возрастании высоты. Причиной этого, утверждал Стратон, может быть в данном случае лишь возрастание скорости, ибо и вес, и объем движущегося тела, и все прочие условия падения остаются прежними как в начале, так и в конце.

По свидетельству Цицерона, Стратон «отказывался прибегать к услугам богов для создания мира» и учил, что «все существующее создано природой». Любая вещь «возникает или возникла благодаря естественным тяжестям и движениям».

Вместе с Аристотелем Стратон отрицал существование пустоты, признававшееся древними атомистами. По его словам, она «только путем рассуждения усматривается как нечто существующее само по себе», т. е. существует лишь в абстракции. Вместе с тем он признавал, однако, наличие мельчайших пор в телах, полагая, что иначе было бы необъяснимым проникновение света, теплоты и иных «телесных сил» внутрь тел.

Учеником Стратона был Аристарх Самосский (время расцвета научной деятельности—280-е гг. до н. э.), сторонник гелиоцентрической системы, полагавший, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца.

Из новых больших школ, сформировавшихся в эпоху эллинизма, должны быть названы эпикурейская, стоическая и скептическая.

Основоположник первой из них, Эпикур (341—270) развил и продолжил идеи материалистического атомизма Демокрита. Школа его находилась в Афинах, в ставших знаменитыми садах. В отличие от Демокрита, главный интерес Эпикура был направлен на вопросы человеческого поведения; физика, естествознание в целом для Эпикура были лишь средством к достижению рационального мировоззрения, свободного от страхов перед всем сверхъестественным, к «невозмутимому спокойствию духа». Этой отличительной особенностью обусловлено и то важнейшее изменение, которое Эпикур внес в демокритовскую атомистику: он не мог удовлетвориться идеей сплошной механической детерминированности явлений, вызывавшей бла-

говейный восторг Демокрита, и ввел представление о спонтанном отклонении атомов от прямолинейного движения, обусловленного необходимостью, в параллель учению о свободе воли, развивавшемуся им в этике. Защищая идею свободы воли, Эпикур утверждал, что следовать мифу о богах даже лучше, чем быть «рабом судьбы физиков», так как «миф дает намек на надежду умилостивления богов посредством почитания их, а судьба заключает в себе неумолимую необходимость»[27].

В соответствии с общей направленностью своего мировоззрения Эпикур считал возможным придерживаться нескольких объяснений одного и того же физического явления: обладая одинаковым правдоподобием и вероятностью, несколько объяснений лишь лучше способствуют жизни без тревог и потрясений, тогда как тот, кто сохраняет из нескольких объяснений, в одинаковой мере согласных с явлениями, лишь какое-нибудь одно, «оставляет область всякого научного исследования природы и спускается в область мифов»[28]. Примером такого множественного истолкования могут служить у самого Эпикура объяснения метеорологических явлений — облаков, молний, грома, которые, по его словам, могут возникать разными способами; перечисляя эти способы, Эпикур нередко эклектически сочетал объяснения, предложенные его предшественниками.

По Демокриту, атомы различаются друг от друга величиной, формой и положением. Последнюю характеристику Эпикур заменил тяжестью. Как и Демокрит, он признавал наряду с атомами существование пустоты, без которой, по его взглядам, движение тел невозможно. Вместо «вихря» Демокрита (см. выше, стр. 33) Эпикур исходил из казавшегося ему более естественным первоначального движения атомов сверху вниз — «ливня атомов», наделенных тяжестью. В результате самопроизвольного отклонения атомов от прямой возникли столкновения и вихреобразные движения атомов, их скопления в тела и в миры. Число миров во вселенной бесконечно: образуясь из скопления материи, они снова распадаются, одни быстрее, другие медленнее.

Своеобразно было и учение Эпикура о движении: он мыслил и пространство, и время дискретными; в мельчайшую неделимую единицу времени атом может проходить только мельчайшую неделимую единицу пути. Отсюда вытекает *исотахия* (равноскоростность) движений: ведь если допустить, что атомы обладают разной скоростью, то более быстрый атом будет проходить неделимую единицу пути в часть «атома времени», а

[27] Письмо к Менекею, 134; русск. пер. С. И. Соболевского в книге: Лукреций. О природе вещей, т. II. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 599.
[28] Письмо к Пифоклу, 87; русск. пер. там же, т. II, стр. 567.

менее быстрый атом должен проходить за неделимую единицу времени часть неделимой единицы пути; ни то, ни другое невозможно, ибо относительно мельчайших единиц пути и времени было допущено, что они неделимы.

Чем же объясняется тогда разница в скоростях воспринимаемых, так сказать, макроскопических движений? Ведь несомненно, что конь движется быстрее черепахи. По Эпикуру, эта разница объясняется различным сочетанием атомов и различным распределением *кинем* (неделимых движений) в общем составе сложного тела. Лукреций пояснил мысль своего предшественника ссылкой на стадо движущихся овец, которое издали кажется «белым пятном неподвижным на склоне зеленом»[29]. Иначе говоря, не меняя скорости своих движений, атомы, всегда подчиненные закону исотахии, способны менять ту конфигурацию, в которой скопление их предстает перед чувственным ощущением.

Название другой значительной школы, возникшей в эпоху эллинизма, стоической, происходит от «Пестрого портика» (*Стоа пойкиле*) в Афинах, где происходили их беседы. Наиболее видными представителями так называемой «древней» стои были основатель школы Зенон (ок. 340—265), его ученик Клеанф [331 (330) — ок 232] и Хрисипп (280—206).

В отличие от стоиков позднейшего, римского времени, уделявших в своих сочинениях основное внимание этике, представители «древней» и «средней» стои (к которой принадлежали упомянутые выше Панэтий и Посидоний) проявляли значительный интерес к физике. Всю философию они делили на три больших отдела: логику, физику и этику. Порядок этих дисциплин определялся ими различно. Одни (Зенон) начинали с логики, другие ставили на первое место этику, наконец, третьи (Панэтий и Посидоний) выделяли в качестве первой науки физику.

Большинство стоиков мыслили Вселенную как единое разумное и живое существо. Все ее части связаны друг с другом как части единого организма. В мире нет пустоты, но пустое пространство существует за его пределами. Мир преходящ, ибо в нем все вещи превращаются друг в друга. Представление о «мировом пожаре», которым завершается один цикл мироздания и начинается новый, напоминает мысли Гераклита о мировом огне, периодически вспыхивающем и погасающем.

Мир как разумное одушевленное целое есть верховное божество (пантеизм стоиков). Все в мире подчинено закону финальности; в этом пункте стоики были ожесточенными противниками эпикурейцев, отвергавших телеологическую точку

[29] Лукреций. О природе вещей, кн. II, стих 322. Здесь и дальше стихи Лукреция приводятся в переводе Ф. А. Петровского по изданию: Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945.

зрения в естествознании. Связь между вещами мира стоики мыслили наподобие связи, существующей между органами живого существа: подобно тому как раздражение способно передаваться с одной части тела к другой, так и действие одной вещи передается на другую (в области знаний о нервной системе делались только первые шаги).

Своеобразными особенностями физических учений стоиков явились их представления о телесности качеств и природе «смеси», т. е. сочетании тел друг с другом. В основе тех и других представлений лежала мысль о возможности для тел взаимно проникать друг в друга, наподобие взимно сливающихся математических точек, линий, поверхностей. Хрисипп отличал от механической смеси, в которой мелкие частицы лишь соприкасаются своими поверхностями, наподобие двух различных видов зерна, взаимопроникновение составных частей при сохранении их качеств (огонь и железо, вино и вода) и полное слияние, или «всецелое смешение», при котором составные части, проникая одна в другую, вовсе утрачивают свои первоначальные и приобретают новые качества (сложные мази и лекарства). Подкрепление своего взгляда на возможность взаимопроникновения стоики усматривали в том, что бывают случаи, когда компоненты «смеси» дают в итоге объем меньший, чем сумма обоих первоначальных объемов. Прибегать к гипотезе мельчайших пор, принимаемой атомистами, стоики не хотели.

Против взаимопроникновения тел, допускавшегося стоиками, противники выдвигали возражения, связанные с понятием бесконечности: если капля вина, сохраняя свое бытие, может взаимопропикаться «нацело» с бесконечным океаном, не получится ли, что в капле вина столько же частей, сколько в океане, что между частями того и другого можно установить однозначное соответствие! Ответ стоиков гласил: всякое тело до бесконечности делимо на все новые и новые части, поэтому нельзя сказать, что оно состоит из *конечного* числа частей (ибо деление может быть всегда продолжено дальше), но нельзя сказать, что оно состоит и из *бесконечного* числа их (ибо процесс деления не может завершиться); в любой, сколь угодно малой части сложного тела присутствуют составляющие его элементы.

По той же схеме мыслили стоики соотношение между телом и его качествами: качества телесны (протяженны) и проницают тело.

Все эти воззрения стоиков явились регрессом по сравнению не только со взглядами атомистов, но и взглядами Аристотеля. Однако именно они завоевали господство позднее, и влияние физических воззрений стоиков можно проследить как в позднеантичную, так и раннесредневековую эпоху (алхимия).

Третьим большим направлением философской мысли в пе-

риод эллинизма стал скептицизм. Одна линия его развития идет от Пиррона (365—275); другая связана с платоновской академией. Для истории физики наибольший интерес представляет та форма, которую греческий скептицизм принял позднее, в первые века нашей эры, получив распространение в среде врачей-естествоиспытателей. К числу их принадлежал Секст Эмпирик.

Напомним сначала, что в эпоху эллинизма сложились две крупные медицинские школы: *догматиков* (начало ее восходит к IV в. до н. э.) и *эмпириков* (II в. до н. э.). Догматики требовали причинного объяснения явлений, основанного на «догмах» определенной теоретической концепции; эмпирики же стремились ограничить себя непосредственными данными опыта. Так, например, лихорадку догматики определяли как состояние, обусловленное переходом крови из вен в артерии, а эмпирики — как состояние, характеризуемое ускорением пульса, возрастанием жара, появлением жажды. «Эмпирию», т. е. опыт в широком значении слова, представители этого второго направления подразделяли на три вида (так называемый «треножник эмпириков»): 1) наблюдение, сделанное случайно или сознательно, 2) история, т. е. наблюдение, сделанное в прошлом и усвояемое либо без проверки, либо критически, и 3) сопоставление наблюдений, т. е. истолкование нового и ранее неизвестного на основе уже известного. В последнем случае эмпирики различали более глубокий «аналогизм» от «эпилогизма», основанного на сопоставлении лишь внешних сходных черт.

Несмотря на предвзятость некоторых своих объяснений, представители догматической школы много сделали для развития естествознания: в III в. до н. э. значительных успехов достигла анатомия в трудах Герофила и физиология в трудах Эрасистрата (деятельность обоих протекала в Александрии). Герофил производил вскрытия человеческих трупов, Эрасистрат — эксперименты над животными. При объяснении явлений кровообращения и дыхания он руководствовался принципами физики и в частности, стратоновскими идеями. Трудами этих ученых были расширены знания о нервной системе и органах чувств. Укажем, в частности, что с именем Эрасистрета связывается применение весов для экспериментальных наблюдений: по нескольку раз взвешивая голодающую птицу вместе с ее экскрементами, Эрасистрат пытался определить потерю в весе, обусловленную невидимыми «испарениями».

Методике опытного наблюдения и критической оценке опытных данных естественно должно были уделять особое внимание эмпирики. В этом их значение не только для медицины, но и для всего естествознания в целом и, в частности, для физи-

ки. Нельзя забывать, что в античную эпоху при почти полном отсутствии приборов роль основного средства наблюдения играли сами органы чувств: глаз и ухо были основными инструментами, а потому у физика, как и у медика, естественно должен был возникать вопрос о достоверности и точности показаний этих инструментов. Физиология органов чувств теснейшим образом смыкалась с физикой; из нее черпался материал, позволяющий критически оценивать опытные данные. Вот почему астрономы (Птолемей и др.) разрабатывали физические вопросы, связанные с происхождением зрительных иллюзий, что позволяло корректировать данные астрономических наблюдений; физики из-за отсутствия термометров должны были с особенным вниманием относиться к изучению субъективных и объективных моментов теплового ощущения и т. д.

В сочинениях представителя эмпирической школы Секста, прозванного Эмпириком (жил около 200 г. н. э.), была сделана попытка свести основные результаты исследований в области физиологии органов чувств и подвергнуть их критическому рассмотрению. Сам Секст сделал из своей сводки скептические выводы. Следуя своим предшественникам (Энесидему и Агриппе), он перечислил основные мотивы, заставляющие философа «воздерживаться» от категорических суждений о природе действительно-сущего. Но независимо от этих выводов, примеры, систематизированные Секстом, дают общую картину тех наблюдений над условиями восприятия и функциями органов чувств, которые были получены к его времени. Здесь можно найти указания, как влияет на восприятие строение органа, болезненное состояние организма, приводятся примеры, иллюстрирующие зависимость воспринимаемой формы предметов от расстояния (четырехугольные башни, кажущиеся издали круглыми), влияние освещения и промежуточной среды на окраску предметов, зависимость этой окраски от состояния тела (рог и серебро, превращенные в опилки, приобретают другой цвет) и т. п. Немаловажно и то, что скептические аргументы эмпириков расшатывали догматическую уверенность в некоторых произвольных и недоказанных положениях античной физики. Так, например, Секст, вслед за Агриппой, указывал на логический круг, заключающийся в доказательстве существования пор ссылкой на материальные истечения из предметов (свет и т. д.) при одновременном объяснении истечений ссылкой на наличие подобных пор.

Дошедшие до нас памятники научной литературы Рима немногочисленны и не дают возможности проследить развитие науки в Риме по этапам. Видное место в научной литературе римлян принадлежало произведениям, связанным с прикладными дисциплинами: землемерием, строительной техникой,

гидротехникой, военным делом. К последним десятилетиям I в. до н. э. относится сочинение римского инженера Витрувия «Об архитектуре» в десяти книгах, охватившее наряду со строительной техникой и зодчеством правила сооружения военных машин и солнечных часов. Описанию римских водопроводов посвящено сочинение инженера Секста Юлия Фронтина (40—103 гг. н. э.), написанное в 98 г. после назначения автора на должность наблюдающего за всеми акведуками Рима.

Характерной для римской научной литературы стала форма энциклопедии, излагающей научные вопросы в литературно-популяризирующей форме. Не дошедшая до нас энциклопедия Марка Теренция Варрона (116—27 гг. до н. э.) в девяти книгах охватывала грамматику, логику, риторику, геометрию, арифметику, астрономию, теорию музыки, медицину и архитектуру. От аналогичной энциклопедии Авла Корнелия Цельса (I в. н. э.) дошли лишь книги, посвященные медицине. Энциклопедический характер имеет и «Естественная история» Плиния Старшего (23—79 гг. н. э.) в 37 книгах. Первая (добавленная после смерти автора) является обзором содержания и источников; далее следуют астрономия и космография, зоология, ботаника, сведения о медикаментах растительного и животного происхождения, данные о металлах. Последние книги посвящены минералогии. В связи с минералогией изложена вся история живописи (краски) и скульптуры (камни). В этих же книгах немало интересных сведений по истории строительной техники. Плиний использовал большое количество сочинений, до нас не дошедших (в общей сложности он ссылается на 327 греческих и 146 римских авторов). Отдельные физические сведения разбросаны почти по всем книгам. Его «Естественная история» усиленно читалась не только в древности, но и в средние века, когда она была использована при составлении популярных энциклопедий. Образ ее автора, поплывшего слишком близко к Везувию во время знаменитого извержения 79 г. (когда погибли Геркуланум и Помпеи) и павшего жертвой ученой пытливости, сделался на столетия символом научного героизма.

Луций Анней Сенека (4 г. до н. э.—65 г. н. э.) в своих «Естественнонаучных вопросах» облек в литературно-риторическую форму физические учения стоиков: научные сведения перемежаются здесь с морализующими отступлениями. Многие отрывки представляют интерес для истории физики, метеорологии, геологии, географии и астрономии, в особенности потому, что первоисточники Сенеки до нас не дошли.

К позднему периоду римской империи относятся сочинения Марциана Капеллы (конец III—начало V в. н. э., точное время не установлено) и Макробия (начало V в.); они имеют пестрый

энциклопедический характер. Наряду с произведениями и переводами Боэция (480—524) они были теми передаточными звеньями, благодаря которым остатки античной учености перешли в раннее средневековье.

Крупнейшим поэтом-философом Рима был Лукреций (около 96—55 гг. до н. э.). В поэме «О природе вещей», состоящей из шести книг, он сумел изложить отвлеченные «непоэтические» вопросы о строении материи, о свойствах атомов так, что его произведение до сих пор является замечательным образцом дидактической поэмы. Так например, вечное движение атомов Лукреций, обращаясь к воображению читателя и пользуясь наглядным образом пылинок, пляшущих в солнечных лучах, изобразил в следующих строках:

Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света;
Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах,
В схватки бросаются вдруг по отрядам, не зная покоя,
Или сходясь, или врозь беспрерывно опять разлетаясь.
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно
Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся [30].

Избавить человека от страха смерти, от суеверных страхов религии — вот цель поэмы Лукреция. Человек избавляется от них, познавая законы природы. Именно с этой целью Лукреций говорил о строении материи, о материальной природе души, о возникновении мира, человеческого общества, языка, культуры, религии.

Значит, изгнать этот страх из души и потемки рассеять
Должны не солнца лучи и не света сиянье дневного,
Но природа сама своим видом и внутренним строем [31].

Мы помним, что такие же задачи ставил перед естествознанием Эпикур. Лукреций посвятил ему восторженные строки в начале III и V книг поэмы. Но даже повторяя Эпикура, Лукреций дал неповторяемое изложение его философии. В поэме «О природе вещей» содержится множество попыток объяснить самые различные физические явления; эти попытки мы рассмотрим дальше, во второй части настоящего раздела, посвященной отдельным отраслям физики.

Вернувшись к учению об однородности Вселенной, разделявшемуся ионийскими учеными, Анаксагором и греческими ато-

[30] Лукреций. О природе вещей, т. I, кн. II, 114—122. Изд-во АН СССР, 1945.
[31] Там же, кн. I, 146—148.

мистами, Лукреций отверг дуалистическое противопоставление небесных и земных тел, получившее развитие у пифагорейцев, Платона и Аристотеля. Вселенная — изменчива. Лукреций обещает сообщить много разумных вещей, чтобы

> Не счел ты, уздою религии стянутый, будто
> Солнце, Земля и Луна, и звезды, и море, и небо
> Вечно остаться должны, обладая божественным телом [32].

В Риме сформировалась крупная медицинская школа античности — «методиков». Ее представителями были Асклепиад Вифинский (I в. до н. э.) и Целий Аврелиан (V в. н. э.). Для историка физики эта школа интересна потому, что «методики» усвоили атомистические представления, согласно которым тела состоят из бескачественных корпускул, распадающихся при взаимном столкновении на бесчисленные осколки различной величины и формы. Сочетание таких частиц в различном числе и порядке обусловливает разнообразие чувственно-воспринимаемых вещей. Разница «в проходах», или порах, обусловливает движение «соков» в организме, сохраняя здоровье или, наоборот, причиняя болезнь. Через посредство Целия Аврелиана в средневековой Европе продолжали сохраняться отголоски античного атомизма. Сочинение этого медика не было забыто даже в глухую пору раннего средневековья. Приближенный готского короля Теодориха Магн Аврелий Кассиодор (468—562) рекомендовал его чтение наряду с книгами других античных медиков и позаботился об изготовлении его списка для библиотеки монастыря Вивариум в Калабрии.

Наиболее поздним крупным философским направлением в античное время был неоплатонизм. Уже у его основоположника Плотина (205—270) резко усилились созерцательно-мистические элементы платонизма, возвращавшие философию к представлениям первобытного анимизма. В последующий период (в частности, например, у Ямвлиха, ум. около 330 г. н. э.) значительное преобладание получили вера в магию, астрологию, прорицания. Центральной в учении Плотина о природе явилась идея всеобщего одушевления. Одушевлена даже земля, о чем, по мнению Плотина, свидетельствует рост камней в ее недрах; она, как благая богиня, способна слышать человеческие мольбы. Одушевлены светила; вечное круговое движение неба основано на вечной деятельности «мировой души». Взаимодействие между различными частями Вселенной уподобляется, как у стоиков, взаимодействию различных частей единого живого организма: мир — единое живое существо, между частями которого

---

[32] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. V, 113—116.

принципиально возможно «дальнодействие» (см. ниже, стр. 62, о плотиновской теории света и зрения). В этом аспекте неоплатоники переработали отдельные элементы аристотелевской и стоической физики. Если Аристотель рассматривал время как «меру движения», т. е. не отрывал его от движения материальных вещей, то Плотин, наоборот, попытался возродить платоновское представление о «чистом времени», а движение мировой сферы рассматривал как «меру» этого нематериального психического потока, протекающего в недрах «мировой души». Точно так же и позднейшие неоплатоники (Симпликий, Дамаский) оторвали и пространство от материальных тел, превратив его в некую неподвижную полуматериальную среду наряду с телами.

Бесплодный в научном отношении, типичный для упадка античной культуры, неоплатонизм, как и стоицизм, *исторически* оказал большое влияние на последующее развитие средневековой науки на Западе и на Востоке: обширные комментарии Прокла (410—485), Симпликия (ум. в 549 г.) и других к математическим и физическим сочинениям Евклида, Аристотеля и других античных авторов, с одной стороны, обогатили средневековых ученых сведениями о классическом наследии древности, но, с другой стороны, явились причиной того, что аристотелизм усваивался не столько в своем подлинном виде, сколько в неоплатоническом обличии, и это в немалой мере способствовало его схоластизации, потере живых связей с конкретным физическим знанием. Отголоски неоплатонических учений можно проследить вплоть до XVII—XVIII вв.— они слышатся и у Ньютона в теории абсолютного пространства, и у ньютонианцев в учении о «действии на расстоянии» (посредствующим историческим звеном в данном случае явилась кембриджская школа платоников).

Перейдем теперь к обзору состояния отдельных отраслей физики в античный период.

Механика. В условиях рабовладельческого строя мускульная сила человека оставалась основным источником энергии, а орудия неизбежно должны были быть примитивными, так как в руки раба нельзя было давать инструменты более сложные, легко подвергающиеся порче. Раб, ненавидевший подневольную работу и стремившийся показать, что он — человек, с особым удовольствием подвергал порче орудия труда, а потому рабовладельцы были вынуждены «применять только наиболее грубые, наиболее неуклюжие орудия труда, которые как раз вследствие своей грубости и неуклюжести труднее подвергаются порче» [33]. Примером могут служить массивные железные

[33] К. Маркс. Капитал, т. I. Госполитиздат, 1953, стр. 203.

кирки для горных разработок, кузнечные молоты, прессы для отжимки винограда и т. п.

Ветряной двигатель, описанный Героном, по-видимому, не получил практического применения. На стадии «игрушек» остались приборы Герона, использовавшие силу пара. В судоходстве главную роль играли не паруса, а весла. Водяная мельница, описанная Витрувием, нашла более широкое применение лишь в конце античного периода.

Известное развитие получили передаточные механизмы, либо увеличивавшие эффективность работы, либо изменявшие направление действия силы.

Ряд технических новшеств был связан в эпоху эллинизма с военным делом, а именно — метательной артиллерией. Начало применения ее античные историки связывали с именем сиракузского тирана Дионисия Старшего (IV в. до н. э.). В основе античных метательных машин лежали лук и праща. Усовершенствованием лука-самострела явились так называемые *гастрафеты* (дословно—стреляющие животом), введение которых приписывается Зопиру из Тарента (по всей вероятности, в начале IV в. до н. э.). На принципе пращи было основано устройство военных машин, получивших у римлян название *онагров* (диких ослов); греки пользовались названием *монанкон* (одноплечее). Онагры были снабжены воротом, тетивой и рычагом с пращой, метавшей каменные ядра весом 4 фунта на расстояние 300 *м*. По принципу лука были построены римские баллисты, метавшие камни весом 1 фунт на 300 *м*. Аналогично построенные катапульты метали стрелы, копья, зажженные факелы и т. п. Испытания, произведенные с моделями, показали, что стрелы длиною 88 *см* могли пролетать на 370 *м* и пробивать обитый железом щит толщиною 3 *см*. Дальнейшим усложнением этих приборов явился *полибол* (дословно — многострел). Он описан Филоном Византийским (III в. до н. э.), и изобретение его приписывается Дионисию Александрийскому (в том же веке). Полибол представлял собой катапульту — орудие, в котором натягивание и спуск тетивы, а также вкладывание новых стрел происходили автоматически.

Древними греками был написан ряд технических трактатов о военных машинах, авторы которых перечислены у Витрувия[34], в основном опиравшегося на их сочинения. Часть их дошла до нашего времени.

Общефилософские и теоретические вопросы о пространстве и времени, материи и движении были изложены нами там, где речь шла о воззрениях античных атомистов и Аристотеля (стр. 32, 36 и др.). Здесь мы рассмотрим вкратце сочинение,

[34] Витрувий, VII, вст., 14.

ранее приписывавшееся Аристотелю, но на самом деле ему не принадлежащее. Оно носит заглавие «Механические проблемы» и было написано в начале III в. в эллинистическом Египте; на это указывает, например, упоминание о приводивших в движение одно другое бронзовых или железных колесах в святилищах, действительно находившихся в египетских храмах, как подтверждается другими источниками[35].

Уже самое заглавие указывает, что в сочинении рассматриваются отдельные проблемы механики. Эти проблемы формулируются каждый раз в виде вопроса, на который затем даются ответ и разъяснения. Последовательность довольно случайна,— конкретные случаи перемежаются с более общими положениями. Значительная часть «проблем» или задач заключается в показе, что то или иное явление сводится к закону рычага. Так, это положение иллюстрируется на примере весел (§ 5), корабельного руля (§ 6), мачт (§ 7), парусов (§ 8), пращи (§ 8), щипцов для удаления зубов (§ 22), щипцов для орехов (§ 23), колодезного коромысла (§ 29) и т. д. С той же точки зрения рассмотрены перелом палки о колено (§ 15), изгибание концов тонкого шэста, поднимаемого за середину (§ 17), различные случаи распределения нагрузки, которую производит груз, находящийся на горизонтальном шесте (§ 27, 28, 30). В сочинении рассмотрено также движение колес колесниц и тачек (§ 12), лебэдок (§ 14), римских весов (§ 21). Клин сводится автором к двум рычагам (§ 18).

Общий принцип, лежащий в основе книги, заключается в положении, что «происходящее в рычаге возводится к весам», а «происходящее в весах возводится к кругу» (§ 1). Это следует понимать так: чем дальше точка круга отстоит от его центра, тем быстрее она движэтся при вращении, т. е. тем более длинный путь она проходит за то же время. Точно так же чем дальше отстоит конец рычага от оси вращэния, тем быстрее он движэтся. Поскольку далее скорость движения обратно пропорциональна тяжести тела, постольку отсюда выводится основной закон рычага: для равновесия необходимо, чтобы к точке, движущейся с большэй скоростью, был приложен меньший груз. Таким образом, вывод закона рычага основан на положениях динамики, частным случаем которых является равновесие (статика). В § 24 рассмотрен параллелограмм движений.

Жемчужиной античной литературы по механике являются произведения Архимеда, о биографии которого было сказано выше (стр. 41). Не все произведения его до нас дошли. Так, не сохранились сочинения Архимеда «О рычагах», «О центрах

---

[35] P. Tannery. Sur les problèmes mécaniques attribués à Aristote. Mémoires scientifiques de P. Tannery, t. III. Toulouse — Paris, 1915, p. 33.

тяжести», а также «Книга об опорах». Из дошедших до нас назовем: трактат «О равновесии плоских тел» и «Письмо к Эратосфену о механическом методе решения геометрических задач», или сокращенно «Эфод» (т. е. «Метод»).

Указанный трактат начинается с аксиом, за которыми следуют теоремы. Он содержит вывод закона рычага.

Архимед, в отличие от автора «Механических проблем», не вводит в свое доказательство понятий динамики: статика рассматривается им как дисциплина «автономная». Указанная противоположность, наметившаяся уже в древности, сохранялась и на позднейших стадиях развития механики.

В том же трактате Архимеда рассмотрены вопросы о центрах тяжести параллелограмма, треугольника, трапеции и параболического сегмента. В двух других сочинениях («О квадратуре параболы» и «Письмо к Эратосфену») Архимед определил, что площадь параболического сегмента относится к площади треугольника, имеющего то же основание и высоту, как 4 : 3. Для этого он воспользовался принципом рычага, как бы взвешивая фигуру на весах. Во втором из указанных сочинений Архимед исходил из математико-атомистического представления о линиях как сумме чрезвычайно большого числа точек, о плоскостях и телах как сумме линий и плоскостей.

О не дошедшем до нас сочинении Архимеда «Об опорах» можно судить отчасти по «Механике» Герона, где приведены из него отдельные положения. Здесь рассмотрены вопросы о распределении нагрузки, которую производит балка, лежащая на двух и большем числе колонн, и зависимость этого распределения от того, находятся ли концы балки на весу или покоятся на опорах, а также вопрос о распределении нагрузки между опорами в случае треугольной плиты, подпертой в трех вершинах (как при отсутствии на ней дополнительного груза, так и в случае наличия его в какой-либо произвольно взятой точке).

В сочинении «О плавающих телах» Архимед доказал закон гидростатики, носящий его имя.

К позднеантичной эпохе относится интересное упоминание об ареометре в письме Синезия Киренского (ок. 370—415), сообщающего о бронзовом приборе, который был для него изготовлен и которым он пользовался, по-видимому, во время болезни, для испытания плотности воды. Прибор состоял из цилиндрической трубки, похожей на флейту, с нанесенными на ней делениями; на одном из концов ее плотно приделан конус. При опускании в воду прибор плавает в вертикальном положении, и степень погруженности показывает плотность жидкости.

Ряд сочинений по механике был написан Героном Александрийским. Вопрос о времени, когда жил их автор (так называемый «геронов вопрос»), породил целую литературу; различные

исследователи определяли это время в пределах начиная с III в. до н. э. и кончая II в. н. э. Имеются основания сузить эти пределы до II в. до н. э. — I в. н. э., но не далее; более точная датировка все еще остается неизвестной. Сочинения Герона имеют прикладной характер, а местами — характер технических описаний и рецептов без доказательств. Такова и геронова «Механика», не дошедшая до нас в подлиннике и известная в позднейшем арабском переводе.

«Механика» разделена на три книги. Наиболее систематично изложение во второй, где последовательно рассмотрены простые машины: ворот, рычаг, блок, клин и винт, а далее — системы зубчатых колес блоков и талей, рычагов, равно как и сложные комбинации рычагов, винтов и блоков. Заканчивается, однако, книга ответом на отдельные частные вопросы и определением центра тяжести плоских прямолинейных фигур. Что касается первой книги, то она наиболее беспорядочна: здесь сначала описана лебедка с системой зубчатых колес, далее рассматриваются вопросы о построении зубцов шестерен, которые должны сцепляться с нарезкой винта — червяка; далее — вопросы о подъеме тел, наклонной плоскости, центрах подвеса и центрах тяжести, физическом (тяжелом) и криволинейном рычаге. Третья книга содержит описание подъемных машин, применяемых в строительном деле, и прессов для приготовления вина и масла.

Такой же компилятивный характер носит и позднейший «Математический сборник» Паппа Александрийского (III в. н. э.). Восьмая книга этого сочинения посвящена механике. Прославляя Архимеда, который «выяснил причины и способы действия всех механических явлений», и заявив, что он изложит «все то, что древние исследовали геометрическим путем», Папп рассматривает в своей книге учение о центрах тяжести, далее — наклонную плоскость, нахождение двух средних пропорциональных («делосская задача», позволяющая удваивать объем куба), зубчатые колеса, винтовую нарезку. Систематическое рассмотрение вопроса часто подменяется, как и у Герона, разрешением той или иной специальной задачи. Так, в отношении зубчатых колес определяется диаметр колеса, соединенного с заданным и дающего требующуюся передачу.

Вопросы, связанные с движущей силой воды, ветра и пара, рассмотрены в сочинении Герона «Пневматика». Название этого труда происходит от греческого слова «пневма» (дух, дуновение). Ссылаясь на то, что «пневматика примыкает к искусству делать водяные часы» и является его непосредственным продолжением[36], Герон включил в свой труд и описание

[36] Герон. Пневматика, кн. I, Введение.

приборов, приводимых в движение водой. Как уже отмечалось, описываемые Героном приборы не получили сколько-нибудь широкого технического применения; большинство их осталось «игрушками». Так, в своей «Пневматике» он описал приборы, позволяющие выпускать то холодную, то теплую воду, воду или вино в нужном количестве; фигурки, совершающие возлияния на жертвенник; трубящие фигурки и поющие птички; трубу, звучащую при открытии храмовых дверей; фигурки животных, пьющих воду, и т. д. Особое сочинение посвящено целому «театру автоматов». Герон описывает храмовую кропильницу, из которой вытекает вода при опускании монеты, светильник с автоматическим регулированием притока масла, водяной музыкальный орган.

Герону Александрийскому приписывается изобретение так называемых эолипил. В дословном переводе это название означает «врата Эола», мифического отца ветров; в позднейшей интерпретации Витрувия это «шары Эола» (греческое слово pylai, ворота, заменено римским словом pilae, шары,—своего рода «народная этимология»). «Эолипилы» Герона — железные шары, способные вращаться вокруг горизонтальной оси и снабженные двумя согнутыми под углом трубками. По боковым трубкам поступает пар, выходящий через согнутые трубки; реакция паровой струи приводит шар во вращение. Витрувий в своем описании[37] ограничился указанием на сильное дуновение, получающееся при выходе паров через узкое отверстие, сделанное в медном шаре, и ни о каких согнутых трубках не говорит. Для него это дуновение — простая иллюстрация того, что происходит при возникновении ветров, когда «жар наталкивается на влагу, и натиск этого жара вытесняет множество пара в виде дуновения».

Таким образом, древние уже вплотную подошли к открытию движущей силы пара; однако, по глубоко справедливому замечанию Энгельса, «история имеет свой собственный ход, и сколь бы диалектически этот ход ни совершался в конечном счете, все же диалектике нередко приходится довольно долго дожидаться истории»[38].

Первые опыты и наблюдения над свойствами воздуха относятся уже к классическому периоду истории Греции. В этом отношении интересен текст Эмпедокла, посвященный так называемой клепсидре. В переводе это слово означает «похитительница воды». Термином «клепсидра» обозначались обычно водяные часы; но в данном случае речь идет о сосуде, дно которого изрешечено мелкими отверстиями наподобие сита, а наверху

[37] Витрувий, I, 6, 2.

[38] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 81.

кончается трубкой с отверстием, которое можно зажимать пальцем. Описание подобного прибора имеется и у Герона. Эмпедокл описывает в стихах, как девочка играет такой клепсидрой, сделанной из блестящей меди: когда верхнее отверстие зажато рукой и сосуд погружают в воду, влага в него не проникает, ибо масса воздуха не дает ей доступа; если дать выход воздуху через верхнее отверстие, то «сила воздуха» слабеет. Когда клепсидра наполнена водой и верхнее отверстие закрыто, воздух удерживает снизу воду в сосуде; если отверстие открыть, воздух устремляется сверху на место вытекающей воды[39]. По аналогии с этим явлением Эмпедокл, которого как медика привлекали вопросы преимущественно биологического характера, объяснял приток воздуха при дыхании, когда он якобы становится на место отливающей крови и, наоборот, уходит, когда кровь приливает.

По-видимому, только что описанный опыт с клепсидрой имел в виду и Аристотель, намекая в своей «Физике»[40], что «Анаксагор и другие», стремясь доказать невозможность существования пустоты, доказывали фактически лишь существование воздуха, «закручивая бурдюки и показывая, сколь воздух силен, или же задерживая его в клепсидрах».

Нам остается сказать о первых наблюдениях в области гидродинамики. Внимание к этим вопросам в Римском государстве было несомненно связано со строительством акведуков. По свидетельству Фронтина («Об акведуках города Рима», § 4—5), первым таким сооружением в городе Риме был водопровод Аппия Клавдия, построенный в 312 г. до н. э. Проведение воды было основано у римлян на естественной или искусственно создаваемой разности уровней; водонапорных устройств римляне не применяли.

Из литературных источников известно, что для измерения количества притекающей воды служили свинцовые трубы длиною в 10 футов (2,96 *м*) различного диаметра, носившие названия, производные от числительных: квинарий, деценарий, центенарий и т. д. Витрувий приводит названия, соответствующие числам 5, 8, 10, 15, 20, 30, 50, 80 и 100, указывая вместе с тем вес каждой трубы; Плиний останавливается в своем перечислении на 10. Из текста Витрувия и Плиния явствует, что названия квинарий и т. д. соответствовали числу дюймов, содержащихся в *периметре* трубы (или, иначе, в ширине свинцово-

[39] Мы постарались дать по возможности точный пересказ отрывка в соответствии с греческим оригиналом, так как существующий русский стихотворный перевод Г. И. Якубаниса не передает всех оттенков подлинника (см. Лукреций. О природе вещей, т. II. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 675).

[40] Аристотель. Физика, IV, 6, 212 *b*.

го листа, свертываемого в трубу). В отличие от Витрувия и Плиния, Фронтин толковал термины квинарий и т. д. как указания на число четвертей дюйма, содержащихся в *диаметре* трубы; иначе говоря, квинарий, по Фронтину, соответствовал $^5/_4$ дюйма, сенарий — $^6/_4$ дюйма, септенарий — $^7/_4$ дюйма и т. д.; начиная с виценария (vicesimus — двадцатый), счет велся по квадратным дюймам (так, центенарий соответствовал площади сечения 100 квадратных дюймов и т. п.). Зная плотность свинца, вес, длину и периметр трубы, указываемые Витрувием, можно вычислить толщину стенок, очевидно принимаемую им за постоянную; тогда мы получим около 7 *мм*, что является правдоподобным для труб незначительного диаметра и недостаточным для труб большого диаметра, например центенария, имевшего диаметр 59 *см*, если верить Витрувию [41].

В указанных мерах выражались норма и фактическое количество воды, поступавшей из того или иного водопровода; например, для Аниенского водопровода по Фронтину норма 841 квинарий, фактический расход 1825 и т. д.

При регулировании скорости вытекания воды Фронтин считал нужным обращать внимание на положение медной трубки, называемой calix и помещаемой у канала или водохранилища. «Когда она расположена прямо по горизонтали, она сохраняет надлежащую норму воды; будучи поставлена в направлении потока воды и наклонена книзу, она увлекает большее количество ее; если ее поставить сбоку от потока воды и приподнять вверх, т. е. расположить более удобно для пьющего, вода медленнее поступает, не достигая нормы» («Об акведуках города Рима», § 36). В другом месте (там же, § 113) Фронтин обращал внимание на то, чтобы указанные трубки все «располагались по одной горизонтали, и одна не оказывалась ниже или выше другой», ибо та, которая ниже, увлекает больше воды, а верхняя дает меньше, потому что нижняя увлекает поток воды к себе» [42].

Оптика. Античная оптика, как показывает само название, первоначально была наукой о зрении (*опсис*), исследовавшей не только физические свойства света и цветов, но и свойства человеческого глаза. Она объединяла то, что мы теперь называем геометрической, физической и физиологической оптикой. Формирование античной оптики было тесно связано с практическими запросами астрономии и живописи. Достаточно напомнить о необходимости вводить зрительные поправки при на-

[41] Отсюда Поль Таннери делал вывод, что Витрувий механически распространил эмпирическую формулу за пределы ее возможного применения. См. P. Tannery. Frontin et Vitruve. Revue de philologie, t. XXI, 1897, p. 118—127.

[42] Выдержки из Фронтина приведены по переводу в книге: В. П. Зубов и Ф. А. Петровский. Архитектура античного мира. М., 1940, стр. 97.

блюдении светил, во-первых, и о построении перспективных изображений, носившем у древних авторов название «скенографии», во-вторых. На подобную связь указывает и то, что в античных оптико-геометрических построениях неизменно фигурировала точка глаза наблюдателя.

От античного периода до нас дошли в том или ином виде специальные сочинения по оптике. Из них следует назвать: «Оптику» Евклида (450—380 гг. до н. э.), «Катоптрику» Герона, сохранившуюся на греческом языке в отрывках, а также в латинском переводе XIII в. (местами сильно искаженном и сокращенном) [43], «Катоптрику», приписывавшуюся Евклиду, но, видимо, написанную его комментатором Феоном (V в. н. э.), и «Оптику» Птолемея в пяти книгах (II в. н. э.), сохранившуюся неполностью в латинском переводе XII в. Первая (утраченная) книга сочинения Птолемея была посвящена общим положениям, касающимся света и зрения; вторая трактует об условиях зрительного восприятия и специально об обманах и ошибках зрения. Третья содержит теорию плоских и выпуклых зеркал, четвертая — вогнутых, конических и пирамидальным зеркал. Пятая, наиболее интересная и оригинальная, посвящена диоптрике [44].

Уже довольно рано сложились два противоположных представления о природе зрительного восприятия. Согласно одной теории, развитой древними атомистами, свет и цвета являются материальными истечениями, выходящими из предмета и достигающими глаза. Такие истечения доносят до нас не только мельчайшие частицы (подобно тому как это имеет место в случае обонятельных ощущений), но и «образ», или «подобие» предмета. По Лукрецию, повторявшему в данном случае воззрения греческих атомистов, на поверхности предметов находится

> Множество крохотных тел, что способны от них отрываться
> В точном порядке, всегда сохраняя их облик и форму [45].

Наличием подобных «эйдолов», или образов, атомисты объясняли и возникновение сновидений. Таким образом, теория «эйдолов» пыталась дать ответ не только на вопрос о природе света, но и о природе зрительных ощущений и представлений.

Вторая, противоположная теория возникла из стремления дать ответ преимущественно на второй вопрос: каким образом осуществляется зрительное восприятие предмета? Согласно

[43] Вплоть до XIX в. этот латинский перевод «Катоптрики», озаглавленный «О зеркалах», имел хождение под именем Птолемея.

[44] К IV в. н. э. относится «Оптика» Дамиана, сына Гелиодора Ларисского.

[45] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. IV, 68—69.

этой теории, зрение сводится к осязанию; из глаза исходят зрительные лучи, достигающие предмета и как бы ощупывающие его. Сторонники этого объяснения ссылались в подтверждение на светящиеся глаза некоторых животных, например кошек. Какой бы странной ни казалась подобная теория, она легче поддавалась геометризации и приводила к построению зрительных конусов или пирамид с вершиной в глазу и с основанием на поверхности видимого предмета. Показательно, что теории лучей, исходящих из глаза, придерживались преимущественно те авторы, которые уделяли главное внимание геометрическим построениям (например, Евклид в своей «Оптике»). Зрительные лучи, исходящие из глаза, согласно этой теории, дискретны; видимая величина предмета зависит от величины угла, образуемого крайними лучами; небольшие предметы, попадающие в промежутки между лучами, остаются для зрения недоступными.

Перспективные построения легко получаются в результате рассечения такого конуса зрительных лучей поверхностью, нормальной к оси зрения. Витрувий[46] определял «скенографию» как «рисунок фасада и уходящих вглубь сторон путем сведения всех линий к центру, намеченному циркулем». Это определение наряду с данными, почерпаемыми из исследования памятников античной живописи, заставило некоторых исследователей предположить, что поверхность, рассекающая конус зрительных лучей, была у античных теоретиков и практиков не плоскостью, а частью сферической поверхности (отсюда учение о пропорциональности видимой величины предметов углам зрения). Характерно, что теория перспективы носила у древних авторов также название «актинографии» (описание, или черчение лучей). Этим вопросам были посвящены не дошедшие до нас трактаты Демокрита и Анаксагора. По свидетельству Витрувия[47], «впервые в Афинах, в то время, когда Эсхил ставил трагедию, Агафарх устроил сцену и оставил ее описание», что дало повод к составлению только что указанных теоретических трактатов.

Особняком от обеих указанных теорий стоит теория Аристотеля. Свет, по его взглядам, есть видоизменение прозрачной среды под воздействием источника света (огня и т. п.) или, иначе, переход прозрачного тела от потенциального состояния к актуальному. Характер этого видоизменения ближе не определяется; было бы искусственным сближать его с постепенно распространяющимся волновым движением или чем-либо подобным. Аристотель говорит о свете как о «присутствии» (парусии) светлого тела в прозрачной среде, давая понять, что

[46] Витрувий, I, 2, 2.
[47] Витрувий, VII, вст. 11.

такое действие длится до тех пор, пока сохраняется само светлое тело или источник света. Вместе с тем дается понять, что действие светлого тела, «присутствующее» в среде, не есть ни материальное истечение, ни нечто неразрывно связанное со средой: при перемещении прозрачного тела (например, воды или воздуха) светлый луч не перемещается. Наиболее существенно в этой концепции то, что наличие промежуточной среды предполагается как необходимое условие распространения света к глазу.

Такая среда предполагается и в некоторых других античных теориях: Демокрит, сторонник теории истечения, вместе с тем говорил об «отпечатках», образуемых в воздухе, стоики — о напряжении («тоносе» или «энтасисе») воздуха. В отдельных случаях (например, у Платона) эклектически сочетались теория истечений и теория лучей, исходящих из глаза; истечения и лучи якобы встречаются друг с другом на полпути.

Идеалистическая теория зрения неоплатоника Плотина (III в. н. э.) может рассматриваться как предшественница позднейших теорий «дальнодействия»: зрительное восприятие не нуждается ни в истечениях, ни в посредствующей среде; Вселенная представляет единое живое целое, и «симпатия» частей, обусловленная наличием единой всепроникающей мировой души, является, согласно Плотину, достаточным объяснением. В качестве других примеров подобной «симпатии» приводились у него мгновенная передача движения от нижней части струны к верхней и явление резонанса, когда при движении одной струны начинает звучать другая.

Признавая световые истечения и «образы» материальными, древние атомисты естественно должны были признавать скорость света конечной, хотя и очень большой (движение подобных частиц, по их определению, «быстро как мысль»). Распространение лучей, исходящих из глаза, наоборот, считалось большинством разделявших эту теорию авторов мгновенным. Мгновенным представлял себе распространение света и Аристотель. Что же касается скорости звука, она признавалась всеми авторами конечной. Объясняя, почему мы слышим гром позднее, чем видим молнию, Лукреций, следуя Эпикуру, указывал, что

> ...всегда до ушей достигают
> Медленней звуки, чем то, что дает впечатление глазу.
> В этом нетрудно тебе убедиться: коль издали смотрим,
> Как дровосек топором двусторонним деревья срубает,
> Видим мы раньше удар, а потом уже звук раздается
> В наших ушах... [48]

[48] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. VI, 165—170.

Прямолинейность распространения света нашла свое известное выражение в теории лучей, исходящих из глаза. Атомисты также считали прямолинейное движение отличительным свойством зрительных образов. По крайней мере, у Лукреция это выражено в заявлении, что они «по пути устремляются только прямому, как изначала пошли»[49], тогда как голоса «одни из других возникают», словно рассыпающиеся искры:

...лишь только
Голос раздался один, как дробится сейчас же на много,
Так же как искры огня рассыпаются в новые искры [50].

Древние знали равенство углов падения и отражения, уподобляя в данном случае лучи бросаемым телам, отскакивающим от поверхности (Герон, «Катоптрика»). Лукреций формулировал это в обобщенной форме:

Ибо отскакивать все от вещей заставляет природа,
И отражаться назад под таким же углом, как упало [51].

У Герона вместе с тем была сделана попытка доказать, что при зеркальном отражении путь, проходимый лучом, короче любого другого возможного и проходится в кратчайшее время из возможных. Птолемей пытался проверить закон отражения экспериментально, пользуясь изогнутой пластинкой с нанесенными на ней делениями градусов. Перемещая небольшой предмет по внутренней поверхности этой пластинки, он определял положение, в котором этот предмет становится видимым для глаза, при отражении от вогнутого, плоского или выпуклого зеркала.

В «Катоптрике» псевдо-Евклида также исследовано, наряду с отражением в плоских зеркалах, отражение в зеркалах вогнутых и выпуклых. В первом случае лучи могут стать сходящимися и расходящимися, во втором они всегда расходящиеся. Фокус вогнутого зеркала определяется в этом труде неверно (он помещается либо в центре, либо между центром и зеркалом).

Рассмотрим теперь первые шаги диоптрики в трудах греческих ученых. Термин «анакласис», дословно означающий «переламывание» (луча), применялся более ранними авторами (например, Аристотелем) в довольно неопределенном смысле, охватывая и отражение и преломление; чтобы различить их, позднейшие комментаторы Аристотеля ввели для преломления наименование «диакласис». У Клеомеда (середина I в. н. э.) встречается обозначение «катакласис».

Понятно, что вопросы рефракции не могли не привлечь внимания астрономов. В сочинении только что уполянутого

[49] Там же, кн. IV, 609—610.
[50] Там же, кн. IV, 604—606.
[51] Там же, кн. IV, 346—347.

Клеомеда указывается, что при насыщенном влагой воздухе Солнце может быть видимо даже тогда, когда находится ниже горизонта; в подтверждение приводится опыт с золотым кольцом, которое кладут на дно сосуда и которое становится видимым после наполнения этого сосуда водой. Преломление Клеомед объяснял с точки зрения теории зрительных лучей, исходящих из глаза: они как бы тяжелеют от проникающей в них влаги. Влиянием паров (т. е. рефракции) объяснял Птолемей увеличение Солнца и Луны у горизонта (ср. также объяснение Страбона), хотя большее значение он приписывал психологическим причинам — различной оценке расстояний при смотрении по горизонтали (т. е. при наличии промежуточных предметов на земной поверхности) и по вертикали (при отсутствии таковых).

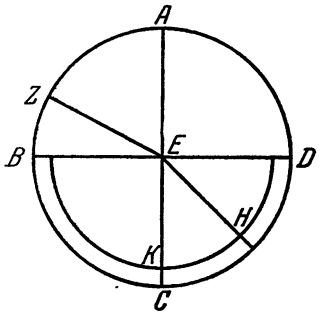


Рис. 1

Видимо, подобные размышления привели Птолемея к экспериментальному исследованию углов преломления при переходе лучей из воздуха в воду (рис. 1).

Для исследования преломления Птолемей пользовался тем же прибором, что и при исследовании отражения,— изогнутой медной пластинкой, на внутренней поверхности которой были нанесены деления, соответствующие градусам; перемещая тонкий стерженек H по дуге DC, либо погруженной в воду, либо загороженной стеклом, и визируя этот стерженек посредством двух небольших окрашенных предметов E и Z, Птолемей определял положение его для направления определенного луча зрения, а отсюда и угол преломления.

Ниже помещены приведенные Птолемеем данные (табл. 1—3), которые дополнены параллельными указаниями на действительные значения углов преломления. В последнем столбце указана разница между обоими значениями.

Если присмотреться к приведенным таблицам, нетрудно убедиться, что разности значений β (начиная от 0°) будут составлять:

В табл. 1	В табл. 2	В табл. 3
8°	7°	9°30′
7°30′	6°30′	9
7	6	8°30′
6°30′	5°30′	8
6	5	7°30′
5°30′	4°30′	7
5	4	6°30′
4°30′	3°30′	6

Таблица 1

Воздух — вода

Угол падения, α	Угол преломления β		
	по Птолемею	действительное значение	разница
10°	8°	7°29′	+31
20	15°30′	14 52	+38
30	22 30	22 1	+29
40	29	28 49	+11
50	35	35 4	—4
60	40 30	40 30	0
70	45 30	44 48	+42
80	50	47 36	+2°24′

Таблица 2

Воздух — стекло

Угол падения, α	Угол преломления β		
	по Птолемею	действительное значение	разница
10°	7°	6°31′	+29′
20	13°30′	12 56	+34
30	19 30	19 5	+25
40	25	24 52	+8
50	30	30 4	+4
60	34 30	34 30	0
70	38 30	37 55	+35
80	42	40 6	+1°54

Это значит, что вторые разности всюду постоянны и равны 30′. Далее, для угла $\alpha = 60°$ значения β, приводимые Птолемеем, не расходятся с действительными, тогда как для малых и больших углов расхождения наиболее значительны. Это заставляет полагать, что лишь некоторые значения были получены экспериментально, тогда как остальные вычислены теоретически.

Что касается углов преломления при переходе луча из воды или стекла в воздух, т. е. из среды более плотной в менее плотную, Птолемей не привел их в виде таблиц, считая, что пути остаются теми же, но проходятся в противоположном направлении (полное внутреннее отражение осталось ему неизвестным).

Таблица 3

Вода — стекло

Угол падения, α	Угол преломления β		
	по Птолемею	действительное значение	разница
10°	9°30′	8°46′	+44′
20	18 30	17 29	+1°01′
30	27	26 2	+58
40	35	34 22	+38
50	42 30	42 16	+14
60	49 30	49 30	0
70	56	55 35	+24
80	62	61 24	+36

Это свое положение он пытался проверить, экспериментируя с полуцилиндрическим стеклом.

Из античных свидетельств о пользовании линзами древнейшим является текст в комедии Аристофана «Облака», где при помощи зажигательного стекла растапливается долговое обязательство, написанное на покрытой воском дощечке. У Сенеки (Естественнонаучные вопросы, I, 6) сообщается, что «буквы, хотя бы и мелкие и неотчетливые, кажутся более крупными и ясными через стеклянный шар, наполненный водою». При раскопках римских гробниц были найдены линзы, которые могли служить одновременно и зажигательными стеклами и лупами. Так, линза, найденная в Майнце, имеет в диаметре 5,5 *см*, толщину в середине 5,9 *мм*, по краям 1,8 *мм*, что при коэффициенте преломления $n = 1{,}5$ дает фокусное расстояние 18—19 *см*. По свидетельству Плиния, Нерон смотрел на бои гладиаторов через смарагд (изумруд); считать это свидетельство, как делал Лессинг, указанием на то, что древним были известны очки, вряд ли правильно; всего вероятнее, что это делалось для защиты глаз, в особенности если сопоставить это, как сделал Летронн, с текстом Галена, указывавшего на пользование синими прозрачными предметами для отдыха глаз.

Излишне напоминать, что античным авторам осталась неизвестной истинная природа цвета. В их трудах можно найти лишь отдельные наблюдения и эмпирические обобщения, связанные с практикой живописи, крашения тканей, растениеводства и животноводства. Показательным в этом отношении является небольшой трактат «О цветах», ранее приписывавшийся Аристотелю и по всей вероятности принадлежащий его ученику Феофрасту. Здесь рассмотрены различные случаи переме-

ны оттенков в зависимости от освещенности и среды (цвет Солнца при восходе и закате, окраска моря, отливы перьев); особенно подробно рассмотрена окраска листьев, цветов и плодов растений, волос человека и шерсти животных в зависимости от притока влаги, питательных веществ, «выгорания» на солнце и т. п. Интересны аналогии с процессами изготовления красок (в частности, пурпура), посредством которых автор пытался объяснить только что указанные перемены. Внимание к изменению окраски минералов при прокаливании, размельчении и т. п. также становится понятным, если вспомнить о минеральных красках, применявшихся в живописи.

У античных авторов можно найти отдельные замечания о смешении цветов и пигментов. Эмпедокл и пифагорейцы простыми цветами считали белый, черный, красный и желтый; Демокрит — белый, черный, красный и зеленовато-желтый (*хлорон*). Примерно то же мы видим у Платона, который, однако, в качестве четвертого цвета называл «светло-блестящий» (цвет огня), а желтый выводил из смешения последнего с белым и красным.

Древние писатели свидетельствуют, что знаменитый живописец V в. до н. э. Полигнот пользовался четырьмя красками (и их смесями): белой, черной, красной и желтой; если это свидетельство справедливо, то перед нами поразительная близость теории и практики. Заметим, что и в медицинской теории четырех темпераментов, восходящей к гиппократикам, четыре основных «влаги», или жидкости, организма (слизь, черная желчь, кровь, светлая желчь) также ставились в связь с теми же четырьмя цветами (белый, черный, красный, желтый). Любопытно замечание Аристотеля, что в основе гармонического смешения цветов должны лежать простые числовые отношения (наподобие того, как это имеет место в акустике).

Упоминания об экспериментальных исследованиях цветов и их смешении встречаются позднее у Птолемея: вращение круга с различно окрашенными секторами; белый и черный цилиндры, сливающиеся в один серый, при параллельности осей зрения обоих глаз.

Добавим еще несколько слов об античных теориях радуги. Согласно Анаксимену и Анаксагору, радуга возникает благодаря отражению Солнца в темной туче; такого же взгляда держались пифагорейцы. Об отражении («анакласис») говорил и Аристотель, посвятивший радуге довольно большой раздел в своей «Метеорологии» [52] и уточнивший, что речь идет об отражении в каплях. Аристотелевская теория содержит математическое доказательство того, что Солнце, точка, где находится

[52] Аристотель Метеорология, кн. III, гл. 4 и 5.

наблюдатель, и центр радуги находятся на одной прямой, т. е. чем выше над горизонтом Солнце, тем ниже центр радуги. Во многих пунктах неясное (и, возможно, искаженное переписчиками) доказательство Аристотеля, видимо, не принадлежит ему, так как основано на представлении о лучах зрения, исходящих из глаза, представлении, популярном, как мы знаем, в пифагорейской среде и не разделявшемся самим Аристотелем. Что же касается объяснения спектральных цветов, то оно было основано у него и его предшественников на идее смешения светлого и темного, происходящего в туче. Вторая радуга толковалась как отражение первой. Интересны аристотелевские сопоставления небесной радуги с теми радужными цветами, которые получаются при ударах весел или при разбрызгивании воды ртом, а также с радужными сияниями вокруг пламени светильников. Такие же сопоставления можно встретить позднее у Сенеки, который упоминает и о радужных цветах граненых стекол. Все подобные указания не могли пойти дальше простых аналогий при отсутствии знания законов преломления.

Акустика. Акустические наблюдения и эксперименты греков и римлян были наиболее тесно связаны с музыкальным искусством и попытками создать стройную музыкальную теорию. В греческой музыке применялись более мелкие интервалы, чем в нашем современном темперированном строе, а именно — малый и большой полутоны (256 : 243 и 2187 : 2048), тогда как у нас наименьшим интервалом является малая секунда (10 : 9). Число струн постепенно возрастало (от 3 до 18); соответственно менялись и духовые инструменты. Самыми употребительными инструментами были струнные, обозначавшиеся общим названием «лира» (хотя лирой назывался и один из видов их), а из духовых — флейта (*авлос*). Сочетание семи или девяти трубок (свирелей) носило название *сиринкс* («цевница»). К числу духовых принадлежали и различные виды труб. Важнейшими ударными были кимвалы и тимпаны. Смычковых инструментов греки не знали. Интересным достижением эллинистической техники явился водяной орган, изобретение которого приписывается Ктесибию Старшему, жившему в Александрии в III в. до н. э.

К сожалению, нам мало известны те обобщения, которыми руководились певцы, музыканты и мастера, занимавшиеся усовершенствованием музыкальных инструментов. Дошедшие до нас музыкально-теоретические труды наряду с данными практического опыта содержат нормы и требования, опиравшиеся на те или иные представления об «идеальном» гармоническом строе. Уже древние авторы различали два основных русла музыкально-теоретических исследований: одни теоретики уделяли главное внимание чисто математическим соотношениям

между звуками (пифагорейцы), другие придавали основное значение не столько математическим изысканиям, сколько реально слышимым соотношениям между звуками. К числу этих вторых принадлежал ученик Аристотеля Аристоксен (середина IV в. до н. э.). Однако такое противопоставление является скорее абстрактно-типологическим, нежели конкретно-историческим. Некоторые пифагорейцы (например, Архит) занимались экспериментальными исследованиями; с другой стороны, у того же Аристосена можно найти немало умозрительно-математических домыслов. Во II в. н. э. Птолемей поставил себе целью преодолеть противоположность между теми, кто доверяют «только ушам», и теми, кто основывается «только на разуме». Ему последовал в VI в. Боэций, который в своем труде попытался подвести итог музыкально-теоретическим изысканиям древности.

Легенда приписала Пифагору открытие соответствия между простейшими числовыми соотношениями (2 : 1, 3 : 2, 4 : 3, 9 : 8) и сочетаниями звуков (октава, квинта, кварта, секунда или целый тон). По преданию, он сделал это открытие, проходя мимо кузниц и слыша удары о наковальню; приказав кузнецам поменяться молотками, Пифагор заключил, что разница не обусловлена силой удара и наковальней, а взвесив молотки, определил указанные выше соотношения. Дальнейшие его опыты заключались, согласно легенде, в подвешивании грузов к струнам, в исследовании свирелей различной длины, в наполнении сосудов различным количеством жидкости и, наконец, в определении длины различных струн. Безотносительно к своей истинности, эта поздняя легенда хорошо отразила основные типы акустических экспериментов, производившихся греками.

Известно также, что греки пользовались передвижным полушарием, служившим подставкой и позволявшим варьировать длину натянутой струны. Отнимая $^1/_2$ длины, получали соотношение 2 : 1 (октаву); отнимая $^1/_3$, получали 3 : 2 (квинту); отнимая $^1/_4$ — соотношение 4 : 3 (кварту). Соответственно, между квинтой и квартой $[(^3/_2) : (^4/_3)]$ получался интервал, равный тону (9 : 8). Таким образом, два тона равнялись $\frac{9}{8} \cdot \frac{9}{8} = \frac{9^2}{8^2}$ и три тона $\frac{9^3}{8^3}$. Интервал между квартой и двумя тонами (малый полутон), т. е. $\frac{4}{3} : \frac{9^2}{8^2} = \frac{256}{243}$, носил название *диэза* (или *леммы*, остатка); интервал между тремя тонами и квартой (большой полутон), т. е. $\frac{9^3}{8^3} : \frac{4}{3} = \frac{2187}{2048}$, — название *апотомэ́* (вычет). Перемножая, нетрудно видеть, что малый и большой полутоны вместе образовали интервал, равный одному

тону; иначе говоря, тон делился на два *неравных* полутона. Мельчайшим интервалом была так называемая *комма* — разница между шестью тонами $\left(\frac{9^6}{8^6}\right)$ и октавой $\left(\frac{2}{1}\right)$, т. е. $\frac{9^6}{8^6} : \frac{2}{1} = \frac{531\,441}{524\,288}$. (Впрочем, некоторые теоретики пользовались еще более дробными делениями: *схисмой*, половиной коммы, и *диасхисмой*, половиной лейммы). Комму можно рассматривать и как интервал между большим и малым полутоном.

Против отвлеченно математических построений, аналогичных только что приведенным, резко выступил Аристоксен, настаивая на учете показаний чувственного опыта. Предложенная им система темперации была основана на приравнивании шести тонов к октаве (комма, таким образом, не принималась в расчет) и в соответственном приравнивании большого и малого полутонов друг к другу (тон, следовательно, делился на два равных полутона). Однако при своих подсчетах Аристоксен также применял мелкие интервалы, деля тон на 12 частей и выражая прочие интервалы целым числом таких единиц (полутон — 6, кварта — 30, квинта — 42, и октава — 72).

Подобный способ арифметического подсчета интервалов неизбежно приводил к разрыву с подсчетами, основанными на длинах струн; ведь нетрудно видеть, что при переходе от одной октавы к другой длина струн сокращается вдвое, тогда как аристоксеновские единицы измерения мыслились постоянными.

Углубленное изучение музыкальных пропорций пифагорейцами в IV в. до н. э. (главным образом Архитом) было одним из стимулов к открытию иррациональных соотношений.

Архит показал, что ни один из основных интервалов (октава, квинта, кварта, тон) не может быть разложен на два равных друг другу интервала, выражаемых рациональными числами (что было вполне мыслимо в «атомистической» системе Аристоксена: октава $= 36 + 36$, тон $= 6 + 6$ и т. д.). В переводе на современный алгебраический язык это значит, что отношения типа $\frac{n+1}{n}$ не могут быть представлены в виде квадрата рациональной величины (x^2). При определении приближенных значений x, являющегося средним членом геометрической пропорции (средним геометрическим между n и $n+1$): $\frac{n+1}{x} = \frac{x}{n}$, приобретало особую важность пользование и другими видами пропорций: арифметической и так называемой гармонической (или музыкальной), так как среднее арифметическое $\left(\frac{2n+1}{2}\right)$ и гармоническое $\left(\frac{2n(n+1)}{2n+1}\right)$ или иначе $n(n+1) : \left[\frac{n+(n+1)}{2}\right]$

тех же величин n и $n+1$ служили приближенными значениями x с избытком и недостатком.

Важное историческое значение имело истолкование большой терции как благозвучного интервала. Согласно платоно-пифагорейской традиции, большая терция соответствовала отношению 81 : 64 (два тона), а потому, вследствие сложности этого отношения, исключалась из ряда благозвучных сочетаний, выражаемых простыми отношениями 2 : 1; 3 : 2; 4 : 3. В системе Архита большая терция впервые была приравнена к отношению 80 : 64 = 5 : 4 и тем самым могла быть поставлена в один ряд с октавой, квинтой и квартой как естественное продолжение этого ряда. В последующие столетия музыкальная теория, стремившаяся к обогащению музыкального языка, выдержала упорную борьбу за «права» терции, против схоластизированной платоно-пифагорейской традиции, не желавшей включать ее в число благозвучных интервалов.

Теоретики принимали во внимание и влияние натяжения струны на высоту звука, однако в этом случае не пошли дальше качественных констатаций. Известно, что при изготовлении военных машин (баллист и катапульт) тетивы старались настраивать в унисон, чтобы удар происходил с одинаковой силой.

Видимо, в школе Архита выработалось представление, что низкие звуки состоят из более медленных и редких движений, высокие — из движений более быстрых и частых. Отдельные замечания относятся к влиянию влажности, к связи звука с плотностью и величиною тела (более компактные или тонкие тела якобы издают более высокие звуки, чем тела более рыхлые и крупные) и т. д.

Природу звука древние атомисты понимали по аналогии со зрительными образами (см. выше, стр. 60), т. е. как некое материальное истечение. По представлениям Аристотеля звук — движение среды (воздуха), обусловленное ударом двух тел. У Витрувия (а также у Боэция) распространение звука уподоблялось расширяющимся кругам волн, возникающих на спокойной воде, если бросить в нее камень. Сочинение Витрувия содержит ряд указаний по архитектурной акустике и, в частности, об устройстве медных сосудов — резонаторов (так называемых «эхеев» или «голосников»), которые якобы подвешивались в нишах античных театров. Такими резонаторами, по свидетельству Витрувия, пользовались и для обнаружения неприятельских подкопов: при осаде Аполлонии архитектор Трифон Александрийский определил их направление по звону медных сосудов, подвешенных в вырытой около стены траншее.

Представления о теплоте. Для античных представлений о теплоте характерны, с одной стороны, та огромная роль, которая придавалась теплому и холодному в общем учении о ма-

терии, с другой — отсутствие всяких средств для количественного исследования тепловых явлений. В физике Парменида теплота и холод являлись основными движущими силами, производящими расширение и сжатие, отталкивание и притяжение. В учении о четырех стихиях земля, вода, воздух и огонь наделялись попарно качествами теплоты и холода, сухости и влажности; поэтому все разнообразие веществ должно было в конечном итоге сводиться к различию интенсивности этих качеств и их количественной комбинации. Представления о теплоте были теснейшим образом связаны с кругом биологических вопросов — о природе «жизненного тепла», дыхания, переваривания пищи и т. д. Медиков интересовало «согревающее» и «охлаждающее» действие лекарств.

По Демокриту, огонь (соответственно и теплота) состоит из круглых, наиболее подвижных атомов. Из таких же круглых и подвижных атомов состоит душа, способная легко проникать в другие тела и приводить их в движение. Дыхание—втягивание атомов теплоты из воздуха.

Возражая Демокриту и указывая, что выдыхаемый воздух теплее вдыхаемого, Аристотель сводил роль дыхания к охлаждению теплоты, находящейся в живом организме. Правильно подметив, что огонь гаснет при отсутствии притока воздуха, Аристотель неправильно свел роль воздуха к охлаждению: если тепло организма не остужать, оно якобы истощает, уничтожает само себя.

Интересны замечания Демокрита о связи цвета и теплоты, подсказанные, по-видимому, наблюдениями над горением угля и металлургическими процессами. Красное, по Демокриту, обусловлено той же круглой формой атомов, что и теплое, однако, атомы эти более крупные. «Нагреваясь, краснеем и мы, краснеют и прочие тела, когда их накаливают, пока они не приобретут огненного цвета». Чем крупнее атомы, тем краснее тело: пламя и уголь свежих дров более красны, чем сухих; таковы и железо, и другие накаляемые тела. «Когда они имеют очень много огня и притом самого тонкого, они наиболее светлы, более же красными являются те тела, у которых огонь более густой и его меньше. Вот почему более красное и менее тепло; ибо то, что тонко, тепло» [53].

Для многих античных теорий (и в частности для теорий гиппократиков и аристотеликов) было характерно пользование парами противоположностей теплоты и холода. Плутарху (II в. н. э.) принадлежит любопытное сочинение «О первичном холоде», в котором он попытался различать противополож-

[53] Фрагмент Демокрита, сохраненный в сочинении Феофраста «Об ощущении и ощущаемом».

ности *абстрактные* (например, свет и отсутствие света, тело и пустота) и противоположности *реальные*. К числу последних, по его мнению, принадлежат теплота и холод. Холод, писал Плутарх, не есть простое отсутствие или «лишение» тепла, так как он активно воздействует на наше тело (что касается атомистов, то у них «холодными» признавались такие частицы, которые способны выжимать или выгонять атомы огня из того или иного тела).

На основе подобного представления о теплоте и холоде как реальных силах возникло в школе Аристотеля учение о так называемом антиперистасисе или отталкивании противоположностей. Термин «антиперистасис» можно дословно передать термином «противообстояние» (так он и переводился в русской литературе XVII в.). Представления об антиперистасисе возникли на основе явлений так называемого одновременного контраста: наличие одной противоположности усиливает впечатление, производимое другой («чем ночь темней, тем ярче звезды»). Аналогично, по представлению аристотеликов, вещь становится более теплой по соседству с холодной и холодной по соседству с горячей: подземная пещера холодна летом и тепла зимой. Следует подчеркнуть, что по воззрениям аристотеликов тело *объективно* становится иным, а не *кажется* таковым; в этом была суть учения об антиперистасисе. Одна противоположность, окружая другую, как бы заставляет ее сплачиваться, усиливаться; противоположному свойственно отталкивание, подобному — притяжение. При отсутствии правильных понятий о теплоемкости, теплопроводности, испарении и замерзании, аристотелики прибегали к антиперистасису для объяснения, например, такого явления, как град: в отличие от Анаксагора Аристотель утверждал, что град образуется, когда туча опускается из более холодного в более теплый воздух (ибо, указывал он, чем ниже летняя туча, тем чаще бывает град). Дожди в Аравии и Эфиопии выпадают летом, а не зимой — под действием антиперистасиса, обусловленного зноем местности. В сочинениях ученика Аристотеля, ботаника Феофраста теория антиперистасиса была применена к объяснению условий, в которых происходит усвоение веществ и созревание плодов. Аналогичные мысли можно встретить и в более ранних источниках, в медицинских сочинениях гиппократовской школы (например, рассуждения о том, что желудок и внутренности человека, «по природе своей» более теплы зимой, нежели летом). Отвергал существование антиперистасиса медик Гален (II в. н. э.), указывавший, что зимой вода в колодце и в источниках лишь кажется теплее, потому что поверхность нашего тела летом и зимой имеет разную температуру. Само собою разумеется, что при отсутствии точных понятий о теплоте

и соответствующих измерительных приборов спор об антиперистасисе должен был выродиться в схоластическую дискуссию, как это действительно имело место в средние века. Лишь после изобретения термометров вопрос мог быть переведен на научную почву (экспериментальной проверкой, существует ли антиперистасис, занялась, например, в середине XVII в. Флорентийская академия опытов).

Нельзя не заметить вместе с тем, что исторически термин «температура» восходит уже к античной физике, еще не знавшей термометров. Латинские термины temperies, temperatura (как и греческое слово «красис») означают смесь, смешение, т. е. то или иное сочетание противоположных качеств — холодного и теплого, сухого и влажного (отсюда же—«темперамент», т. е. сочетание четырех первичных «влаг» организма в той или иной пропорции: крови, флегмы, светлой и черной желчи). Эти представления о комбинации качеств различной интенсивности привели к идее о шкале интенсивностей, не нашедшей, однако, реализации в каком-либо измерительном приборе.

Таково учение Галена (II в. н. э.) о «градусе» («таксис») лекарств, получившее широкое распространение и развитие в последующие века. По Галену, для каждого качества существует четыре градуса, или степени. Каждый градус в свою очередь имеет три деления: различается его начало, середина и конец. В виде исходной, или, говоря на нашем языке, «нулевой» точки Гален принимал нормальную температуру человеческого тела, и притом в нормальных условиях, поскольку один и тот же предмет может казаться холодным для разгоряченного тела и теплым — для тела, находившегося на морозе. Лекарства и вещества, обладающие той же «температурой», что и человеческое тело, не производят в нас ощущения ни тепла ни холода. Лекарства первого градуса производят на нас *некоторое* тепловое воздействие, однако неявное; о нем приходится лишь догадываться на основании логического рассуждения. Лекарства второго градуса согревают (или охлаждают) *явно*. Еще более сильны лекарства третьего градуса, не достигающие, однако, максимума. Вещества четвертого градуса — яды — производят ожог или какое-либо иное разрушение кожи и прочих тканей.

Таким образом, идеальным «термометром» для Галена было человеческое тело (еще точнее — ладонь руки) в нормальных условиях, т. е. в таких, когда противоположные качества уравновешены и находятся в гармоническом смешении или «благорастворены» друг с другом (евкрасия). Для получения подобной гармонической смеси Гален рекомендовал также брать среднее, получающееся из смешения крайностей, приводя в качестве примера смесь кипятка со льдом или снегом. Мыс-

ленный «промежуток» между крайностями, разделенный пополам, дает среднее, или «соразмерное», одинаково отстоящее от обоих концов. Эта смесь должна служить как бы линейкой (или «каноном»), сообразуясь с которым мы будем оценивать температуры других тел. Таким же образом для суждения о степенях влажности и сухости Гален рекомендовал смешивать равные по весу количества сухого тела (например, земли или золы) с водой. Смешиваемые тела в этом случае должны были быть «соразмерно» теплыми, ибо если они слишком горячи или слишком холодны, они дадут, по Галену, обманчивые ощущения сухости и влажности.

Галеновские мысли о градациях (или градусах) качеств явились той основой, на которой позднее врачи и фармакологи разработали классификацию веществ по их «согревающим» и «охлаждающим» свойствам: перец, например, считался горячим и сухим в четвертом градусе и т. п. Как мы увидим дальше, на той же основе зародились первые попытки вычислять температуру смесей (или «сложных лекарств»).

Магнетизм и электричество. По вполне понятным причинам сведения древних о магнитных и электрических явлениях были разрозненными и отрывочными. Согласно легенде, передаваемой Плинием, свойства магнитной руды были впервые обнаружены пастухом Магнесом, который пас стада в горах и заметил, что гвозди его обуви и наконечник его палки пристают к камню (от имени пастуха — и слово «магнит»). Правильнее, однако, полагать, что слово «магнит» произошло от названия города Магнесии в Лидии, около которого находились большие залежи магнитной руды.

Античным авторам было известно явление намагничивания железа при соприкосновении с магнитом. У Платона в диалоге «Ион» [54] в качестве поэтического иносказания применен образ магнита («камня, который Еврипид назвал магнесийским, а большинство называет гераклейским»). Этот магнит не только притягивает железные кольца, но и сообщает им способность притягивать другие кольца, так что «иногда получается длинная цепь из кусочков железа и колец, одного за другим». Описание того же явления содержится в следующих строках поэмы Лукреция [55]:

> Этому камню народ удивляется, ибо нередко
> Цепью звено к звену, от него исходя, повисает.
> Можно ведь видеть порой, что, качаясь от легкого ветра,
> Пять или больше таких свободно спускается звеньев.

---

[54] Платон. Ион, 533 d — e.

[55] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. VI, 910—915.

Все они вместе висят и, одно к одному прилепляясь,
Камня силу и связь друг от друга тогда испытуют.

Что касается объяснения, почему магнит притягивает железо, раньше уже было сказано (стр. 28) об анимистическом толковании Фалеса, наделявшего магнит «душой». У Эмпедокла наметилась механическая теория притяжения, объяснявшая его взаимодействием между материальными истечениями из магнита и железа. Эта теория получила дальнейшее развитие у древних атомистов.

По Лукрецию [56], действие магнита на железо объясняется истечениями атомов, которые, выходя из магнита и оттесняя окружающий воздух, образуют пустоту; в эту пустоту должны устремляться частицы железа, чему содействует и воздух, расположенный за железом и внутри его пор, также устремляющийся в сторону образовавшейся пустоты и подталкивающий частицы железа наподобие ветра, подгоняющего корабль. Тот факт, что магнит действует не на все тела, Лукреций объяснял различным расположением атомов в этих телах: одни (например, золото) вообще преграждают путь магнитным истечениям, другие (например, дерево) дают им свободный проход, и столкновения с воздухом не происходит. Сила сцепления объясняется степенью соответствия между «сплетением» частиц в том и другом теле:

Вещи, в которых их ткань совпадает взаимно с другою,
Так что, где выпуклость есть, у другой оказалась бы там же
Впадина,— эта их связь окажется самою тесной.
Есть и такие еще, что крючками и петлями будто
Держатся крепко, и так друг с другом сцепляются вместе.
Это скорее всего происходит в железе с магнитом [57].

Из других источников можно заключить, что в античное время существовала и теория, приписывавшая действие магнита особой притягательной силе. Такое представление было связано с более общим учением о «симпатиях» и «антипатиях» вещей, посредством которого и пытались объяснить, почему магнит притягивает железо, не притягивая другие вещества. Многочисленные отголоски подобных идей о «симпатиях» и «антипатиях» между вещами, их взаимном притяжении и отталкивании можно найти в «Естественной истории» Плиния, который приводит легендарные и фантастические рассказы о том, что например, в Индии существуют две горы, одна из которых притягивает, а другая отталкивает железо, так что на одной нельзя

[56] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. VI, 1002, 1089.
[57] Там же, 1084—1089.

оторвать подошву обуви, а на другой нельзя стоять. У Плиния приводятся также сообщения, будто алмаз парализует действие магнита и в свою очередь трескается от козлиной крови; будто в Африке существует минерал, способный притягивать не только железо, но и медь и серебро; что индийская хрисоколла притягивает железо и золото; что минерал катохитис на Корсике притягивает руку и удерживает ее, как клей, и т. п. Подобные представления об универсальных силах притяжения и отталкивания, уходящие своими корнями в первобытные магические верования и народный фольклор, сказались и в области медицины, где магнитом пытались лечить различные болезни.

Скудны и недостаточны были представления об электричестве. Способность натертого янтаря притягивать легкие соломинки была известна уже Фалесу (заметим, что самое название «электричество» происходит от греческого названия янтаря —«электрон»). В позднейшей литературе встречаются легендарные рассказы о других веществах, якобы обладающих подобным же свойством. Феофраст, например, сообщал о камне лингурионе, который будто бы притягивает не только соломинки, но и железные и медные опилки; Плиний — о лихните, который при нагревании солнцем или после трения пальцами притягивает соломинки и легкие листочки папируса. Так же, как и представления о магните, подобные взгляды были большей частью связаны с анимистическими представлениями о «душе» и с верованием в «симпатию» и «антипатию» вещей. Проводя аналогию между магнитом и янтарем (т. е. явлениями магнетизма и электричества), Плиний, например, говорил, что при натирании янтарь воспринимает «душу» тепла и т. п.

Древним были хорошо известны свойства электрических рыб. В сочинении римского медика Скрибония Ларга (первая половина I в. н. э.) встречается даже совет лечить головную боль прикладыванием электрического ската (ранний пример «электротерапии»). Однако это не значит, что древние рассматривали подобные явления как электрические, т. е. как-то сближали их со свойствами натертого янтаря.

Разумеется, античные авторы не отдавали себе отчета и в электрической природе молнии. Их попытки объяснения кажутся в наше время наивными и несовершенными. Нельзя однако, забывать, что для своего времени некоторые из них были смелыми и шли вразрез с традиционными мифологическими представлениями о громах и молниях, ниспосылаемых на землю карающей рукою Зевса. Рвал ли оболочку туч ветер, как это полагал в своем объяснении грома Анаксимандр, указывались ли в качестве причин огненные лучи солнца (Эмпедокл), или эфирный небесный огонь (Анаксимандр), или

огненные атомы (Демокрит)—всюду перед нами попытки рационального объяснения явлений; таково же было и объяснение грозы земными «испарениями» в теориях Гераклита и позднее Аристотеля.

Уверенный в силах человеческого разума, Лукреций неслучайно заканчивал часть своей поэмы, посвященную молнии, стихами:

Эта возможность дает вполне разобраться в природе
Молний и видеть, какой они силою все производят;
Нечего рыться тебе понапрасну в Тирренских вещаньях,
Чтоб указаний искать сокровенной божественной воли [58].

Таких «указаний сокровенной божественной воли» искали в грозовых явлениях древние этруски, жрецы которых различали даже, как сообщает Плиний, 11 видов молний. Подобные эмпирические наблюдения, не объединенные какими-либо рациональными объяснениями, остались по вполне понятным причинам бесплодными для науки [59].

Отметим еще одну деталь античных теорий молнии. Некоторые авторы (Лукреций, Плиний, Плутарх) говорили о «серном запахе», сопровождающем молнии, и видели в этом указание на «огненную природу»:

Знаки, что выжжет она, и удушливый запах их серный,
Все это — знаки огня, но отнюдь не дождя и не ветра [60].

Опять и здесь важна не столько правильность теории, сколько общая тенденция к рациональному объяснению явления. Нужно напомнить, что еще в XVIII в. пользовались для объяснения молнии гипотезой о «серных частицах» в атмосфере, а Ломоносов говорил о «жирных материях», содержащихся в воздухе и возгорающихся под действием атмосферного электричества.

* * *

Подведем общие итоги. Античная физика вошла в историю науки как своеобразный, качественно-определенный этап

---

[58] Лукреций. О природе вещей. Изд-во АН СССР, 1945, кн. VI, 379—382.

[59] В этой же связи нелишне вспомнить, что едва ли не первое описание цветов тонких пластинок содержится в вавилонских текстах времен Хаммурапи (1792—1750 гг. до н. э.): прорицатели, наливавшие кунжутное масло в сосуд с чистой водой, сквозь который просвечивали лучи восходящего солнца, заметили, что у краев сосуда слой масла — черный, наружный край первого светлого кольца — красный, а третье светлое кольцо имеет зеленый оттенок. (См. G. Quincke. Zur babilonischen Becherwahrsagung. Zeitschrift für Assyriologie, Bd. 18, 1904—1905, S. 223—227).

[60] Лукреций. Цит. соч., кн. VI, 221—222.

ее развития. В греческой физике впервые, как и в греческой математике, мы встречаем не только эмпирические констатации, но и попытки теоретических доказательств. Античная механика может гордиться достижениями, которые незыблемо, навсегда вошли в золотой фонд естествознания; таковы открытие закона рычага, открытие гидростатического закона, носящего имя Архимеда, исследование центров тяжести. В античную эпоху добились первых успехов геометрическая оптика и музыкальная акустика, основанная на числе и мере. К античному периоду относятся первые идеи о движущей силе пара. В некоторых областях (механика, оптика, акустика) можно встретиться с первыми попытками экспериментального исследования явлений. С другой стороны, многие области физики еще не могли выйти за пределы конкретных наблюдений, подчас метких, но не поддававшихся обобщению в стройную теорию (таково, например, учение о цвете).

Греческая философия, а с нею и физика, понимаемая в смысле общего учения о природе (*фисис*) начала с гениальных догадок о диалектической связи явлений, о единстве материального мира. Но, как отмечал Энгельс (см. выше, стр. 27), сама логика исторического развития вела к тому, чтобы от этого, по сути дела правильного общего взгляда на мир перейти к обособленному исследованию отдельных сторон, частностей. В «Диалектике природы» Энгельс писал: «У греков — именно потому, что они еще не дошли до расчленения, до анализа природы,— природа еще рассматривается в общем, как одно целое. Всеобщая связь явлений природы не доказывается в подробностях: она является для греков результатом непосредственного созерцания. В этом недостаток греческой философии, из которого она должна была впоследствии уступить место другим воззрениям. Но в этом же заключается и ее превосходство над всеми ее позднейшими метафизическими противниками» [61].

Переход к всестороннему исследованию частностей в античную эпоху остался невозможным прежде всего потому, что рабовладельческий способ производства по самому существу своему ограничивал возможности технического развития. Об этом уже была речь выше (стр. 52).

Другой помехой явились факторы общественного и идеологического порядка. Мы знаем, что античная философия в лице атомистов сделала огромный шаг вперед в направлении механико-материалистического понимания мира. В античную эпоху были поставлены большие проблемы об абсолютном и относительном характере движения, о связи пространства и

---

[61] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 24

времени с физическими телами. Но в условиях общественной борьбы неизбежным был и антагонизм двух направлений — «линии Демокрита» и «линии Платона». Противники материализма были представлены не только открытыми идеалистами; античные скептики явились провозвестниками позднейшего агностицизма, феноменализма и позитивизма. В период упадка античного общества, как мы уже знаем, «линия Платона» стала одерживать верх, и в это время особенно усилились мистические течения, означавшие по существу возврат к первобытным анимистическим идеям. В этих неблагоприятных условиях классическое научное наследие греков, как будет показано дальше, перешло в средневековье.

В. П. Зубов

ФИЗИЧЕСКИЕ ИДЕИ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

Начальную пору западного средневековья Энгельс охарактеризовал следующими словами: «Всеобщее обнищание, сокращение торговых сношений, упадок ремесла, искусства, уменьшение населения, упадок городов, возврат земледелия к более низкому уровню — таков был конечный результат римского мирового владычества»[1]. Преобладание мелкого производства и натурального хозяйства приводило к локальной замкнутости, не благоприятствовало техническому прогрессу и культурному обмену. Такое положение было особенно характерно именно для первых столетий западного средневековья, периода, который охватывает V — XI вв. и который принято называть «темной порой» (dark age). В этих условиях отсутствовали стимулы к углубленному изучению природы и ее закономерностей. Античное наследие постепенно забывалось, научные традиции античной эпохи утрачивались.

Основными передаточными звеньями между античной эпохой и средневековьем явились труды Боэция (ок. 475—524), Кассиодора (ок. 490—580), Марциана Капеллы (III в.— начало IV в. или начало V в.). Естественнонаучные сочинения Аристотеля были забыты надолго, так же как и произведения большинства других классических представителей античной научной мысли [2].

Обрывки научных знаний приобрели «кабинетный», книжный характер и сделались достоянием весьма ограниченного

[1] Ф. Энгельс. Происхождение семьи, частной собственности и государства. К. Маркс и Ф. Энгельс. Избр. произв., т. II. Госполитиздат, 1955, стр. 283.

[2] Из позднеантичных источников, сохранявших популярность в средние века, следует упомянуть комментарий Халкидия к «Тимею» Платона (IV в. н. э.) и сочинения Макробия (см. выше, стр. 49).

числа лиц. Разрыв между теоретическим знанием и практикой достиг едва ли не высшей своей точки.

Ставшее традиционным в средние века деление научного знания на семь дисциплин, или «свободных искусств» (artes liberales) наметилось уже у Кассиодора, который поставил эти семь искусств в связь с семью «столпами дома премудрости», упоминаемого в библии, и тем самым ввел это деление в круг числовой символики, ставшей столь излюбленной в средние века. У Марциана Капеллы семь «свободных искусств» перечислены в следующем порядке: грамматика, риторика и диалектика (т. е. элементарная логика), которые составляли начальное «трехпутье», или «тривий» (отсюда слово «тривиальный»); арифметика, геометрия, астрономия и музыка образовали «квадривий». Все эти «искусства» обычно рассматривались лишь как ступени к «высшей мудрости», которую Марциан Капелла именовал «филологией», Боэций «философией», а последующие авторы предпочитали сводить к теологии [3]. Еще более подчиненное место занимали в школьных средневековых классификациях так называемые «механические искусства», к числу которых относились основные виды технической деятельности: строительное дело, текстильное производство, земледелие и др., включая живопись и медицину [4].

До некоторой степени самостоятельно продолжали разрабатываться в первые столетия средневековья вопросы календаря, связанные с вычислением дня пасхи. Однако, поскольку традиционные основы счисления времени, утвержденные церковными соборами, должны были оставаться неприкосновенными, решаемые задачи имели по существу арифметический характер и не нуждались в астрономических наблюдениях. Следует упомянуть особо о сочинениях по календарю, написанных в Ирландии в тот период, когда в ираландских монастырях сохранялись остатки учености,— вплоть до знания греческого языка, который в глухую пору средневековья был на Западе почти повсеместно забыт.

В целом изучение природы как таковой все более и более подменяется ее символическим истолкованием в мистическом или морально-назидательном духе. Характерным примером может служить судьба сочинения Исидора Севильского (560—

---

[3] Общеизвестное средневековое выражение «философия — служанка богословия» восходит к кардиналу Петру Дамиани (ум. в 1072 г.), который всю «опытность человеческого искусства» в целом уподоблял «служанке госпожи» (т. е. теологии).

[4] Физика рассматривалась обычно как часть философии, т. е. теоретического знания в широком смысле. Благодаря Августину (354—430) не было вполне забыто античное деление философии на логику, физику и этику.

636 гг.), которое около 844 г. было переработано Рабаном Мавром, аббатом монастыря в Фульде. Оно известно под двумя названиями: «Начала» (Origines) и «Этимология». Второе заглавие лучше передает его содержание: автора интересуют в первую очередь не «начала вещей», а «начало слов», т. е. их этимология,— *почему* предмет называется так, а не иначе, *от какого корня* происходит слово. Этимологии Исидора по большей части самые фантастические: объяснение происхождения слова lucus (роща) от слов «отсутствие света» (a non lucendo) вошло в поговорку. О самих вещах Исидор сообщает лишь косвенно, попутно, преимущественно пользуясь книжными источниками. Наряду с античными источниками он привлекает тексты латинских «отцов церкви» и латинский перевод библии. При внимательном чтении можно найти и некоторые детали, относящиеся к технике его времени. На протяжении всего средневековья энциклопедия Исидора Севильского пользовалась огромной популярностью, и для многих, наряду с «Естественной историей» Плиния, являлась «кладезем премудрости»; в частности, она послужила одним из источников для позднейших энциклопедий, рассчитанных на сравнительно более широкие круги любознательных читателей.

Но здесь нас интересует другое: соотношение с произведением Рабана Мавра «О вселенной». Весь конкретный материал Рабан взял у Исидора дословно, чрезвычайно усилив теологический и морально-аллегорический элемент. Во-первых, книг уже не 20, а 22 — по числу книг Ветхого завета. Во-вторых, сочинение уже не начинается с книги «о науках и искусствах», а с книги о боге, «создателе нашем, главе и начале всех вещей». И в-третьих, то единственное, что Рабан добавил, дословно повторяя Исидора, это — ссылки на священное писание и аллегорические толкования. Таким образом, скудные естественно-научные сведения о мире, сообщаемые Исидором, у автора IX в. целиком превратились в простое средство религиозно-морального наставления [5].

Столь же глубокое безразличие и равнодушие к познанию физических законов природы характеризовало восточную, так называемую патристическую («святоотеческую») литературу. Примером могут служить «Беседы на шестоднев» (т. е. проповеди о шести библейских «днях творения») Василия, епископа Каппадокийского, прозванного Великим (329—379),

[5] Независимо от вопросов этимологических естественнонаучные сведения изложены в небольшом произведении Исидора «О природе вещей» — зародыше позднейших популярных энциклопедий. И в данном случае перед нами компиляция из античных источников, включая даже поэму материалиста Лукреция (например, приведено его объяснение молнии, см. выше, стр. 78).

и «Слово о правой вере» Иоанна Дамаскина (ум. после 754 г.). Первый, ставя вопрос о том, что же держит Землю в мировом пространстве, висит ли она «сама по себе», или ее держит вода, отвечал, что в конце концов это не так уже важно: самое главное, в обоих случаях нельзя отступать «от благочестивого разумения» и следует признавать, что «все в совокупности содержится силою творца». Предоставляя античным ученым самим «низлагать друг друга» в спорах о физических явлениях, Василий предлагал благочестивый совет не касаться «рассуждения о сущности» и верить Моисею, что бог сотворил небо и землю, рассматривать познание физического мира лишь как путь к познанию бога [6]. Иоанн Дамаскин, изложив античные представления о сферическом небе и библейские представления о нем, как о «коже», распростертой над Землей, заявлял, что будь это так, или будь это иначе, во всяком случае все возникло и устроено «божьим повелением». Оба сочинения — и Василия Великого и Иоанна Дамаскина — получили широкое распространение на Ближнем Востоке, переводились на болгарский, армянский, грузинский языки, имели хождение в древней Руси. В частности, «Шестоднев» Иоанна Экзарха болгарского (X в.), основанный в значительной мере на «Шестодневе» Василия Великого, рано стал известен древнерусским книжникам.

Чтобы не заслужить упрека в пристрастности, предоставим слово Пьеру Дюэму, которого никак нельзя заподозрить во враждебности к христианской культуре. Вот что он писал о патристической литературе: «Отцы церкви, по-видимому, вовсе не хотят хвастаться детальным и углубленным знанием теорий, относящихся к элементам или к небесным телам; наука, которую они предполагают у своих слушателей или своих читателей (та, которой, видимо довольствуются и они сами), состоит из небольшого числа простых и общих положений,— таких, которые мало-помалу в результате споров между учеными вышли за пределы школ и которые были в ходу в беседах между людьми образованными, но не специалистами-учеными... Эти положения, циркулируя в течение долгого времени, в конечном счете потеряли все слишком тонкие и слишком сложные черты своей первоначальной формы, уподобившись монетам, которые стерлись от обращения,— их принимают без колебаний, но по ним едва можно догадаться о рисунке первоначального чекана» [7].

В только что указанных сочинениях Василия Великого и Иоанна Дамаскина в искаженной и подчас неузнаваемой форме все же сохранялись обрывки античных знаний (например, пред-

[6] Василий Великий. Беседы на Шестоднев. Троицкая Сергиева лавра, 1902, стр. 16 и 18—19.

[7] P. Duhem. Le système du monde, t. II. Paris, 1914, p. 395—396.

ставление о шарообразности Земли, античное учение о четырех элементах или стихиях). Примером еще большего огрубения мысли могут служить на Западе сочинения Лактанция (ум. в 325 г.), высмеивавшего учение об антиподах, а на Востоке — «Христианская топография» Косьмы Индикоплова, написанная около 547—549 гг.; ее автор, стремясь держаться библейских воззрений, считал Землю плоской, а небо — «твердью» или своего рода сводом над этой плоской Землей.

Таковы общие черты, роднившие западноевропейскую и восточную литературу раннего христианского средневековья. Но нельзя не указать и на некоторые существенные черты отличия. В Византии в большей мере и дольше сохранялись элементы эллинистической традиции. Так, на Западе в глухую пору средневековья возникла филологически дикая этимология, выводившая греческое слово «механика» из латинского слова moechor (прелюбодействую) и имевшая целью принизить «механические искусства» в сравнении с искусствами «свободными» и с религиозным созерцанием. У византийцев же слово «механик» на всем протяжении существования Византийской империи продолжало обозначать квалифицированного, разносторонне образованного инженера, «искусника», нередко занимавшего видное общественное положение, умевшего строить здания и крепостные сооружения, конструировать строительные механизмы и военные машины.

Строитель константинопольского собора Софии, Анфимий Тралльский восхвалялся византийскими историками как зодчий и «строитель машин», достигший «вершин математики»; работавший с ним Исидор Милетский также именовался «механиком». Анфимий поддерживал связь с видными александрийскими математиками, в частности с Евтокием Аскалонским, комментатором Архимеда и Аполлония. Исидор Милетский также занимался научно-литературными занятиями — комментированием и дополнением книг Архимеда и Евклида — и основал в Константинополе нечто вроде математической школы.

В трактате о зажигательных зеркалах Анфимий старался дать доказательство, что лучи, выходящие из одной точки, могут вновь собраться в одну точку лишь при эллиптической форме зеркальной поверхности. Отвергая легенду об Архимеде, якобы сжегшем неприятельский флот посредством сферических зеркал, Анфимий пытался тем не менее сконструировать сложную систему плоских зеркал для зажигания отдельных предметов. Ссылаясь на книгу Апполония о зажигательных зеркалах, Анфимий указывал, что фокус сферического зеркала не совпадает с центром последнего. Он впервые доказывает также, что лучи, параллельные оси параболического зеркала, отражаются под одинаковыми углами, сходясь в одну точку.

Существует рассказ о том, как Анфимий привел в сотрясение дом своего соседа, с которым он был не в ладах, посредством пара, проведенного через трубы, подражая в этом случае, по словам византийских историков, природе, которая также вызывает землетрясения посредством паров, заключенных в недрах Земли. Этот рассказ интересен тем, что он раскрывает представления ранних византийцев о соотношении техники и науки: чтобы достичь практических результатов, техника должна опираться на знание природных закономерностей, «подражая им», т. е. осуществляя те или иные природные процессы в искусственно создаваемых условиях.

Одним из источников жизненно-практических сведений служили для византийцев сочинения Герона, плохо известные на Западе в средние века. Об интересе византийцев к этому автору свидетельствуют многочисленные вставки, изменения, переработки, которые так осложнили «геронов вопрос», окончательно не проясненный до настоящего времени. Отметим, в частности, строительные задачи, содержащие указания на способы вычисления объемов и поверхностей колонн, объемов сводов и т. д. Любопытно, что устройство так называемых «живоносных источников» представляет известную аналогию фонтанам и другим «чудесным» аппаратам, описанным в «Пневматике» Герона. Технические указания Герона использовал во времена императора Феофила (в 829—842 гг.) механик Лев при устройстве «Соломонова трона» в Константинопольском дворце; возле этого трона стояли фигуры движущихся и рычащих львов [18].

В отличие от античных платоников, резко противопоставлявших прикладную и чистую математику, Герон открыто основывался на инструментальных решениях математических задач, выбирая притом такие, которые наиболее пригодны в «ручном труде». К Герону, видимо, восходят мысли, сохраненные в «математическом сборнике» Паппа: «чистая» математика не принижается оттого, что ее применяют к решению задач практической жизни. Во введении к трактату о военных машинах Герон придал механике даже философское значение, утверждая, что человек находит философическую невозмутимость духа (атараксию) в строительстве военных орудий. Это дало повод византийцам именовать Герона не только «механиком» и «математиком» (что уже само по себе звучало лестно и гордо), но и «философом». Понятие «философии» в этом случае резко расходилось с тем представлением о философии, которое сложилось в раннем средневековье на Западе.

---

[8] См. G. Brett. The automata in the bysantine «trone of Solomon». Speculum, v. 29, 477, 1954.

И тем не менее, при большем сохранении античных (эллинистических) традиций в среде византийских техников, исторические условия в целом не благоприятствовали дальнейшему развитию античного научного наследия.

Закрытие философских «языческих» школ (и, в частности, афинской) при Юстиниане в 529 г. повлекло за собою эмиграцию многих греческих ученых в Персию ко двору Хосроя I. Вместе с сирийскими несторианами, которые были объявлены «еретиками» и также переселились в Персию, эти греческие ученые способствовали последующему распространению античной науки на Ближнем Востоке: многие произведения, переведенные с греческого языка на сирийский, впоследствии были переведены на арабский язык, что содействовало первому расцвету науки у арабов.

Другой путь греческой науки к арабам шел из Александрии, где научные школы просуществовали до 640 г., когда войсками Омара была разрушена александрийская библиотека. Из ученых VI в. заслуживает внимания комментатор Аристотеля Иоанн Филопон, о котором несколько подробнее речь будет дальше (стр. 126). Через Антиохию, где остатки александрийской учености «акклиматизировались» в начале VIII в., и Харран, куда они дошли в середине IX в., александрийская наука достигла Багдада.

Переселившийся из Харрана в Багдад математик и астроном Тебит ибн-Курра (род. в 826/827 или 836/837 гг.— ум. в 901 г.) явился основателем целой школы переводчиков, занимавшихся переводами научной литературы с греческого и сирийского языков на арабский. Сам он написал книгу о римских (неравноплечих) весах (по-арабски «карастун»), которая получила в латинском переводе название «Liber Karastonis» и которая по своему содержанию примыкает к эллинистическим трактатам на те же темы.

Примером, свидетельствующим о ранних культурных связях арабского мира с Западом и одновременно о его техническом превосходстве, является сообщение о водяных часах, которые Гарун ар-Рашид подарил в 807 г. Карлу Великому.

IX—XI вв. явились периодом большого подъема науки в странах арабского Востока. В наши задачи не входит освещение успехов математики, астрономии и медицины. В физике наибольший прогресс стал заметен в области геометрической оптики и статики, а отчасти в гидравлике.

Наряду с учеными, являвшимися уроженцами приземноморья, выдвинулись ученые Средней Азии, многие из которых в результате неблагоприятных политических условий вынуждены были работать за пределами своей родины. Так, выдающимся ученым был Абу-Наср Мухаммед ал-Фараби

(ум. в 950/1951 гг. в возрасте около 80 лет), уроженец Фараба (к северу от Ташкента). Деятельность его протекала в Багдаде, Сирии и Египте. Им были написаны комментарии к естественнонаучным произведениям Аристотеля, не известным в то время на христианском Западе («Физика», книги «О небе», «Метеорология»), не говоря уже о комментариях к астрономическому труду Птолемея и математическим трудам Евклида.

Широкое распространение в Европе и Азии получили труды Абу-Али Ибн-Сины (980—1037 гг.) [9], родившегося недалеко от Бухары и ставшего известным Европе под латинизированным именем Авиценны.

В гениальной поэме Данте Ибн-Сина был поставлен в одном ряду с величайшими учеными древнего мира:

Там геометр Евклид, там — Птолемей,
Там Гиппократ, Гален и Авиценна... [10]

Не останавливаясь подробнее на классическом монументальном «Каноне медицины», отметим лишь, что Ибн-Сина написал свыше ста трудов по медицине, физике, алхимии, музыке, математике, философии и другим дисциплинам. Энциклопедия, озаглавленная «Книга исцеления», содержит раздел, посвященный специально физике. В «Физике» Ибн-Сина исследовал философские вопросы движения, силы, пустого пространства, позднее занимавшие умы средневековых ученых Запада. Специальный раздел «Физики» посвящен геометрической оптике.

Современником Ибн-Сины был Абу-ар-Рейхан Мухаммед ибн Ахмед ал-Бируни (973—1048), который родился в пригороде Гурганджа (Хорезм) [11]. Для истории физики представляет большой интерес его трактат по минералогии «Собрание сведений о познании драгоценных минералов», законченный им в 1048 г., незадолго до смерти [12]. Работая над книгой, автор не ограничивался использованием обширной литературы, но весьма внимательно собирал сведения у практиков, у торговцев драгоценностями, ювелиров, мастеров по обработке минералов и металлов, старался сам проверить на опыте те данные, которые почерпнул из книг и устных рассказов.

Видным оптиком XI в. был египетский ученый Ибн ал-Хайсам (или, в латинизированной форме, Алхазен, ок. 965—1039 гг.). В западном халифате (на Пиренейском полуострове) протe-

[9] Год рождения Ибн-Сины нельзя считать точно установленным. Имеется указание, что он умер в 1037 г. на 57-м году жизни. Другие источники указывают 985/986 и 983/984 гг. как год его рождения.

[10] Данте. Ад, IV, стихи 142—143.

[11] Прозвище «ал-Бируни» означает «родившийся вне города».

[12] См. Г. Г. Леммлейн. О минералогическом трактате Бируни — среднеазиатского ученого XI в. В книге «Очерки по истории геологических знаний», 1, М., 1953, стр. 199—206.

кала деятельность Ибн-Рошда (Аверроэса, 1126—1198 гг.), получившего известность главным образом благодаря своим комментариям к Аристотелю, которые стяжали ему прозвище «Комментатора».

Прогресс технических и научных знаний был неразрывно связан с прогрессом философской мысли, что неизбежно приводило к конфликту с господствующей религиозной системой. Так, в сочинении «О вечном движении небесной сферы» ал-Фараби защищал «еретическое» с точки зрения Корана учение о вечности мира. Ал-Бируни был глубоко убежден в неизменности и всеобщности законов природы. «Действия природы,— говорил он,— всегда одни и те же при одинаковых обстоятельствах». Рассуждая о причине подъема воды в бьющих фонтанах, ал-Бируни порицал тех людей, которые «приписывают божественной премудрости то, чего они не знают в науках физических». Он упрекал тех, кто привык «смешивать научные вопросы с религиозными преданиями». Попытка спастись от грозовой тучи путем заклинаний и магических средств, по его определению,— «жалкое убежище для тех, кто не понимает действительных причин явлений». Получить правильное представление о дождях, утверждал он, можно только «изучив положение гор, как дуют ветры и движутся тучи».

Как мы уже сказали, в странах арабского Востока из отраслей физики больше всего разрабатывались вопросы статики и оптики. В частности, особое внимание привлекал вопрос о тщательном определении удельных весов, в особенности драгоценных камней и металлов. Им занимались астроном и математик Санад ибн-Али (ум. после 864 г.), знаменитый врач ар-Рази (Разес, ум. в 923—924 г.), а также Ибн-Сина.

В упоминавшемся выше (стр. 88) сочинении ал-Бируни приведены данные, весьма мало отличающиеся от современных. В качестве эталона для минералов ал-Бируни избрал 100 весовых единиц сапфира (синего яхонта), обращаясь к нему, как «обращаются к закону». Для металлов в качестве эталона он принял золото.

Труды ал-Бируни по исследованию удельных весов продолжил ученый ал-Хазини, написавший в 1121—1122 гг. в Хорезме «Книгу о весах мудрости» [13]. Описываемые в этом труде «весы мудрости» служили именно для указанной цели. Автор отметил целый ряд практических преимуществ своего прибора: весы позволяют отличать чистый металл от подделок, распознавать металлические сплавы, определять настоящую

[13] Трактат ал-Хазини был найден и частично опубликован в английском переводе русским ориенталистом Н. В. Ханыковым: «Analysis and extracts of Book of the balance of Wisdom», Journal of the Americam Oriental Society, v. 6, 1860, p. 1—128.

ценность различных монет; лучшим их качеством является то, что они дают возможность различать настоящие драгоценные камни и поддельные.

Наряду с описанием прибора и данными об удельных весах, книга содержит теоретический трактат по механике, посвященный определению центров тяжести, весовой потере тел в воде, равновесию плавающих тел, сферической форме жидкости, находящейся в равновесии и т. д. [14]

Арабская литература по геометрической оптике начинается с трудов ал-Кинди (ум. ок. 873 г.), занимавшегося ею в связи с астрономией, которая в те годы была тесно связана с астрологией. В основном использовано античное наследие — произведения Евклида, Герона, Птолемея.

Как было упомянуто выше, в «Физике» Ибн-Сины также уделено место вопросам оптики. Объясняя явления света истечением материальных частиц, Ибн-Сина считал скорость света очень большой, но конечной, расходясь в этом отношении с Аристотелем и большинством его последователей, полагавших, что свет мгновенно распространяется в прозрачной среде.

Значительным шагом вперед явилось сочинение Алхазена, посвященное оптике [15]. Автор выходит здесь за пределы чисто геометрических построений и продвигает вперед исследование физиологических процессов зрения. Вместе с тем более углубленно изучаются и геометрические вопросы. В катоптрике имя Алхазена носит задача, заключающаяся в определении точки зеркала при заданных положениях предмета и глаза.

Подобно Ибн-Сине, Алхазен склонялся к теории истечения и потому также считал скорость света конечной. Трактат Алхазена содержит одно из самых ранних (если не самое раннее) упоминаний о камере обскуре, которая ранее всего стала использоваться для астрономических целей (определение видимого диаметра Солнца и Луны). Последующие упоминания о ней относятся к первой половине XIV в. (Калсал-ад-дин в Иране и Леви бен-Герсон в южной Франции).

Алхазену была известна также способность полусферической линзы увеличивать предметы,— для этой цели рекомендуется класть ее плоской поверхностью на рассматриваемый предмет

---

[14] В качестве одного из своих предшественников, также занимавшихся этими вопросами, ал-Хазини упоминает сотрудника Омар Хайама, математика Музаффар ал-Асфузари. Теми же проблемами занимался несколько позднее Самуил ибн-Аббас (ум. в Мараге после 1174 г.).

[15] См. V. Ronchi. Storia della luce. 2 edizione, Bologna, 1952, p. 33—47; Sul contribuito di Ibn-al-Haitham alle teorie della visione e della luce. Actes du Septième Congrès International d'Histoire des Sciences, Jérusalem, Août 1953, Paris, p. 516—521.

Интересна попытка определить границы земной атмосферы: исходя из утверждения древних, что предел сумерек соответствует углу опускания Солнца под горизонтом, равному 18° и полагая (неверно), что световой луч отражается только в одной верхней точке, проходя через слой атмосферы по прямой, Алхазен определял высоту ее в 52 000 шагов.

Используя данные, полученные средневековыми врачами (ар-Рази, Ибн-Сина и др.), Алхазен подробнее, чем античные авторы, описал строение глаза. Однако ни у него, ни долгое время спустя еще не были раскрыты функции сетчатки: по Алхазену, изображение получается в хрусталике. В сочинении исследованы многие вопросы зрительного восприятия: смешение цветов при быстром вращении окрашенного в разные цвета диска, оценка величины светил у горизонта, влияние сумеречного освещения на яркость и различимость цветов.

Успехи в определении удельных весов, развитие геометрической оптики свидетельствуют о более глубоком проникновении в физику количественных, или, говоря шире, математических методов. В этой связи интересно то развитие, которое получила у арабских ученых идея «градусов температуры», выдвинутая античными медиками (см. стр. 74). Учение о «градусах лекарств» приобрело здесь впервые математическую форму и привело к первым размышлениям о «температурах» смесей, т. е. к попыткам вычислить градус «сложного» лекарства по градусам «простых» его ингредиентов.

Первые такие попытки были сделаны ал-Кинди и Аверроэсом. Согласно первому, четыре градуса тепла (и соответственно холода) образуют геометрическую прогрессию (2 : 4 : 8 : 16), согласно второму — прогрессию арифметическую (1 : 2 : 3 : 4), т. е. такую же, какую образуют градусы современных термометров.

На числовых примерах ал-Кинди решал задачи двух типов: а) определить градус смеси, или «сложного» лекарства, если известны градусы компонентов, и б) определить количество каждого из веществ, которые необходимо взять для того, чтобы противоположные качества пришли в состояние равновесия, «темперации». Если обозначить через C и c, F и f градусы теплоты и градусы холода двух веществ, а через M и m — их количества, то ответ на первую задачу дает формула

$$\frac{MC + mc}{MF + mf},$$

а на вторую —

$$\frac{C - F}{f - c}.$$

В меньшей степени было математизировано учение о «градусах лекарств» у Аверроэса, который исходил из аристотелевского положения, что действовать друг на друга могут только противоположности: теплое становится менее теплым под действием холода, т. е. менее теплое тело действует на более теплое лишь в той мере, в какой оно содержит более холода. Поэтому при смешивании одинаковых количеств «холодного» и «теплого» вещества, по Аверроэсу, температура смеси должна быть равна алгебраической сумме градусов, например $-2°$ и $+4°$ дают $+2°$. Если же смешиваются в равных дозах вещества, имеющие, например, $+1°$ и $+3°$, то, полагал Аверроэс, они не могут дать $+2°$, поскольку такая температура получается при смешивании веществ, имеющих $-2°$, и $+4°$; средняя температура должна быть больше $+2°$; насколько — Аверроэс не указывает.

Наиболее интересным является, пожалуй, третий вариант теории, о котором упоминает ал-Кинди и который, следовательно, был предложен в IX в., а может быть, и раньше. Сущность его сводится к следующему: сумма градусов в любом веществе принимается равной 8. Следовательно, в темперированной смеси 4 части тепла и 4 холода, в теле, имеющем $+1°$, содержится 5 частей тепла и 3 части холода и т. д. вплоть до $+4°$— «высшего» градуса, содержащего 8 частей тепла и 0 частей холода (то же mutatis mutandis — применительно к градусам холода).

Согласно этой концепции, получалась более правильная температура смеси, чем по выкладкам Аверроэса. Например, при смешении веществ с $-1°$ и $+3°$ имеем следующий расчет:

вещество с $-1°$	3 части теплоты	5 частей холода
вещество с $+3°$	7 частей теплоты	1 часть холода
смесь	10 частей теплоты	6 частей холода

Отношение $10 : 6 = 5 : 3$ соответствует температуре смеси $+1°$.

Все три варианта стали с течением времени известными на Западе и получили там дальнейшее развитие. Как мы увидим ниже (стр. 113), на этой основе Роджер Бэкон дал правильный теоретический вывод калориметрической формулы, гораздо позднее обоснованной Г. В. Рихманом экспериментально.

Заметим, что математический аппарат учения о «градусах лекарств» не был изобретен применительно именно к данной цели: ученые воспользовались уже готовым аппаратом, поскольку подобные задачи о «температуре» смесей решались по аналогии с практическими задачами, возникавшими тогда, когда приходилось иметь дело со смешением двух и более сыпучих или жидких тел разной стоимости. При отсутствии термометров

и возможности экспериментальных измерений старинная литература о «градусах лекарств» неизбежно должна была работать на холостом ходу и неизбежно схоластизироваться. И тем не менее нельзя пройти мимо этого учения о «градусах лекарств»: оно свидетельствовало о тенденции к рассмотрению количественной стороны явлений, хотя в то же время обнаруживало и разрыв между этими тенденциями и экспериментальными возможностями [16].

За пределы нашей темы выходит рассмотрение технических успехов в средневековом Китае. Достаточно напомнить, что книгопечатание было известно в Китае задолго до того, как оно получило распространение в Европе: самая ранняя печатная книга (хранящаяся в Британском музее) датируется 868 годом [17]. О размахе гидротехнического строительства свидетельствует хотя бы большой канал между Ханбалаком и Ханькоу. Выше уже говорилось о знакомстве древних китайцев со свойствами магнита. По-видимому, в отдаленные времена стал применяться компас.

Китайцам бесспорно принадлежит первое описание магнитного склонения. Оно содержится в энциклопедическом сочинении математика и астронома Шен Куа (1030—1093), которое озаглавлено: «Опыты из потока сновидений». Здесь мы читаем: «Те, кто делают фокусы, натирают иглу магнитным камнем. Тогда она может показывать юг. Однако постоянно она отклоняется немного к востоку,— она не показывает в точности юг. Когда эта игла плавает на воде, она очень беспокойна. В случае прикосновения ногтями пальцев к краю сосуда, в котором она плавает, можно заставить ее двигаться весьма сильно, однако она продолжает скользить и легко падает. Лучше подвешивать ее, чтобы дать продвинуться ее силе наилучшим образом. Вот этот способ: берут кусок нитки из середины мотка; при помощи кусочка воска, величиною с горчичное зерно, ее прикрепляют точно к середине иглы, которую подвешивают в таком месте, где нет ветра. Тогда игла постоянно показывает юг. Среди иголок существуют и такие, которые при натирании указывают север. У наших фокусников есть иголки, показывающие юг, и иголки, показывающие север. Происхождение этого свойства магнита указывать юг, как и свойства кипариса ука-

---

[16] Подробнее см. в статье: В. П. З у б о в. Калориметрическая формула Рихмана и ее предыстория. Труды ИИЕиТ АН СССР, т. 5. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 69—93.

[17] В данном случае речь идет о печатании при помощи целых досок, известном, видимо, в Китае и в еще более раннее время. К середине XI в. относится печатание наборного типа. См. Th. F. C a r t e r. The invention of printing in China and its spread westward, 2 ed., N. Y., 1955 (первое издание — 1925).

зывать запад, никто не мог объяснить»[18]. Аналогичное свидетельство о магнитном наклонении имеется в сочинении «Естественная история» (Pen-tsao-yan-i) ученого Кеу Цзун-ши, написанном в 1111—1117 гг.

Мы рассмотрели состояние физической науки в первые столетия средневековья на Западе и Востоке и могли убедиться в превосходстве восточной науки над западной в этот период.

Началом новой фазы научного и технического развития на Западе можно до некоторой степени условно считать конец XI в., когда Запад пришел в более тесное соприкосновение с Востоком. Энгельс писал: «...со времени крестовых походов промышленность колоссально развилась и вызвала к жизни массу новых механических (ткачество, часовое дело, мельницы), химических (красильное дело, металлургия, алкоголь) и физических фактов (очки), которые доставили не только огромный материал для наблюдений, но также и совершенно иные, чем раньше, средства для экспериментирования и позволили сконструировать *новые* инструменты. Можно сказать, что собственно систематическая экспериментальная наука стала возможной лишь с этого времени»[19].

Прежде чем перейти к более подробному рассмотрению этих технических и научных сдвигов на Западе, отметим, что и на Востоке продолжался прогресс техники, в частности в области использования движущей силы воды.

Мухаммед ал-Сахати в середине XII в. построил в воротах Дамаска знаменитые часы, которые позднее (в начале XIII в.) привел в исправность Ридван ибн ал-Сахати, написавший особый трактат об их конструкции и применении. Устройством водяных часов, фонтанов и других гидравлических аппаратов занимался в те же годы ал-Джазари. В 1236 г. на Оронте в Сирии устроил знаменитые водяные колеса Кайсар ибн Али-ал-Касим.

На Западе в период 1050—1200 гг. наблюдается интенсивный рост городов, обмена, и в частности денежного обмена, развитие средств сообщения. Водяные мельницы, находившие ограниченное применение в Римской империи и применявшиеся на Западе в VIII—X вв., получают значительно большее развитие в X—XII вв. Первое упоминание о применении водяных колес в Англии содержится в документе, относящемся к 838 г. В X столетии водяные колеса проникли в Ирландию, а позднее, в XII веке, они получили распространение в Скандинавии

[18] E. B i o t. Note sur la direction de l'aiguille aimantée en Chine, et sur les aurores boréales observées dans ce même pays, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, t. XIX, 825 (1844).

[19] Ф. Э н г е л ь с. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 145—146.

и Прибалтике. В том же веке они применялись на горных рудниках Гарца и серебряных рудниках Триента.

Ветряные мельницы, известные персам в VII и арабам в в X вв., распространились при посредстве арабов на Пиренейском полуострове и оттуда проникли в XII в. в Европу. Бумажные мельницы, появившиеся впервые в Испании (1238), получили распространение и в других европейских странах. Уже с IX в. значительно прогрессирует устройство метательных военных орудий [20].

Развивается гидротехническое строительство, особенно в Италии: достаточно назвать Большой Канал (Naviglio grande) в Милане (1179—1258), мол (около 1276—1283) и водопровод (1295) в Генуе.

Показательно появление и распространение технических трактатов, или точнее рецептурных сборников, относящихся преимущественно к изготовлению красок. Вслед за сборником «Составы для крашения» («Compositiones ad tingenda»), появившимся во второй половине VIII в. и содержавшим технические рецепты эллинистического происхождения, была составлена «Книга Гераклия о красках и искусствах римлян» (конец X в.). Из двух относящихся к разным периодам частей состоит «Малый ключ живописи» («Mappae clavicula», X в. и первая половина XII в.). Особого внимания заслуживает «Записка о различных ремеслах» («Diversarum artium schedula») монаха Теофила, жившего, по-видимому, в Германии в прирейнской области в середине X в. (а не в конце XI — начале XII в., как это часто указывается в литературе). В сочинении Теофила использован греко-египетский и византийско-мусульманский опыт; оно посвящено технике миниатюры, изготовлению стекла, а также вопросам металлургии; особый экскурс касается устройства музыкальных органов.

На период 1096—1270 гг. приходится расцвет медицинской школы в Салерно (к югу от Неаполя), получившем гордое название «Гиппократова города». Начавшая формироваться в IX в., эта школа уже в следующем столетии пользовалась громкой славой. В первый период ее развития наука носила здесь чисто эмпирический и практический характер. Школа ставила своей задачей черпать знания из «замыслов самой природы». Принадлежность к духовному званию никогда не была в Салернской школе условием преподавания, среди преподавателей известны даже женщины. В XI в. школа обогатилась переводами важнейших сочинений древнегреческих и

[20] См. B. G i l l e. Le machinisme au Moyen Age. Actes du VI-e Congrès international d'histoire des sciences (14—21 août 1950), v. II, 1953, p. 601—606.

восточных медиков, обратившись к теории, но сохранив вместе с тем верность принципам наблюдения.

XII столетие поистине заслужило название «века переводов». Западная Европа ближе познакомилась с целым рядом классических произведений древности, а также восточного средневековья.

Англичанин Аделяр Батский (время его деятельности 1116—1142 гг.) перевел «Начала» Евклида и астрономические таблицы ал-Хорезми, содержащие таблицы синусов, Герман из Каринтии в 1143 г.— «Плоскошарие» Птолемея, Роберт из Честера в 1145 г.— «Алгебру» ал-Хорезми. Особенно много переводов было сделано Герардом Кремонским (род. ок. 1114 г., ум. в 1187 г.); из них упомянем сочинения Евклида, Архимеда, Птолемея, Гиппократа, Галена, ал-Фараби и Авиценны [21]. В конце XII в. была переведена на латинский язык «Оптика» Алхазена, легшая в основу оптических произведений западноевропейских ученых XIII в. (Вителo, Пекам; см. ниже, стр. 112).

Целая школа переводчиков образовалась в Толедо. Герман из Каринтии и Роберт из Честера прожили несколько лет в Испании, Герард Кремонский изучал арабский язык в Толедо и умер в этом городе. Другим центром была Сицилия, где арабы господствовали с 902 по 1091 г. и где после норманского завоевания мусульмане продолжали составлять значительную часть населения. Здесь была переведена в XII в. с арабского языка «Оптика» Птолемея и непосредственно с греческого «Оптика» Евклида, «Катоптрика» псевдо-Евклида, «Пневматика» Герона и его же «Катоптрика», приписывавшаяся в те времена Птолемею.

Расширение технического опыта, наряду с расширением культурных связей и обогащением научной литературы, способствовало вместе с тем расширению умственного кругозора. Внимание к природе как таковой приводило к постепенному освобождению от чисто символического воззрения на физический мир, которое было столь характерно для раннего средневековья. У Аделяра Батского в его «Естественнонаучных вопросах» можно найти утверждения, что не следует прибегать к ссылке на божество и его волю там, где человеческий разум способен и обязан раскрывать подлинные причины физических явлений. Разумеется, такая эмансипация «светского» знания должна была еще долгое время оставаться неполной, частичной.

Новые веяния стали заметны также в знаменитой шартрской школе, основанной в конце X в. и в XII в. вступившей в новую

[21] Кроме «Канона медицины», переведенного Герардом Кремонским, в середине XII в. была переведена и «Физика» Авиценны Иоанном Севильским (?) и Доминго Гундисальви.

фазу своего развития. Шартрскую школу отличали в первую очередь художественно-гуманитарные интересы. Ее представители не были в строгом смысле слова естествоиспытателями; правильнее будет назвать их натурфилософами, и притом натурфилософами явно еретического оттенка. В отличие от позднейших схоластов представители шартрской школы пользовались такими художественными формами и приемами, как диалог, дидактическая поэма, поэтические олицетворения и иносказания. Они щеголяли грецизмами. В научное изложение они вводили образы античной мифологии. Они, разумеется, хотели (и совершенно искренне) оставаться христианами, но в то же время развивали в поэтической форме принципы натурфилософии, которые плохо вязались с догмами церковной теологии. Наиболее видными представителями шартрской школы в первой половине XII в. были Тьерри (или Теодорих) Шартрский и его младший брат Бернард.

В начале своего «Шестоднева» Тьерри прямо заявлял, что будет исследовать космологические вопросы «с точки зрения физики», оставляя в стороне моральные и аллегорические толкования. Как он, так и его единомышленники исходили из натурфилософского диалога Платона «Тимей», который был им известен в основном по переводу и комментарию Халкидия (см. выше, стр. 81) и по далеко не полному переводу Цицерона. Тем не менее шартрские натурфилософы были «платониками» довольно своеобразного свойства. Проблема возникновения мира из бесформенной материи, объяснение разнообразия видимых вещей из пластического преобразования этой первичной материи — вот что интересовало шартрских натурфилософов. «Первичная материя» не была для них предельной, неосязаемой абстракцией, а конкретной, чувственно-осязаемой массой, неким первичным «хаосом», или «смешением» элементов, которое приводилось в гармонию, правда, сверхматериальным началом, но во всяком случае не христианским богом. В стихотворной и прозаической форме шартрские натурфилософы и их единомышленники неустанно повторяли, что ничто не уничтожается, что изменчива и текуча лишь форма, в которой предстают вещи, что «никакая субстанция не гибнет». Элементы природы существуют постоянно, гибнут и возникают лишь их сочетания: всякая «природа» имеет «постоянное пребывание», уничтожаются лишь «произведения природы». Впоследствии, на рубеже XII и XIII столетий, шартрская концепция первичной материи приобрела открыто пантеистический характер в так называемой «амальриканской ереси» Амальрика Беннского (или Шартрского) и Давида Динантского. Интересно, что шартрское учение о первичной материи несколько позднее нашло отклик

в различных популярных энциклопедиях, в том числе и в «Луцидариусе», который в XVI в. был переведен на русский язык и получил широкое распространение на Руси.

В Шартре учился Гильом из Конш (или Вильгельм Конхезий), уроженец Нормандии, основавший школу в Париже и одно время живший при дворе герцога Нормандского, Готфрида Плантагенета Красивого [22]. Его сочинения интересны смелыми для своего времени высказываниями об эпикурейской атомистике. По его словам, утверждение эпикурейцев, что мир состоит из атомов, правильно, хотя вслед за тем он и заявлял (как позднее Пьер Гассенди), что вечность и несотворенность атомов — «басня». Воспринятые через посредство античных и некоторых средневековых сочинений по медицине атомистические представления Гильома остались отрывочными и, разумеется, не могли найти приложения к конкретным вопросам естествознания. Его сочинения, стремившиеся «охватить все мироздание», прошли по существу незаметными для науки и нашли свой отклик только в популярных энциклопедиях, представлявших пестрое собрание разнородных, по большей части книжных, непроверенных и нередко фантастических сведений. Такова была и судьба многих других произведений, отражавших новые веяния. Вот почему можно только условно и с оговорками говорить о Ренессансе XII в. и во всяком случае нельзя вести *прямую* линию преемственного развития от него к Ренессансу XV в. Историческое развитие было несравненно сложнее и извилистее.

Проблескам и вспышкам свободной мысли то там, то здесь могли в то время отчасти благоприятствовать те постоянно менявшиеся соотношения между церковными и светскими силами, между папой и феодалами, которые образовывали различные констелляции, возникавшие и распадавшиеся. Говорить более или менее свободно об Эпикуре Гильом мог при дворе Готфрида Красивого, враждовавшего с норманскими епископами, отлученного папой от церкви, мало того — отвергшего папское прощение. Но создать почву для настоящего Ренессанса Готфрид не мог, да и не желал. Сколь ни просвещенным собеседником изображен герцог в сочинении Гильома, на самом деле он занимался больше воинственными набегами, разорением вражеских замков или развлекался охотой. Состав сочинения, которое написал для него Гильом, определялся его досужими вопросами: откуда град или иней, почему рождаются мальчики или девочки и т. п.

---

[22] Обычно указываемый год рождения Гильома — 1080 — оспаривается некоторыми исследователями, полагающими, что он родился не ранее 1090 г. Умер он около 1154 г.

К следующему, XIII веку, относится распространение таких изобретений, как очки, компас, порох.

Применение очков на Западе относится к концу XIII или началу XIV в.; старейшее их изображение — к середине XIV в. (фреска в Тревизо работы Томмазо Баризино Моденского, 1352 г.). Легенда о Сальвино д'Армато дельи Армати и Алессандро делла Спина как изобретателях очков давно отвергнута.

Старейшие упоминания о магнитной игле на Западе — в сочинениях англичанина Александра Некама (1157—1217), повествующего о ней не как о чем-то новом, а как о чем-то известном. О ней же сообщает Жак из Витри в своей «Восточной истории», написанной в 1219—1226 гг. Гюйо из Провена (города на одном из притоков Сены) в своей сатирической поэме «Библия» (около 1205 г.) называет магнитную иглу marinette, что указывает на ее распространение среди моряков. Таким образом, оказывается совершенно несостоятельной старая легенда о том, что компас якобы изобрел в 1302 г. Флавио Джойя из Амальфи, которому в свое время был даже поставлен в Неаполе памятник.

Появление пороха относится ко второй половине XIII в., а его применение для огнестрельного оружия — ко второй половине XIV в.

Во второй половине XIII в. на Западе появляются первые механические часы, к концу столетия уже хорошо известные в Англии. К середине XIV в. имелись сложные конструкции часов с боем и движущимися фигурами (Страсбург, Генуя, Авиньон, Болонья) [23].

К XIII в. относится создание первых университетов в разных странах Европы: в начале столетия в Болонье и Париже, затем в Падуе (1222) и Неаполе (1224). В средине того же столетия вступает в новую фазу своего развития Оксфордский университет, возникший на основе созданной гораздо ранее школы. В следующем веке к числу этих университетов прибавились университеты в Пизе (1338), Павии (1359), Кракове (1364), Вене (1365), Гейдельберге (1386), Ферраре

---

[23] Новейшие исследования показывают, что и в данном случае Восток опережал средневековый Запад. Принцип механических часов давно был известен китайцам. В сочинении Су Сунга, написанном в 1090 г., содержится описание прибора, приводящего в движение армиллярную сферу и небесный глобус, в котором для регулирования движения применено наливное колесо, соединенное с зубчатой передачей. Имеются основания думать, что на том же принципе были построены и более ранние астрономические часы, датируемые 725 и 979 гг., а возможно, и еще более ранние (II—VI вв.). См. J. Needham, Wang Ling, D. J. Price. Chinese astronomical clockwork. Nature, v. 177, 600, 1956.

(1391), Эрфурте (1392 г.) и других городах. В отличие от замкнутых монастырских школ локального значения, сформировались учебные заведения нового типа, открывавшие доступ людям разных национальностей и присуждавшие ученые степени, которые постепенно получили общеевропейское признание. Система средневекового университетского образования при всех ее недостатках и оторванности от жизни явилась поэтому новым шагом в движении европейской науки.

Условия развития университетского образования в разных странах были различными. В Париже верховное руководство принадлежало богословскому факультету, который являлся арбитром в спорных вопросах веры. Что касается математики и естественных наук, то они преподавались на так называемом факультете искусств, занимавшем подчиненное положение. Именно на этом факультете позднее, в XIV в., в период начавшегося кризиса схоластики прежде всего сказались новые веяния. Итальянские университеты, большинство которых было основано светскими властями, находились в меньшей зависимости от духовенства, чем университеты в других странах Европы. Некоторые из них даже не имели богословского факультета, а в других этот факультет не имел того преимущественного положения, как, например, в Париже. В североитальянских университетах на несколько столетий утвердился аристотелизм в его арабской интепретации (аверроизм), в большей мере связанный с естествознанием и медициной, чем схоластический аристотелизм в других странах Европы.

Мы уже говорили, насколько обогатилась научная литература в XII в. в результате переводов, главным образом с арабского. В XIII в. в истории науки западной Европы произошло событие первостепенной важности: естественнонаучные сочинения Аристотеля в непосредственном переводе с греческого стали достоянием ученых. Ранние переводы, сделанные с арабского, были настолько темны и непонятны, что Роджер Бэкон дал о них следующий беспощадный отзыв: «Если бы я имел власть над книгами Аристотеля, я велел бы все их сжечь, потому что изучать их есть одна лишь потеря времени, причина заблуждения, умножение невежества» [24]. Нужна была длительная борьба за чистоту текста, в результате которой в 60-х гг. XIII в. Западная Европа получила новые переводы, сделанные непосредственно с греческого Вильгельмом из Мербеке, посещавшим Грецию и кроме Аристотеля переведшим сочинения Архимеда и Герона, а также греческие комментарии

[24] Compendium studii philosophiae, cap. 8. R. B a c o n. Opera quaedam hactenus inedita. Ed. J. S. Brewer, London, 1859, p. 469.

к Аристотелю таких авторов, как Александр Афродисийский, Симпликий и др. [25]

Наряду с борьбой за чистоту текста происходила, однако, и борьба иного рода, грозившая свести на нет филологические достижения. Исходя из религиозных соображений, беспощадную войну арабизированному Аристотелю объявили в XIII в. доминиканцы, и в первую очередь Альберт Больштедтский [или Великий, 1193 (или 1206)—1280] и его ученик Фома Аквинский (1225—1274). О росте «еретических» тенденций свидетельствует хотя бы тот факт, что если в 1255 г. Альберт составил по поручению папы сочинение «против Аверроэса», то Фоме в 1271 г. пришлось уже составлять сочинение против «аверроистов». Богословы Парижского университета несколько раз запрещали чтение естественнонаучных сочинений Аристотеля. Вместе с тем церковь попыталась приспособить аристотелизм к своим целям. И Альберт, и Фома старались «обезвредить» Аристотеля своими комментариями. Однако не утихавшая борьба реакционных течений с аверроизмом и позднее (в XIV в.) с номинализмом показывает, что попытки «адаптировать» Аристотеля терпели крушение, что в недрах самой церковной схоластики рождались силы, подтачивавшие ее изнутри.

В стороне от церковного аристотелизма и ортодоксального «томизма», развивавшего и акцентировавшего идеалистические, слабые стороны системы Аристотеля,— по выражению Ленина, убивавшего живое и увековечивавшего мертвое,— стояла Оксфордская школа, где в большей мере продолжали сказываться живительные воздействия восточной науки. И Роберт Большеголовый (Гроссетет), или Роберт Линкольнский (1175—1253), и его ученик Роджер Бэкон (ок. 1214— ок.1292) настойчиво выдвигали значение опыта и наблюдения, усердно разрабатывали конкретные вопросы оптики и других физико-математических дисциплин. Подобно своему учителю, Бэкон утверждал, что математика есть основа всех прочих наук,— «врата и ключ» их. Экспериментальную науку, которую, по его словам, обычно вовсе не знают ученые, Бэкон противопоставлял магии, уподобляя соотношение между ними соотношению между логикой и софистикой. Но именно в магии и колдовстве он был обвинен сам. Его дважды заключали в тюрьму. Из вторичного заключения, продолжавшегося много лет, Бэкон вышел дряхлым стариком, неспособным продолжать свои научные занятия.

---

[25] Бартоломео Мессинский перевел в XIII в. «Механические проблемы» псевдо-Аристотеля, уже ранее известные в анонимном латинском переводе.

Воображение Бэкона забегало значительно вперед по сравнению с состоянием науки и техники. Он мечтал, что можно будет с невероятного расстояния читать мельчайшие буквы и пересчитывать пылинки и песчинки, что мальчик может предстать гигантом, а взрослый показаться величиною с гору. Уверенный в силе знания, Бэкон допускал возможность построить машины, способные двигать самые большие корабли быстрее, чем это может сделать целый отряд гребцов, возможность двигать повозки с невероятной скоростью без помощи какого-либо животного. Наконец, предсказывал он, не исключена возможность сделать аппарат, позволяющий летать по воздуху подобно птицам [26].

Разумеется, нельзя, как это иногда делалось раньше, ретушировать фигуру Бэкона, придавая ему все черты ученого нового времени — тогда ее появление в XIII в. становится вообще непонятным. Бэкон только кажется одиноким; если посмотреть глубже, он отражает передовые тенденции своего времени со всеми его противоречиями.

Некоторые современные зарубежные ученые, искажая исторический облик Роджера Бэкона, стараются показать «францисканскую», «монашескую душу» этого ученого [27], либо умалить его научные заслуги. Так, Л. Торндайк утверждает, будто он «никогда не понимал, что такое экспериментальный метод» и в его сочинениях, якобы, не приведено ни одного нового факта, который не был бы уже известен его предшественникам [28]. И с той и с другой оценкой согласиться нельзя. Если Бэкон и повторял в своих произведениях отдельные высказывания многих своих предшественников, это нисколько не ослабляет колоритности и оригинальности его фигуры. С другой стороны, нельзя забывать, что в средние века всякое свободомыслие неизбежно должно было принимать религиозную форму. Если «душа Бэкона»— чисто «монашеская», то какая же душа была у тех, кто заключил его в тюрьму?

Словом, нельзя ни полностью отрывать Бэкона от исторической среды, ни растворять его в ней. Историческое место Бэкона определяется при сопоставлении его с такими фигурами, как его соотечественник Роберт Большеголовый или

---

[26] Наиболее ярко такого рода предвидения изложены Бэконом в его «Письме о тайных делах искусства и природы и о ничтожестве магии» (Epistola de secretis operibus artis et naturae et de nullitate magiae. R. B a c o n. Opera quaedam hactenus inedita. Ed. J. S. Brewer, London, 1859, p. 523—551).

[27] Так поступил, например, Р. Картон в своих монографиях: L'expérience mystique de l'illumination intérieure chez Roger Bacon. P., 1924; La synthèse doctrinale de Roger Bacon. P., 1924.

[28] L. T h o r n d i k e. A History of magic and experimental science, v. II. London, 1923, p. 649—657.

его младший современник Вителo. О трудах всех трех ученых по оптике подробнее речь будет идти дальше (стр. 111—112).

Еще более отчетливо проступает облик Бэкона при сопоставлении с авторами XIII в., наименее или вовсе не связанными со схоластическими традициями, например с математиком Иорданом Неморарием, о трудах которого по механике также будет сказано ниже (стр. 114).

Интереснейшим памятником технической мысли XIII в. является так называемый «Альбом» архитектора Виллара из Оннекура, жившего в первой половине XIII в. (время его деятельности, отраженное в «Альбоме», относится к 30-м гг. этого столетия). Палеографические и филологические исследования позволили установить, что наряду с рисунками и записями самого Виллара в «Альбоме» имеются чертежи и тексты, принадлежащие двум другим лицам, возможно — его ученикам и во всяком случае младшим современникам. Следовательно, «Альбом»— это не личная записная книжка, а своего рода «цеховая книга», в которой суммировался коллективный опыт мастеров, живших в одной местности [29].

Не говоря о чертежах и зарисовках, относящихся к строительной технике, архитектуре и живописи, отметим рисунки механической пилы и приспособлений для подъема тяжестей, описание лука, стреляющего «без промаха», и фонаря, пригодного «для монахов, чтобы носить в нем свечи». В соответствии с духом времени, проявлявшего большой интерес к автоматам и механическим игрушкам, Виллар рисует орла, голова которого способна «поворачиваться в сторону диакона, когда тот читает евангелие».

Интересно, что строительные чертежи, принадлежащие так называемому «мастеру 2», снабжены его пометкой: «Все эти фигуры почерпнуты из геометрии». В этом видна тенденция поставить строительное искусство в связь со «свободным» искусством — геометрией, а вместе с тем стремление заменить математическими правилами слепые навыки и простое подражание традиционным приемам.

Однако в целом «Альбом» остается еще на уровне эмпирических правил, без широкого обобщения и научных доказательств.

В той же связи нужно упомянуть и старейший западноевропейский трактат о магните, принадлежащий пикардийскому дворянину Пьеру из Марикура. Трактат, составленный в форме письма к другу, Зигеру де Фукокур, который был

[29] «Альбом» издавался несколько раз. Новейшее издание с обширным комментарием: H. R. Hahnloser. Villard de Honnecourt. Kritische Gesamtausgabe des Bauhüttenbuches ms. fr. 19093 der Pariser Nationalbibliotek. Wien, 1935.

военным, как и Пьер, написан в лагере при осаде Ночеры (в Апулии) и датирован 8 августа 1269 г. Уже литературная форма письма указывает на отсутствие связи Пьера со схоластической наукой. Ново и содержание письма. Представители университетского схоластического образования имели самые смутные представления о магнетизме. До некоторой степени интересовались им врачи (например, живший во второй половине XIII в. медик Жан из Сент-Амана). Энциклопедии, которые с XIII в. стали завоевывать все бо́льшую популярность, проявляли особый интерес к экзотическим анекдотам книжного происхождения. Всего лучше, разумеется, магнит был известен практикам, т. е. мореходам.

Трактат Пьера распадается на две части. В первой речь идет о распознавании магнитного железняка, способах находить полюсы, различать полюсы северный и южный; отмечается притяжение разноименных и отталкивание одноименных полюсов, указываются способы намагничивания иглы и описывается опыт с переломленным магнитом. Во второй части содержится описание двух приборов для «определения азимута Солнца, Луны и любой звезды» и особого колеса, своего рода «перпетуум мобиле». В этом же трактате упоминаются два других письма, которые автор написал или собирался написать,— о физических приборах и о зеркалах. Роджер Бэкон был высокого мнения о Пьере из Марикура, называя его dominus experimentorum («владыкой экспериментов»). Характерно и прозвище Пьера — Перегринус (странник), указывающее на его восточные странствия.

Плавающий компас, описанный Пьером из Марикура, был уже хорошо известен морякам, особенно в восточной части Средиземного моря. В частности, такой компас, примененный в восточном Средиземноморье в 1242—1243 гг., описан каирским ученым Байлак ал-Кабайаки в сочинении «Сокровище купцов» (1282—1283 гг.). Описание компаса, вращающегося на штыре, данное Пьером из Марикура, является старейшим описанием подобного рода компаса; в отличие от компаса первого типа, он был в то время известен лишь в некоторых приморских пунктах, в частности Италии.

Что касается причинного объяснения магнитных свойств, то, разумеется, в этом отношении Пьер из Марикура еще находился почти всецело в плену традиционных средневековых представлений. Поворачивание магнитной иглы к северу он туманно объяснял «соответствием» между частями или сторонами магнита и частями и сторонами неба («этот камень скрывает в себе подобие неба»). Поэтому полюс магнита, обращающийся к северу, он называл северным, а обращающийся к южному — южным. Пьер отвергал, следовательно, теорию, со-

гласно которой движение стрелки компаса объясняется притяжением залежей магнитного железняка около северного полюса Земли. Намеки на подобные представления можно встретить у современника Пьера, болонского поэта Гвидо Гвинидзелли (ум. в 1276 г.), повествовавшего о магнитных горах на севере, «дающих воздуху силу притягивать железо».

Приведенные факты показывают, что невозможно сводить историю научных знаний в средние века к истории схоластики. Те, кто пытаются это делать, невольно смыкаются с представителями клерикального лагеря, усматривающими в схоластике «магистральную» и определяющую линию развития средневековой мысли.

Накопление положительных знаний в результате расширения производственного опыта, первые ростки новых, несхоластических (хотя еще не антисхоластических) воззрений — все это подготовляло почву для кризиса схоластики, который углубился в XIV в. вместе с кризисом церкви в целом (достаточно напомнить об «авиньонском пленении» пап).

Раннее средневековье, примерно до XII в., еще не знало границы между философией и богословием; «доказательство» сводилось по большей части к цитатам из «священного писания» и «святоотеческой» литературы или ссылкам на постановления церковных соборов. В XIII в. была сделана попытка размежевать две области: «естственного разума», который вправе рассуждать, предоставленный самому себе, и «откровения», где источником знания являются традиция и авторитет. Арабское учение о двоякой истине было в корне отвергнуто церковью. Поэтому предполагалось, что «естественный разум», предоставленный самому себе, рассуждая последовательно-логически, не может приходить к выводам, противоречащим господствующей религии. Считалось, например, что бытие божие доказуемо силами «естественного разума». Но уже Фома Аквинский, один из основоположников этого компромисса, признавал, что ряд основных истин христианской религии недоказуем, например сотворенность мира (т. е. начало во времени). В этом он разделял точку зрения Моисея Маймонида (1135 — 1204), который утверждал в вопросе о вечности мира одинаковую правомерность логических доказательств «за» и «против» и вместе с тем считал здесь высшим арбитром авторитет библии. XIV в. постепенно приходил к мысли, что все религиозные истины недоказуемы, включая и традиционные доказательства бытия божия. Это было признанием, что попытки построить «рациональную» систему богословия потерпели неудачу и богословию оставалось перебираться в темную область мистики.

Таким образом, *форма* схоластического метода оторвалась от того *содержания*, ради которого она была разработана первоначально. Область применения схоластического метода в богословии значительно сузилась, но приемы его остались, выродившись в игру понятиями, в фейерверк словопрений или сложный рисунок готических узоров. Диспуты в XIV в. нередко стали напоминать рыцарские турниры, состязания в изворотливости и находчивости. В традиционную схоластическую форму облекались дискуссии по всевозможным вопросам, не только по богословским. Те же формы неизбежно принимали и новые идеи, пробивавшие в системе традиционного миросозерцания одну брешь за другой. В этих условиях было естественно, что появились первые сомнения в непогрешимости схоластического аристотелизма, адаптированного к нуждам церкви.

К 1346 г. относится осуждение папской курией, а к 1347 г.— сожжение труда Николая из Отрекура (или Автрикурского, род. около 1300 г., ум. после 1350 г.). Развивая некоторые положения античного атомизма, Николай из Отрекура решительным образом утверждал вслед за Демокритом, что в явлениях природы нет ничего, кроме пространственного движения, т. е. сочетания и разъединения атомов. Атомы вечны, они «не возникают и не уничтожаются, а лишь соединяются или разъединяются»; естественным следствием этого тезиса являлось утверждение, что количество материи неизменно («все неделимые тела — corpora athomalia — из которых состоят вещи, пребывают, и, таким образом, при осуществившемся соединении остается та же самая материя, что и раньше»). Каковы те силы, которые производят соединение и разъединение атомов, Николай из Отрекура прямо не сказал. Лишь в одном месте он сделал предположение, что в случае соединения действует сила, подобная той, посредством которой «магнит держит железо». Уплотнение и разрежение Николай объяснял сокращением и возрастанием промежутков между частицами.

Свет, по мнению Николая из Отрекура, сводится к движению частиц, отделяющихся от светящегося тела, а потому распространяется не мгновенно, но в конечный, хотя и очень малый промежуток времени. Таким образом, и в этом пункте Николай примыкал к античным атомистам, мнение которых, как мы уже видели, разделяли Авиценна и Алхазен.

Разумеется, все эти тезисы античных материалистов, которые в основном стали известными Николаю из сочинений Аристотеля и его комментаторов, не могли еще сделаться в XIV в. действенным орудием научного познания. Но появление труда Николая из Отрекура было симптоматичным,

свидетельствуя о начале кризиса схоластики. Симптоматично и то, что католическая церковь встретила в штыки эту попытку возродить некоторые положения Демокрита и принудила автора отречься от защищаемых им тезисов. Одна ласточка не делает весны, и труд Николая из Отрекура остался надолго забытым [30].

В той же связи следует вспомнить старшего современника Николая, Вильяма Оккама (ум. в 1349 или 1350 г.). Показательно, что Оккам принимал участие в борьбе против папы на стороне Людовика Баварского. Показательна также та смелость, с которой Оккам восставал против вмешательства теологии в специальные вопросы физики. Об осуждении целого ряда грамматических, логических и физических тезисов Робертом Килуордби 1277 г. Оккам отзывался так: «Утверждения, в особенности физические, не имеющие отношения к теологии, не должны быть кем-либо торжественно осуждаемы или запрещаемы, ибо в таких вещах всякий должен быть свободен и иметь возможность свободно говорить то, что ему угодно, а посему, поскольку вышереченный архиепископ осудил и запретил мнения грамматические, логические и чисто физические, его приговор должен был быть признан необдуманным (temeraria)» [31].

Значительному прояснению и очищению научных понятий способствовал номинализм Оккама, резко направленный против наводнения реального мира гипостазированными сущностями, субстанциальными формами, скрытыми свойствами и и т. д.

По Оккаму существуют слова, которые не соответствуют какой-либо реально (самостоятельно) существующей вещи. Таковы, например, термины «точка», «мгновение», «неделимое» и т. п. Таковы же все фигуральные выражения. Применение подобных слов и выражений оправдывается тремя причинами: ими пользуются ради «стихотворного размера», ради «украшения» (в ораторских речах) и «ради пользы и краткости» (в частности, в науке). Никакой беды в этом нет, если только отдавать себе отчет в подлинном значении подобных слов и оборотов. Ошибки появляются тогда, когда мы не умеем дать правильный перевод термина и гипостазируем его, т. е. представляем его себе как нечто, обозначающее отдельную самостоятельную вещь. Например, движение не есть нечто

---

[30] На русском языке о Николае и его труде см. подробнее в статье: В. П. Зубов. Николай из Отрекура и древнегреческие атомисты. Труды ИИЕиТ АН СССР, т. 10. Изд-во АН СССР, 1956, стр. 338—383.

[31] Ockam. Dialogus inter magistrum et discipulum de imperatorum et pontificum potestate, pars. I, lib. 2, c. 22. Monarchiae S. Romani imperii... tomus secundus. Ed. Goldast, Francofordiae, 1614, t. II, p. 427.

обладающее самостоятельным положительным содержанием, реально существуют лишь движущиеся тела; точка не является *составной частью* линии, но представляет собой лишь сокращенное обозначение того, что линия не простирается дальше.

Общеизвестный лозунг Оккама гласил: «множественность никогда не следует вводить без нужды» [32] или в иной формулировке: «Напрасно совершается посредством многого то, что может совершаться посредством меньшего числа» [33]. Этот лозунг нельзя сопоставлять с позднейшим прагматистским принципом «экономии мышления»: Оккам исходил из того, что «экономна» сама природа и лишь результатом этого является экономия мышления, избавленного от схоластического плюрализма «сущностей», «форм», «скрытых свойств» и т. п. Словом, не потому боролся Оккам со схоластическими «сущностями» и «формами», что их много, а потому, что им не соответствует никакая объективная реальность и они интерпретируются превратно, как некие самостоятельные вещи.

Опорным пунктом номинализма сделался факультет искусств Парижского университета, где преподавал Жан Буридан (род. в конце XIII в., ум. ок. 1358 г.). Распространителями «учения парижан» в Германии и Австрии явились ученик Буридана Альберт Саксонский (1316—1390), преподававший в Вене, и ректор основанного в 1386 г. Гейдельбергского университета Марсилий Инген (ум. в 1396 г.).

«Знамением времени» явилась и деятельность Николая Орема (род. ок. 1323 г.— ум. в 1382 г.). Орем занимался тем, чем никогда не занимались более ранние и современные ему схоласты. Он перевел сочинения Аристотеля (с латинского) на родной французский язык, обогащая его такими живучими неологизмами, как anatomie, democracie, incommensurable, materiel, probabilité, scientifique, vélocité [34]. Его пояснительные вставки («глоссы») к переводам показывают, что он стремился сделать эти произведения доступными для новых слоев общества,— наука выходит из монастырской кельи. Мало того, Орем пишет трактат о монете, что также является знамением нового времени,— развития денежного хозяйства и городской культуры.

Резко отрицательно относился Орем к астрологии и нападал на веру в магию. По его словам, «глупые чернокнижники»

---

[32] «Super quatuor libros sententiarum annotationes», lib. I, dist. 27, qu. 2.

[33] «Summa totius logicae», I, 12.

[34] Кроме перевода (с комментариями) сочинения Аристотеля «О небе», сделанного в 1377 г., Орему принадлежат переводы «Этики», «Политики» и «Экономики» того же автора.

приписывают действию бестелесных духов то, что на самом деле имеет чисто физические причины, что объясняется внушением и самовнушением, не говоря уже о прямом обмане и мистификации. Правда, вполне отрешиться от господствующего духа времени Орем еще не мог, не решаясь распространять предложенные им рациональные объяснения на тексты библии и оговаривая, что вполне возможны случаи, о которых повествуется «в историях и свидетельствах, достойных доверия и как бы апробированных всеми»[35].

В заключение общего обзора научного развития в средние века следует остановиться на популярных энциклопедиях, которые были призваны удовлетворять элементарную любознательность и свидетельствовали не столько об уровне научных знаний, сколько о возрастании интереса к естествознанию в более широких слоях. Эти энциклопедии, содержавшие лишь отрывочные сведения, краткие ответы на вопросы «почему» и «отчего» о разнообразнейших явлениях природы, не были пригодны для решения практических задач и по большей части некритически суммировали вековую «книжную мудрость», восходящую к Плинию, Исидору Севильскому и другим авторам древности и раннего средневековья. К числу их принадлежит сочинение Бартоломея Английского «О свойствах вещей», написанное, примерно, в 1230—1240 гг. на ученом латинском языке и переводившиеся на протяжении XIV в. на живые европейские языки — итальянский (1309), французский (1372), провансальский (до 1391), английский (1397—1398), а в XV в.— на испанский. Около 1260 г. учитель Данте, Брунетто Латини составил на французском языке энциклопедию под заглавием «Сокровище» («Li livres dou Tresor»), в трех частях: первая, сравниваемая с деньгами, посвящена «природе всего сущего», вторая, сравниваемая с драгоценными камнями,— этике, третья, «подобная золоту»,— риторике и политике.

К той же категории относится книга Ристоро д'Ареццо (1282) «Строение мира», написанная по-итальянски, и «Книга природы» Конрада из Мегенберга, написанная по-немецки (середина XIV в.). Вопросы физики рассматриваются в этих и подобных произведениях вперемежку с вопросами космографии и географии, метеорологии, минералогии и т. д.

Подводя общий итог почти тысячелетнему развитию науки в период средневековья, необходимо сделать вывод, что этот период представляет своеобразный и сложный этап в эволюции мирового естествознания. Критикуя историографические концепции XVIII в., Энгельс писал: «В области истории — то же отсутствие исторического взгляда на вещи.

---

[35] О научных трудах Орема см. подробнее дальше, стр. 116.

Здесь приковывала взор борьба с остатками средневековья. На средние века смотрели как на простой перерыв в ходе истории, причиненный тысячелетним всеобщим варварством. Никто не обращал внимания на большие успехи, сделанные в течение средних веков: расширение культурной области Европы, великие жизнеспособные нации, образовавшиеся там в соседстве друг с другом, наконец, огромные технические успехи XIV и XV веков. А тем самым становился невозможным правильный взгляд на великую историческую связь, и история, в лучшем случае, являлась не более, как готовым к услугам философа сборником примеров и иллюстраций» [36].

Рассмотрим теперь несколько детальнее развитие отдельных физических дисциплин, начав с оптики.

Выше (стр. 79) было отмечено, что геометрическая оптика являлась в древности отраслью физики, наиболее разработанной математически. Ученые средневекового Востока и в особенности Алхазен не только продвинули ее вперед, но и заложили основы физиологической оптики.

Неудивительно, что оксфордские ученые XIII в. (Роберт Большеголовый и Роджер Бэкон) взяли за образец именно геометрическую оптику, пытаясь приложить математические методы к изучению природы. Оба настойчиво указывали на необходимость создания некоей новой общей науки о «распространении образов» (multiplicatio specierum), или точнее, об «умножении» или «размножении» образов, т. е. некоего общего учения о распространении любых физических сил и воздействий: световых, тепловых, магнитных и т. д. За основу ее должна быть взята наиболее разработанная в геометрическом отношении область физики — оптика. Представление о «световой сфере», т. е. совокупности световых лучей, равномерно распространяющихся из одной точки, было расширено до общего понятия о «силовой сфере» или «поле действия сил» (orbis virtutis).

Разумеется, космологические и физические представления оксфордцев оставались еще туманными и метафизическими. Воображаемый процесс построения линии путем движения точки, плоскости — путем движения линии, тела — путем движения плоскости превращался у Роберта Большеголового в реальный процесс, предшествующий возникновению пространственного мира: «телесность» оказывалась порождением «сил», распространяющихся из определенной точки, своего рода «динамического атома», лишенного протяженности. Для нас наиболее важно другое: на почве подобных геометрическо-

[36] Ф. Энгельс. Людвиг Фейербах и конец классической немецкой философии. К. Маркс и Ф. Энгельс. Избранные произведения, т. II. Госполитиздат, 1955, стр. 355.

оптических представлений возникли первые приближения к количественным оценкам ряда новых физических явлений. Из законов «умножения образцов» вытекало, что точки, более удаленные от центра «силовой сферы», распределяются менее плотно, чем точки менее удаленные. Роберт ограничивался такой констатацией; но позднее, исходя именно из подобных представлений о «световой сфере», Кеплер в 1604 г. пришел к выводу, что при распространении света из светящейся точки освещенность убывает обратно пропорционально площади сферических поверхностей (или квадрату расстояний), а еще позднее (1609) воспользовался тем же рассуждением при исследовании сил тяготения и магнитных сил.

Не только общий уровень научного развития эпохи помешал Роберту сделать подобные выводы, но и представления о мгновенности распространения света: если свет распространяется мгновенно, сила его должна быть признана бесконечной; перед понятием же бесконечности в те времена еще останавливались умы исследователей. Тем не менее у Роберта встречается интересное соображение о возможности различных типов бесконечных множеств и их сравнения друг с другом. По Роберту, бесконечное «умножение» света может соответствовать разным конечным величинам («сферы»), то бóльшим, то меньшим, а это приводило его к мысли, что существуют *различные* бесконечные множества, стоящие друг к другу в том же отношении, в каком находятся между собой соответствующие конечные величины.

Свое рассуждение о возможности сравнивать бесконечные совокупности Роберт Большеголовый сопроводил замечанием: «Такова была, как я полагаю, мысль философов, утверждающих, что все состоит из атомов, и говорящих, что тела составляются из поверхностей, поверхности из линий и линии из точек». Итак, Роберт приходил к своеобразной геометрической атомистике, в конечном итоге открывавшей возможность количественного изучения физических процессов [37].

Излюбленным примером, посредством которого и Роберт Большеголовый, и Бэкон иллюстрировали значение геометрии и эксперимента в науке, была теория радуги. В отличие от Аристотеля, сводившего радугу к *отражению* лучей в каплях (см. выше, стр. 67), Роберт отмечал роль *преломления*, хотя говорил о преломлении не в отдельных каплях, а во всей туче в целом. Бэкон для объяснения радуги привлек (подобно античным ученым) анализ аналогичных явлений (радужные цвета при преломлении в хрустале, в каплях росы, в брызгах воды

[37] На русском языке подробнее об этом см. в статье: В. П. Зубов. Из истории средневековой атомистики. Труды ИИЕ АН СССР, т. 1. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 290—293.

при работе водяных мельниц и т. д.) Старое положение, восходящее к Аристотелю и гласящее, что Солнце, глаз и центр дуги находятся на одной прямой, Бэкон пытался уточнить геометрически применительно к высоте Солнца в разное время дня и в разных широтах, установив, что угол, образуемый падающим лучом и лучом, направляющимся к глазу, равен 42°.

Бэкон экспериментировал и в других областях оптики, проверяя свои эксперименты геометрическими построениями. Так, изучая отражение лучей в вогнутых зеркалах, он пришел к выводу, что следует принимать солнечные лучи параллельными, а не распространяющимися из одной точки, и пытался определить фокусное расстояние вогнутых сферических зеркал, заключив, что оно меньше радиуса зеркала.

Оксфордским ученым была известна «Оптика» Алхазена, переведенная в XII в. на латинский язык. В XIII в. этот труд лег в основу работ Вителo и Джона Пекама (Иоанна Кентерберийского).

Вителo родился в Польше, в г. Вроцлаве (прибл. в 1230 г.), учился в Париже (около 1253 г.), затем возвратился на родину, а в 60-х гг. отправился в Италию. Там у него зародился интерес к оптическим явлениям и, в частности, к явлениям рефракции. В промежуток между 1270 и 1278 гг. он написал сочинение по оптике в десяти книгах («Перспектива»). Его труд затрагивает основные вопросы геометрической, физической и физиологической оптики. Довольно большой раздел посвящен радуге. В нем приведены собственные наблюдения, и здесь Вителo наиболее оригинален.

При обяснении радуги Вителo учитывал преломление лучей в отдельных каплях (в отличие от Роберта Большеголового, который, как мы видели, исходил из представления о преломлении в целой туче).

«Общая перспектива» («Perspectiva communis) Пекама имеет характер сжатого руководства. Долгие годы она являлась основой школьного преподавания геометрической оптики. Любопытна похвала «перспективе» (т. е. оптике), которую автор предпослал своему труду: в ней утверждается, что «из великих предметов математики достоверность доказательства возвышает наиболее блистательно дух изыскателей», и что «перспектива», будучи украшена «цветами» математики и физики, составляет «славу» и той и другой.

Особого внимания заслуживает произведение Дитриха Фрейбергского (или в латинизированной форме — Теодорика, ум. в 1311 г.). В трактате «О радуге», написанном в первом десятилетии XIV в., Дитрих объяснил первую дугу двукратным преломлением и однократным отражением лучей внутри капли, а вторую дугу — двукратным отражением и однократ-

ным преломлением, экспериментально проверяя свои положения при помощи хрустальных шаров и сферических сосудов, наполненных водой. Это правильное объяснение радуги было известно и в XIV—XV вв., а в XVII в. развито вновь (без упоминания о Дитрихе) Антонио де Доминисом и Декартом.

Почти в те же годы, что и Дитрих на Западе, ученые Востока Кутб эд-дин ал-Ширази (1236—1311), ученик Нассирэддина Туси, и Камал эд-дин ал-Фариси (ум. ок. 1320 г.) дали такое же объяснение радуги.

Ал-Фариси принадлежат также наблюдения над камерой обскурой, в результате которых он пришел к выводу, что наилучшим отверстием является минимальное и что при более широких отверстиях получающиеся изображения налегают друг на друга. Аналогичные наблюдения в те же времена сделал еврейский ученый Леви бен Герсон (1288—1344).

Изобретение очков в XIII в., внимание к теории радуги и первое правильное ее объяснение в XIV в. свидетельствуют об интересе к явлениям рефракции, с которой приходилось считаться и при астрономических наблюдениях. Тем не менее точный закон преломления в средние века не был открыт, и основное значение сохраняли таблицы, составленные Птолемеем (см. выше, стр. 65 и 66).

Учение о теплоте. Несмотря на большое внимание к вопросам о теплоте, которое было обусловлено уже тем, что представление о четырех первичных качествах (теплое и холодное, сухое и влажное) лежало в основе учения о четырех стихиях, воспринятого от античности, нельзя на всем протяжении средневековья выделить в этой области какие-либо существенно новые наблюдения и открытия. Тем не менее именно здесь, непосредственно после геометрической оптики, уместно сказать об этой отрасли физики по одной причине: стремление к математизации, отмеченное выше в связи с Робертом Большеголовым и Роджером Бэконом, сказалось до известной степени и в учении о теплоте. Именно у Бэкона получила дальнейшее развитие попытка арабских ученых математизировать учение о «температуре» смесей (см. выше, стр. 91 и 92).

В трактате «Об определении градусов сложных лекарств» Роджер Бэкон воображает все качества, способные изменять свои интенсивности, располагающимися на линии, именуемой «линией усиления и ослабления интенсивности». От определенной «средней» (мы бы сказали «нулевой») точки вверх и вниз на этой линии откладываются градусы, обозначаемые равными отрезками произвольной величины и являющиеся градусами двух противоположных качеств: теплоты и холода или сухости и влажности. В переводе рассуждений и примеров Бэкона на язык формул, мы имеем (обозначая через M и m количества

вещества, через T и t — их температуры и через x — искомую температуру смеси):

$$\frac{m}{M} = \frac{T-x}{x-t},$$

откуда [38]

$$x = \frac{MT+mt}{M+m}.$$

Механика. Статика, как и геометрическая оптика, была в значительной мере продвинута трудами античных ученых, с которыми средневековый Запад познакомился далеко не сразу (стр. 100). Как уже было отмечено, в XIII в. было переведено на латинский язык большинство трудов Архимеда.

Выдающимся ученым в области механики был Иордан Неморарий, или Иоанн Саксонский (ум. в 1237 г.). В сочинении «О тяжестях» («De ponderibus») он развил положение псевдоаристотелевских «Механических проблем» (см. выше, стр. 54), согласно которому величина грузов, уравновешивающих друг друга на концах рычага, обратно пропорциональна «виртуальной» скорости движения этих концов. В том же сочинении Иордан констатировал, что высота подъема обратно пропорциональна грузам: сила, способная поднять груз на определенную высоту, способна поднять груз в n раз больший на высоту в n раз меньшую. Исходя из принципа сложения скоростей, сформулированного в «Механических проблемах», Иордан при рассмотрении грузов, находящихся на наклонной плоскости, разлагал их силы тяжести на две составляющих: нормальную и параллельную наклонной плоскости. Чем меньше последняя, тем меньше «тяжесть, зависящая от положения» (gravitas secundum situm).

С именем Иордана связываются в рукописях еще два других сочинения: «Элементы» (Elementa super demonstrationem ponderum) и «Книга о пропорции тяжести» (Liber de ratione ponderis) или «О весомости» (De ponderositate). В отношении их подлинности мнения расходятся. Относительно первого сочинения одни исследователи считают, что тезисы его восходят к античной эпохе и только комментарии к ним принадлежат Иордану; другие приписывают Иордану и самые тезисы. Второе сочинение некоторые считают принадлежащим самому Иордану, другие — вышедшим из его школы. (П. Дюэм предложил называть этого анонимного автора «предшественником Леонардо да Винчи».)

Наиболее интересно второе сочинение. Понятие «gravitas secundum situm» находит здесь применение к движению по наклонной плоскости: если грузы, поднятые на одинаковую

[38] Подробнее см. в указанной выше (стр. 93) статье В. П. Зубова.

высоту, прямо пропорциональны длинам наклона, то «движущая сила» (скорость) в конце движения по наклонной плоскости будет одна и та же. В этом же произведении рассматриваются теоремы о коленчатом рычаге. Автор приближается к формулировке понятия статического момента, утверждая, что силы обратно пропорциональны не реальным плечам, а расстояниям от концов плеч до вертикальной оси, проходящей через точку опоры. Рассматривая вытекание жидкостей, автор констатирует, что скорость движения обратно пропорциональна площади сечения трубки.

Произведения самого Иордана и произведения, связанные с его именем и его школой, образуют особую группу трактатов, авторов которых в литературе позднего средневековья принято было обозначать обобщенно как «авторов сочинений о тяжести» (auctores de ponderibus). В целом эти произведения были слабо связаны со схоластической традицией, хотя в отдельных вариантах и можно проследить воздействие аристотелевских концепций.

В более тесной связи с общефилософскими проблемами разрабатывались основные понятия динамики. Прежде всего следует рассмотреть работы английских и французских ученых XIV в.

Тенденции математизировать анализ тепловых явлений и построить по типу геометрической оптики некую общую теорию распространения физических сил нашли дальнейшее развитие в литературе, посвященной так называемым «калькуляциям». Основой, на которой выросли эти «калькуляции», явились евклидовское учение о пропорциях, с одной стороны, и аристотелевская «Физика», осложненная позднейшими комментаторами (в первую очередь Аверроэсом), с другой. Своеобразная «математизация» Аристотеля и «физикализация» Евклида — такова та общая подоснова, на которой выросли «калькуляции» XIV в. В первую очередь такой математизации подверглись те разделы аристотелевской «Физики», в которых речь шла о пропорциональных соотношениях между силой и сопротивлением, силой и движением и т. д.

Наиболее ранним трактатом, посвященным вопросам кинематики движения, является трактат «О движении», принадлежащий Герарду Брюссельскому и написанный до 1328 г.[38а] Дальнейшую разработку эти же и смежные вопросы получили в Оксфорде, точнее в Мертонском колледже Оксфордского университета — у Томаса Брадвардина, Ричарда Суисета (про-

---

[38а] Недавно M. Clagett напечатал его критическое издание («Osiris», vol. 12, 1956, pp. 73—175). Тем же ученым вместе с E. A. Moody изданы упоминавшиеся выше трактаты de ponderibus (Madison, 1952).

званного «калькулятором») и др. Их сочинения также относятся к первой половине XIV в. Историческое значение их состоит в том, что они вплотную подвели к учению о переменных величинах, рассматривая соотношения между понятиями интенсивности, скорости, силы, сопротивления, движения и т. д. Исходя из традиционных положений аристотелевской физики и подвергая их пересмотру, представители мертонской школы не пытались проверить свои тезисы экспериментально.

Так, в трактате Брадвардина «О пропорциях» (1328) подвергнуто пересмотру аристотелевское положение о мере скорости.

Согласно Аристотелю, соотношение между скоростью v, силой p и сопротивлением r может быть выражено формулой $v = p : r$ при условии, что $p > r$. Нетрудно видеть (и это подметили средневековые ученые), что при $p = r$ отношение становится равным единице, тогда как очевидно, что при этом условии оно должно было бы стать равным нулю, поскольку движение прекращается. В поисках выхода из этого затруднения Фома Брадвардин предложил новую формулу, получившую в XIV в. широкое распространение, а именно: скорость v возрастает и убывает пропорционально показателю степени (мы бы сказали — логарифму) отношения $p : r$, т. е. скорости av соответствует отношение $(p : r)^a$. Такая формула удовлетворяет указанному выше требованию, поскольку логарифм единицы равен нулю.

На приведенном примере видны все характерные черты «калькуляций»: эти отвлеченные «калькуляции» приводили вплотную к операциям с новыми понятиями (в данном случае к логарифмам), но вместе с тем они были недостаточно отвлеченны, потому что ограничительные условия вводились извне, из традиционной аристотелевской физики, или, как в приведенном случае,— из очевидности непосредственного опыта (при $p = r$ скорость *должна* стать равной нулю).

Дальнейший анализ «калькуляций» целесообразно проследить на примере той формы, которую они приняли у Николая Орема, уже известного нам по предшествующему изложению.

Орем, как и его предшественники, различает изменения «униформные», т. е. равномерные, или однородные, и «униформно-дифформные», т. е. однородно-неоднородные или равномерно-неравномерные. Примером первых может служить равномерное движение (с постоянной скоростью), примером вторых — движения равномерно ускоряющиеся или равномерно замедляющиеся. Первые изображаются в виде прямоугольников, вторые — в виде прямоугольных треугольников. Основания прямоугольников (или треугольников) соответствуют

временам, высоты — скоростям, а площади — путям (последнее Орем прямо не говорит, но это подразумевается во всех его рассуждениях).

Орем дал геометрическое доказательство того, что униформно-дифформное изменение равносильно униформному изменению, происходящему со средней скоростью: площадь прямоугольника $AFGB$ равна площади треугольника ACB (рис. 2) (точно такое же доказательство дал позднее Галилей). Орем ввел также термин velocitatio, означающий ускорение. Ему было известно, что скорость изменения «градуса» (ординаты) наименьшая вблизи той точки, где «градус» наибольший или наименьший.

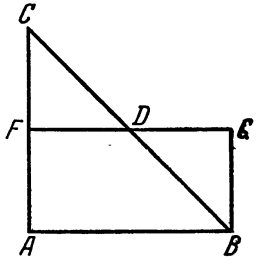


Рис. 2

Наряду с описанными изменениями Орем рассматривал еще изменения «дифформно-дифформные», определяя их чисто отрицательно: как неуниформные и неуниформно-дифформные. Они, естественно, могут изображаться самым различным образом. Одним из примеров их графического изображения является четверть круга. У Орема имеется доказательство, что дифформно-дифформное изменение, изображаемое графически в виде полукруга, не может быть изображено ни посредством сегмента круга меньшего, чем данный, ни посредством сегмента круга большего, чем данный, но что пропорциональной ему может оказаться фигура, ограниченная другой кривой, отличной от дуги окружности. Орем, видимо, не отдавал себе отчета в том, что этой фигурой является половина эллипса.

Графический метод, применяемый к изменениям, Орем применял и к *распределению качеств* разной интенсивности в различных точках пространства (примером может служить тело, равномерно или неравномерно нагретое в различных своих точках). В этом случае по оси абсцисс откладывались расстояния, а ординаты служили для обозначения интенсивностей («градусов»). На основании указанного Орем говорил о качествах различной «конфигурации», различая при этом качества линейные, плоскостные и телесные; первые являются качествами, находящимися в одной определенной точке пространства, и их интенсивность обозначается линией, вторые распределяются в различных точках одной и той же линии, а потому их совокупность должна обозначаться плоскостью. Соответственно тело символизирует распределение интенсивностей на плоскости, а распределение качеств по трем измерениям привело Орема к мысли о необходимости четвертого измерения, реаль-

ность которого он отверг, допустив его как чисто мысленную возможность. Таким образом, проводя «геометризацию качеств» в интересах наглядности, Орем в конце концов был вынужден отказаться от этой наглядности и допустить возможность четырехмерных «конфигураций», как чисто символических форм.

Теории «конфигурации качеств» Орем придавал очень широкое значение, полагая, что она должна служить объяснением самых разнообразных явлений физики. Напоминая о концепции древних атомистов, полагавших, что свойства тел объясняются формой атомов (в частности, считавших, что, например, жгучесть огня обусловлена острой, «пирамидальной» формой частиц), Орем указывал, что если так обстоит с фигурами тел, то представляется логичным говорить и о «фигурах качеств».

Различием в пористости тел и в «конфигурации» качеств Орем пытался, например, объяснить (говоря на современном языке) различную теплопроводность тел, магнитные явления и т. д. Разумеется, подобные физические гипотезы должны были оставаться у Орема в области самых расплывчатых и общих предположений. Тем не менее нельзя не признать смелой и даже дерзкой для XIV в. попытку свести бесконечное разнообразие физического мира к сложнейшему геометрическому рисунку «качеств» и их «конфигураций».

Здесь в зародыше уже налицо концепция XVII в., сторонники которой пытались объяснить разнообразие явлений бесконечным разнообразием корпускул и их форм (Бойль).

Мы зашли бы слишком далеко, рассматривая труды предшественников Орема — представителей мертонской школы и, в частности, Ричарда Суисета. Достаточно ограничиться указанием, что если Орем и его школа проявляли тенденцию к *геометрическому* доказательству, то английская школа стремилась скорее к доказательству *арифметическому* и абстрактно-логическому. Изложение у представителей этой школы несравненно более схоластично и запутанно. Орем в значительной мере десхоластизировал «калькуляции», придав им бóльшую геометрическую наглядность. В частности, уже у «мертонцев» встречается теорема об эквивалентности среднего униформного и униформно-дифформного изменений, доказываемая без ссылки на геометрический чертеж.

Теория, разработанная оксфордцами и парижанами, получила в начале XV в. распространение и дальнейшее развитие в Италии и прежде всего в Венецианской республике. Первыми проводниками ее были Павел Венецианский (ум. в 1429 г.), преподававший в Падуе, и его преемник и ученик — Гаэтано Тиенский (1387—1465). В Павийском университете теми же вопросами занимался миланский медик Джованни Марлиани

(ум. в 1483 г.). В Венеции и Павии в последней четверти XV в. и первой четверти XVI в. печатались произведения английских и французских ученых (Брадвардина, Суисета, Орема и др.).

Показательно, что наряду с интересом к произведениям Орема сохранялся интерес к авторам более ранней, оксфордской школы. Тяготение к геометрической наглядности вынудило Орема несколько упростить проблемы, оставить в стороне ряд тонкостей, которые были подмечены его предшественниками и которые продолжали занимать итальянских ученых.

Не следует модернизировать представлений английских, французских и итальянских ученых XIV в., занимавшихся рассмотренными выше «калькуляциями». Хотя Галилей впоследствии и воспользовался той же геометрической схемой, что и Орем, для доказательства, что равномерно ускоренное движение падающих тел эквивалентно равномерному движению со средней скоростью, ученые XIV в. сами еще и не помышляли о том, что выведенная ими формула применима именно к падению тел.

Неправильно было бы вместе с тем думать, что «калькуляторы» оперировали в совершенно «безвоздушном пространстве» абстракций, никак не связанных с физическим миром. Как уже было сказано, в конечном итоге перед «калькуляторами» стояли задачи физического объяснения. Несовершенство самой физики, неполнота эмпирических данных, недостаток приборов и неразвитость экспериментального метода явились причиной того, что разработанный в мертонской школе и в школе Орема математический аппарат в значительной степени работал на холостом ходу; и главное — аппарат этот не был чисто математическим, он осложнялся допущениями, принятыми без проверки из аристотелевской физики. Не столько абстрактность, сколько *недостаток* абстракции, неспособность оторваться от традиционных взглядов средневековой физики составляли главный дефект «калькуляций», которые поэтому и не могли прямым путем привести к решению проблем математического анализа. Вместе с тем, будучи слишком сращены с традиционным перипатетизмом, «калькуляции» не могли быть в широкой мере использованы позднейшими физиками, вставшими на путь наблюдения и эксперимента.

«Калькуляции» XIV в. оказались слишком прикованы к традиционным представлениям о физическом космосе, не позволявшим рассматривать проблемы во всей их чистоте и принципиальности. То же следует сказать о проблемах пространства, времени и движения, трактовавшихся в общефилософском плане.

Напомним сначала, что аристотелевская теория пространства заключала в себе ряд непоследовательностей. Определяя место, как «границу объемлющего тела», Аристотель начинал с утверждения, что перемещение предполагает наличие двух тел: того, которое перемещается, и того, в отношении которого оно перемещается. Ближайшим образом перемещение определяется в отношении граничащего тела, находящегося в *непосредственном соприкосновении* с перемещающимся. Уподобляя «место» сосуду, Аристотель несколько конкретизировал свое первоначальное определение: если вместе с движением сосуда движутся заключенные в нем вода или вино, то в строгом смысле их самих нельзя назвать движущимися,— неподвижные в отношении соседнего тела, они движутся лишь опосредствованным образом, «акцидентально» (т. е. лишь благодаря движению сосуда). Такая концепция могла привести к полной релятивизации движения, чего Аристотель, однако, не сделал. Приводя пример корабля, стоящего на якоре и омываемого все новой и новой водой, он не делал вывода, что корабль меняет место, коль скоро постоянно меняется граница непосредственно объемлющего тела. Вместо этого он вводил дополнительное определение: место не просто сосуд, но *неподвижный* сосуд, первая *неподвижная* граница объемлющего тела. С этой точки зрения «местом» корабля является уже не омывающая его вода, а вся река, которая «неподвижна в целом».

С дальнейшим затруднением, как мы уже знаем, Аристотель встретился, рассматривая движение мировой сферы. Конечная сферическая Вселенная, по Аристотелю, вращается: об этом свидетельствует видимое суточное движение звезд. Но по отношению к чему же она меняет место? Ведь за ее пределами ничего нет, а следовательно, нет и «объемлющего тела»! Отступив от своего первоначального определения, Аристотель говорил, что в данном случае движение определяется по отношению к телу, находящемуся в *центре* Вселенной, т. е. по его представлениям, Земле.

Наличие такого центрального тела *необходимо*, ибо понятие перемещения неизбежно предполагает наличие двух тел.

Напомним также, что в птолемеевской теории эпициклов и деферентов предполагалась возможность движения вокруг математических (воображаемых) точек пространства, которое существует *наряду* с телами и в отношении которого происходит перемещение. Наконец, напомним, что у неоплатоников Дамаския и Симпликия «собственное положение тела» определялось как некое «внутреннее расположение» его частей, способное меняться *независимо* от положения окружающих тел; наличие таких тел нужно лишь для *познания* движений, но не для самого движения: «Даже если бы не было ни востока,

ни запада, ни меридиана, небо (т. е. мировая сфера) продолжало бы двигаться так же, хотя мы не располагали бы никакими данными для определения различных его положений» [39].

В средние века в защиту аристотелевской концепции выступил Аверроэс, согласно которому при круговом движении неба непременно предполагается, что в центре Вселенной должно находиться конкретное тело — Земля. Поэтому Аверроэс решительно отвергал систему Птолемея с ее идеальными кругами и центрами. Латинский Запад усвоил аверроистическую концепцию. Она встречается, например, в XIII в. в философских сочинениях Альберта Великого, который, правда, непоследовательно придерживался в астрономии системы Птолемея. Рьяным защитником аверроистической теории в XIV в. был Жан Жанденский. Аристотелизм, казалось бы, торжествовал. Но торжество это было лишь кажущееся. Уже в начале XIV в. система Птолемея приобрела известное влияние на христианском Западе, а в середине XIV в. получила полное признание сначала в Париже, распространившись затем и дальше. Проблемы, волновавшие Оксфорд и Париж в XIII—XIV вв., стали предметом споров в итальянских университетах в XV—XVI вв. А система Птолемея, как мы только что указали, предполагала другие представления о пространстве и движении.

Своего рода компромиссным выходом было учение о так называемом «эмпирее» — неподвижном, недоступном для непосредственного восприятия теле, «десятом небе», за пределами вращающейся сферы неподвижных звезд (или «восьмой сферы») и девятой, которая была введена для того, чтобы объяснить предварение равнодействия. Такая концепция позволяла сохранить основное аристотелевское определение перемены места как перемены положения относительно «объемлющего» тела и не предполагала непременного наличия неподвижного тела *в центре* Вселенной: все движения определялись

---

[39] S i m p l i c i u s. In Aristotelis Physicorum libros quattuor priores commentaria. Ed. H. Diels, Berolini, 1882, p. 634.

Анализ античных теорий пространства и движения дан П. Дюэмом. P. D u h e m. Le mouvement absolu et le mouvement relatif. Revue de philosophie, t. 11, 1907, p. 221—235, 347—362, 548—573; t. 12, 1908, p. 134—150, 246—265, 386—400, 486—498, 607—623; t. 13, 1908, p. 143—165, 275—287, 515—519, 635—665; t. 14, 1909, p. 149—179, 306—317, 436—458, 499—508; Le temps et le mouvement selon les scolastiques, там же, t. 23, 1913, p. 453—478; t. 24, 1914, p. 5—15, 136—149, 225—241, 361—380, 470—480. В дальнейшем изложении используются приводимые в этих статьях данные, причем некоторые цитаты сверены с первоисточниками. С общими выводами Дюэма согласиться нельзя, и предлагаемая нами в тексте концепция отличается от дюэмовской в существенных пунктах.

по отношению к всеобъемлющей («неподвижной») десятой сфере, служившей чисто гипотетическим «телом отсчета». Зачатки указанного воззрения встречаются уже в раннем Средневековье — у Исидора Севильского, Беды Достопочтенного, Рабана Мавра, позднее у Ансельма Кентерберийского, Петра Ломбарда и др. Его придерживался в XIII в. переводчик Евклида — Кампано, в XIV в.— начале XV в.— пропагандист реформы календаря Пьер д'Альи. Практически бесплодное, учение об «эмпирее» не делало геоцентризм *неизбежным* представлением, как это имело место у аристотеликов-аверроистов. Принципиально избавляла от такой неизбежности и теория, развитая Дунсом Скотом и столь же бесплодная практически. Дунс Скот и его школа в XIV в., ища выхода из противоречий аристотелевской концепции «места», попытались дополнить ее понятием *ubi* («где»), котрое имело общие черты с представлениями Дамаския и Симпликия (см. выше). *Ubi* есть известное состояние, присущее самому предмету, которое не нуждается для своего определения в наличии какого-либо *второго тела*; безотносительно к наличию объемлющего или объемлемого тела, части мировой сферы в своем круговращении приобретают все новые *ubi*.

Схоластичность подобной концепции была разоблачена номиналистами и прежде всего Вильямом Оккамом. Борясь против гипостазирования и овеществления абстракций, номиналисты не могли принять скотистскую теорию *ubi*, превратившую понятие «где» в какое-то реальное, имманентно присущее телу свойство. «Место» и «где» не суть некие особые реальности наряду с телами, стоящими друг к другу в определенном отношении.

Параллельно шло уточнение и дальнейшее развитие аристотелевских положений. Аристотелевское замечание, что корабль, стоящий на реке на якоре, остается неподвижным по отношению к реке в целом, хотя окружающая его вода беспрерывно меняется, послужило основой для различения места «формально-неподвижного» и «материально-неподвижного» (такой терминологией пользовался, например, Роберт Большеголовый). Аналогично Эгидий Колонна (или Эгидий Римский, 1247—1316) утверждал, что человек сохраняет то же положение в отношении Вселенной (к ее центру и полюсам), хотя бы окружающий воздух и был целиком унесен дуновением ветра и заменен новым. Тем же примером несколько позднее воспользовался Вальтер Бурлей, преподававший в Оксфорде, Париже и Тулузе (ум. после 1345 г.): человек остается непрерывно в покое в той же части Сорбонны и столько же лье неизменно отделяет его от Англии, как и раньше, хотя вокруг него дует сильнейший ветер. «Место» (в строго аристотелевском

смысле) не остается здесь тем же «материально неподвижным», но человек остается в *эквивалентно* том же самом месте, что и раньше.

Свое развитие понятие эквивалентности получило в школе номиналистов, более резко подчеркнувших в нем моменты релятивизма: если утверждается, что место неподвижно в смысле эквивалентности, это еще не значит, что нужно признавать *абсолютно* неподвижное место; достаточно признать, что такое место ничем по существу не отличается от абсолютно неподвижного, т. е. оно ему равнозначно. О неподвижности говорят тогда, когда сохраняется тот же самый «порядок» (ordo) по отношению к Вселенной в целом. Воображать какую-то абсолютную неподвижность полюсов и центра мира есть, по Оккаму, «ложное представление» (falsa imaginatio). Ведь равномерное круговое движение мировой сферы не представляет никакой разницы с абсолютной неподвижностью. Для иллюстрации этого положения номиналист Жан Буридан и его ученик Альберт Саксонский приводили в пример башни собора Нотр-Дам, которые стоят на том же месте, на котором они были построены, хотя воздух, их окружающий, беспрерывно обновляется. Геометр приписывает одну и ту же величину промежуткам, отделяющим эти башни от мировой сферы и от центра Земли, хотя бы промежутки и заполнялись непрерывно все новыми и новыми телами. «Места» башен, понимаемые в смысле «объемлющих тел», не остаются тождественными, но они эквивалентны друг другу, а потому могут рассматриваться как неподвижные.

Уже из этого краткого обзора видно, как тесно были связаны средневековые споры о природе абсолютного и относительного движения с определенной космологической концепцией. У аристотеликов-аверроистов центральное положение Земли было самым неразрывным образом связано с теорией «места» и движения. Концепции «эмпирея» и *ubi* как будто избавляли от этой неизбежности геоцентризма, но были практически бесплодны и оставались в пределах представлений о конечной сферической Вселенной. В рамках конечного аристотелевского космоса оставались и номиналисты, согласно которым сферическая Вселенная — ее полюсы и центр — ничем не отличаются от абсолютно неподвижного тела, эквивалентны ему.

Что же должно было произойти, когда космологические представления средневекового аристотелизма подверглись ревизии? Знакомство с птолемеевской теорией и ее распространение на Западе способствовали развитию взглядов на пространство как некое неподвижное вместилище тел. Но окончательно выбило почву у представления о центральном привилегированном положении Земли учение о бесконечности

Вселенной. В поисках неподвижных точек отсчета мысль ученых стала все более склоняться к идее абсолютного пространства, отличного от тел, возвращаясь в известном смысле к представлениям античных материалистов — Демокрита, Эпикура и Лукреция — о «пустоте». Но эта стадия эволюции взглядов относится уже к следующему периоду. В позднем Средневековье можно говорить о каком-то приближении к ней: нередки примеры, когда авторы, наряду с физически существующим, говорили о логически возможном, возможном в «воображении», хотя и не существующем реально, пробивая, таким образом, первые бреши в традиционном аристотелевском миропонимании. Так, согласно Аристотелю, существует лишь одна, ограниченная в пространстве сферическая Вселенная. Некоторые средневековые авторы (Ричард из Миддлтона, Вальтер Бурлей, Жан Бассоль, Вильям Оккам, Роберт Холькот, Гаэтано Тиенский) стали оспаривать доказательность аргументов Аристотеля и утверждать логическую возможность (но не реальное существование) нескольких миров. Высказывания этих авторов не представляют собой единой прогрессивной линии, а скорее являются симптомами того постепенного разброда, который возникал по мере распада схоластического перипатетизма. Насколько сложным и запутанным был этот процесс, видно хотя бы из того, что представители одного из наиболее передовых течений XIV в.— парижские номиналисты Жан Буридан и Альберт Саксонский с новых позиций защищали старый, очень старый тезис Аристотеля о единственности ограниченной Вселенной[40].

Равным образом, если Аристотель пытался доказать невозможность бесконечной Вселенной ссылками на невозможность вращения бесконечно большого тела, имеющего бесконечно большую тяжесть, то теперь Николай Орем подверг критике эти аргументы, рассматривая, впрочем, свою полемику как чисто мысленный эксперимент.

Ссылаясь в вопросе об относительности движения на классический аристотелевский пример человека, плывущего в лодке, и распространяя эти соображения на случай вращательного движения, Орем допускал возможность постоянного суточного вращения Земли, отступая тем самым от аристотелевского учения, наделявшего каждый из четырех элементов

[40] Обширные выдержки из первоисточников приведены в очерке Дюэма «Léonard de Vinci et la pluralité des mondes», стр. 57—96, 408—423 (см. P. Duhem. Etudes sur Léonard de Vinci, 2-de série. P., 1909. См. также G. A. Colley, H. W. Miller. S. Bonaventure, Francis Mayron, William Vorilong and the doctrine of a plurality of worlds. Speculum, 1937, № 3, p. 386—389; A. Koyré. Le vide et l'espace infini au XIV-e siecle. Archives d'histoire doctrinale et littéraire du Moyen Age, v. 17, 1950.

лишь *одним* «естественным» движением; для Земли как элемента таким естественным движением было, согласно перипатетикам, движение вниз, т. е. к центру сферической Вселенной, где Земля, по представлениям Аристотеля, и должна была, следовательно, покоиться. Однако аргументация Орема во многом еще оставалась архаично-средневековой. Так, например, одним из аргументов в пользу того, что Земля должна двигаться, а «небо»— покоиться, была ссылка на большее совершенство покоя по сравнению с движением [41]. Следовательно, заключал Орем, покой должен быть присущ более совершенному небесному телу.

Нередко анализ логически (но не «физически») возможных случаев подавался в схоластических трактатах в аспекте так называемых casus divini — как случаев, возможных для всемогущего божества, но не существующих в природе. Однако асбсолютно неправильно, как это сделал Дюэм, изображать дело так, будто именно эти теологические обертоны и явились определяющими: будто схоласты, защищавшие идею божественного всемогущества и свободы, стремились вывести мысль за пределы аристотелевских положений как единственно возможных, как «сковывающих свободное проявление творческой силы бога». Нельзя забывать, что во многих случаях те же самые авторы «сковывали» это «свободное проявление» указанием на абсолютную невозможность некоторых вещей «даже для бога», например невозможность создания актуально-бесконечной величины. Рассмотрение логических возможностей, мысленный эксперимент — вот что было определяющим, а участие бога — нередко своего рода façon de parler. Например, суммирование членов бесконечно убывающего ряда подавалось иногда в следующем виде: в первые $^1/_2$ часа бог творит камень в 1 куб. фут, в следующие $^1/_4$ часа — еще камень и т. д. Существо аргументации не изменится, если вместо этого сказать: «камень возникает» и т. п. Поэтому смешно было бы принимать всерьез все подобные теологические орнаменты; с таким же правом можно было зачислить в разряд религиозных людей всякого, сказавшего «ей-богу» и «боже упаси». Да и сами средневековые авторы нередко говорили не о casus divini, а просто о «воображаемых» или «приемлемых в воображении» случаях. Бесконечная пустота за пределами нашей Вселенной и мно-

---

[41] «Такожде: знáком, что покой лучше движения, является то, что мы молимся богу о даровании покоя усопшим: requiem aeternam и т. д. Стало быть, покоиться и меньше двигаться — более совершенное состояние, чем двигаться и больше двигаться или находиться дальше от покоя» (цит. по книге: E. Borchert, Die Lehre von der Bewegung bei Nikolaus Oresme, Münster, 1934, p. 74). Противоположного взгляда держался Аверроэс, ставя движение выше покоя.

жественность миров остались для людей средневековья именно такими «воображаемыми» случаями.

Нам остается рассмотреть еще один вопрос средневековой динамики, трактовавшийся также скорее в философском, чем в строго физическом плане, а именно так называемую теорию *impetus*.

Аристотель, как нам уже известно, различал движения естественные и насильственные. Движение естественное (например, падение тяжелого тела вниз, т. е. к центру Земли или Вселенной) не требует, по Аристотелю, для своего объяснения никакой дополнительной причины. Всякое же насильственное движение (например, движение тела, брошенного в горизонтальном направлении) в такой причине нуждается: чтобы оно продолжалось, нужно непосредственно *соприкосновение* движущего и движущегося тел. Каким же образом сохраняется движение в брошенном теле, которое *оторвалось* от источника движения? Аристотель и некоторые его последователи хотели решить вопрос ссылкой на воздух, окружающий брошенное тело. Согласно античным комментаторам Аристотеля, воздуху сообщается некая «движущая сила», подобно тому как одно нагретое тело передает теплоту другому, или магнит передает силу железу, или, наконец, подобно тому как янтарю придают электрические свойства. Разумеется, вопрос этим не решался, а отодвигался, так как оставалось нераскрытым, каким же образом совершается передача движущей силы воздуху и почему в таком привилегированном положении оказывается лишь воздух, а другие (твердые) тела неспособны воспринимать подобную же движущую силу? В поисках нового ответа была создана теория, получившая на Западе название теории *impetus* (в дальнейшем этот термин мы будем передавать до некоторой степени условно термином «импульс»). Первые зачатки ее можно найти уже у Гиппарха, а в более развитом виде она была высказана александрийским ученым Иоанном Филопоном (VI в). Согласно Филопону, любое тело может получить «движущую силу» или «движущую энергию», способную поддерживать движение даже тогда, когда это тело оторвалось от своего источника движения. Первое свое развитие подобные взгляды получили у ученых Востока, в частности у Ибн-Сины, у Яхья-бен-Хади (ум. в 973/974 гг.), у ал-Замана (ум. ок. 1164 г.), у астрономов второй половины XII в. ал-Битроги («Алпетрагия») и Хибаталла ибн-Малка, а также у Насрэддина Туси (ум. в 1273 г.) [42].

---

[42] См. S. Pines: Etudes sur Awhad al-Zamân Abu'l Barakat al Baghdâdi. Revue des études juives, 1938, v. 3, p. 3; v. 4, p. 1—33; Les précurseurs musulmans de la théorie de l'*impetus*. Archeion, 1938 v. 21,

Прогрессивное историческое значение такой теории становится понятным, если вспомнить, что во многих средневековых трактатах источником движения небесных сфер признавались «души», «ангелы», «интеллигенции» и тому подобные нематериальные начала. На Западе первые упоминания о теории *impetus* появляются в XIII в., но наибольшее развитие она получила в трудах парижских номиналистов XIV в., в особенности у Жана Буридана, соображения которого мы и рассмотрим вкратце.

Рассматривая вращение мельничного жернова, который не останавливается сразу, Буридан приходил к выводу, что вращение это обусловлено приобретенным импульсом: быстро вращающийся жернов остановить труднее, чем медленно вращающийся [43]. Постепенное замедление Буридан объяснял сопротивлением «естественной тяжести» этого жернова; не будь такого сопротивления, движение, по мнению Буридана, может быть, и продолжалось бы до бесконечности. Касаясь вопроса о возрастании скорости при падении тяжелого тела, Буридан также прибегает к понятию *impetus*. «Естественная тяжесть» падающего тела остается постоянной; следовательно, причину возрастания скорости следует искать в чем-то другом. Причиной не может являться близость тяжелого тела к «естественному месту» (т. е. к центру Земли), как думали ортодоксальные аристотелики, полагавшие, что скорость тем больше, чем ближе тело к своему «естественному месту». Наоборот, по Буридану, чем оно *дальше* от него, т. е. чем больше проходимый при падении путь, чем выше поднято тело, тем более быстрым становится движение: при падении с большей высоты тело приобретает бо́льшую скорость. Следовательно, заключал Буридан, причину следует искать в импульсе, который становится тем больше, чем быстрее движется тело, в первый момент падения действует только «естественная тяжесть», к которой присоединяется затем все возрастающий импульс; и так тело непрерывно ускоряется (continue velocitatur). Примером *impetus*, возникающего при движении, является, по Буридану, прыжок с разбега; он ссылается также на баранов, которые, бодаясь друг с другом, расходятся сначала на известное расстояние. Теория передачи движения через посредство воздуха оказывается, по мнению Буридана, несостоятельной уже потому, что в этом случае непонятно, почему брошенную пушинку воздух «движет» труднее, чем брошенный тяжелый камень.

298—306. Un précurseur Bagdadien de la théorie de l'*impetus*. Isis, 1953, v. 44, 247—251.

[43] Дальнейшее изложение взглядов Буридана основано на его сочинении: Quaestiones super libros quattuor de Caelo et Mundo. Ed. E. A. Moody, Cambridge, Mass. 1942.

Теория *impetus*, которую Буридан стремился подкрепить как философскими соображениями, так и ссылкой на непосредственный опыт, продолжала держаться в XV и XVI вв. (см. ниже, стр. 152). Вряд ли правильно, как это иногда делалось, считать изложенную теорию *impetus* предшественницей теории инерционного движения: объясняя сохранение движения наличием некоторой силы, призванной поддерживать это движение, сторонники теории *impetus* были далеки от того, чтобы рассматривать движение как некоторое *состояние*, которое так же не требует особой причины для своего объяснения, как не требует его и состояние покоя. Из сказанного ясно, что *impetus* способен истощаться по мере движения.

В. П. Зубов

ФИЗИЧЕСКИЕ ИДЕИ РЕНЕССАНСА

Качественно новым в развитии науки является период, получивший название Ренессанса, или Возрождения. Термин этот часто понимался в узком смысле «возрождения классической древности». Однако сами люди этой эпохи понимали «возрождение» прежде всего как *свое собственное* возрождение, как новое рождение, второе рождение, т. е. как рождение *нового человека*. Обращение к античной культуре было не причиной, а наоборот, следствием происшедших культурных сдвигов. Для своего нового отношения к миру люди Возрождения искали опору в прошлом, принадлежа настоящему и будущему.

К «высокому Ренессансу», т. е. к XVI в., восходит концепция средневековья как «веков варварства», создавших перерыв культурной традиции. Из содержания предыдущего очерка явствует вся односторонность такой концепции. Тем не менее было бы абсолютно неправильно стирать границу между эпохами и акцентировать столь же односторонне лишь непрерывность научной преемственности, оставляя в стороне все качественно новое, что отличает Возрождение от средневековья. Ведь конкретную историю науки нельзя ограничивать перечнем открытий и изобретений и оперируя чисто количественными, статистическими показателями, говорить, например, как это делают некоторые зарубежные исследователи, о численном перевесе технических изобретений и новых научных идей в XIV в. по сравнению с XV в. Наиболее существенно, что с началом Ренессанса для развития технических изобретений и зачатков новых научных идей создаются в результате общественных сдвигов новые условия, создается новая общественная среда, до известной степени преодолевается разрыв между

кабинетной ученостью и голой практикой. С одной стороны, в науку приходят ремесленники, инженеры; с другой стороны, широко образованные люди начинают все больше прислушиваться к голосу практиков. Нарастает потребность в научно-технической литературе, свободной от схоластических форм изложения, написанной не на ученом латинском языке, а на национальных языках. Преодолеваются цеховая замкнутость и цеховое «секретничество»; люди, ранее лишенные возможности или не испытывавшие потребности письменно фиксировать и обобщать свой производственный опыт, составляют трактаты по наиболее важным отраслям и вопросам техники. В условиях роста производительных сил и нарождающихся капиталистических отношений возрастает значение науки для производства. В свою очередь само развитие производства становится условием дальнейшего развития науки, позволяет экспериментировать в несравненно более крупных размерах. Изобретение книгопечатания (1440) открывает возможности для более широкого распространения научных знаний. Наконец, в самом взгляде на мир происходят решительные сдвиги в результате географических открытий; достаточно напомнить открытие Америки Колумбом (1492), плавание Васко де Гамы в Индию вокруг Африки (1498), первое кругосветное путешествие Ф. Магеллана (1519—1522). За сравнительно короткое время европейцы узнали о земном шаре больше, чем они знали на протяжении всего Средневековья. В труде Николая Коперника «Об обращениях небесных кругов» (1543) Земля лишается своего привилегированного положения во Вселенной и, по выражению Энгельса, наука дает «отставку теологии» [1].

Точно определить начало нового периода, разумеется, трудно, в особенности потому, что сдвиги происходили не во всех областях культуры одновременно: в литературе и искусстве они стали заметны раньше, чем в науке.

В дальнейшем до некоторой степени условно мы будем пользоваться терминами «Ренессанс» и «Возрождение» применительно к периоду XV—XVI вв., столь же условно подразделяя его на два этапа — XV и XVI вв., которые применительно к культурной истории Италии принято обозначать терминами «кватроченто» и «квинквеченто».

Италия принадлежала к числу тех стран Европы, в которых

[1] Заметим, что путешествия XV—XVI вв. способствовали и открытию новых фактов, непосредственно интересующих физика. Таково открытие западного магнитного склонения во время плавания Колумба (1492), который наблюдал на расстоянии 200 морских миль к западу от острова Ферро отклонение магнитной стрелки на запад на 5°. Ранее было известно только восточное склонение.

ранее всего стали складываться капиталистические отношения. Именно здесь, начиная с XV в., стала особенно усиливаться роль ремесленников-практиков, архитекторов, живописцев и скульпторов в создании новой науки. В средние века основной областью практического применения геометрической оптики являлась астрономия, а уже в XIV в. появились новые практические запросы со стороны живописи. Уже к середине XIV в. относятся первые попытки применения центральной проекции в картинах (Амброджо Лоренцетти Сиенский), создаются предпосылки к последующему развитию теории перспективы. Ее разработкой усердно занимаются в первой половине XV в. живописцы Паоло Учелло и Томмазо Мазаччо. Зодчий Филиппо Брунеллески (1377—1446) пишет не дошедшие до нас трактаты по прикладной оптике, механике и математике, поддерживая дружеские отношения с математиком Паоло Тосканелли (1397—1482); скульптор Лоренцо Гиберти (1381—1455) пишет свой труд по истории и теории искусства, используя естественнонаучную литературу древности и средневековья и привлекая вопросы математики, оптики, анатомии для решения практических задач своего искусства.

Различные города Италии в XV в. специализируются в различных отраслях производства. Так, во Флоренции наиболее широкое развитие получает текстильная промышленность, Милан является городом оружейников и вообще мастеров, занятых обработкой металла, Венеция славится своими изделиями из стекла.

После падения Константинополя (1453) в Италию усилился приток греков, которые способствовали лучшему знакомству с наследием древней Греции, изучению забытых в средние века памятников древнегреческой литературы и науки. Филология в целом сделала большие успехи, не только обогатив науку новооткрытыми произведениями античных авторов или новыми переводами сочинений ранее известных, но и вооружив новыми приемами научной критики. С распространением книгопечатания эти достижения уже перестали в такой мере, как раньше, находиться под угрозой, поскольку сократилась возможность беспрерывного искажения текстов, их бесконечного варьирования при переписке. При всем обилии опечаток в старых изданиях наука уже была избавлена от непрерывных флюктуаций, неизбежных при постоянной переписке от руки. По существу, справочные пособия и руководства стали возможны только после изобретения книгопечатания.

Характерно для этой эпохи, что многие ученые занимались и естествознанием, и гуманитарными науками, а потому одновременно участвовали как в филологической разработке античного научного наследия, так и в творческом его освоении.

К деятелям, совмещавшим филологию с техническими знаниями, относится, например, Фра Джокондо (ок. 1435—1515), издатель Витрувия и Фронтина, зодчий, мостостроитель и гидротехник.

Типичной фигурой раннего Возрождения является Леон-Баттиста Альберти (1404—1472), который, наряду с изучением наук, занимался «воѐнными упражнениями, верховой ездой и искусством игры на музыкальных инструментах» [2]. Ученик выдающегося педагога своего времени Гаспарино Барсиццы, Альберти прошел гуманистическую школу и настолько проникся духом античной литературы, что написанная им на латинском языке комедия долгое время слыла за произведение древнего автора. Друг Брунеллески, Альберти, живо интересовался вопросами теории искусства и написал трактаты о живописи, скульптуре и архитектуре. Трактат «О зодчестве», задуманный как обширная энциклопедия в духе Витрувия, содержит особый раздел, посвященный механике, в котором изложены основы теории простых машин, дополненные практическими указаниями. Десятая книга этого трактата посвящена в значительной мере вопросам гидротехники.

При рассмотрении вопросов строительного искусства Альберти настойчиво указывал на необходимость прислушиваться к практическим советам ремесленников и к использованию их технического опыта, одновременно привлекая сведения из произведений античных авторов и обобщая собственные наблюдения над античными и средневековыми постройками.

Для отношения Альберти к научному наследию античности и средневековья характерно, что он стремился извлечь из него прежде всего практически нужное и эмпирически бесспорное. Так, в трактате о живописи он писал: «Мы оставляем в стороне философский спор, имеющий целью уяснить возникновение и образование цветов. В самом деле, к чему живописцу знать, каким образом цвет рождается из смешения редкого и плотного, теплого и сухого, или холодного и влажного?.. Живописцу достаточно знать, каковы цвета и каким образом ими пользоваться в живописи» [3]. В другом произведении, озаглавленном «Математические забавы», Альберти опускал доказательства и объяснения, считаясь с популярным характером сочинения. Адресуясь к феррарскому герцогу Лионелло д'Эсте, Альберти попытался в непринужденной форме письма сообщить некоторые приемы прикладной геометрии (определе-

---

[2] Л. - Б. Альберти. Десять книг о зодчестве, т. I. Изд-во Всес. Академии архитектуры, 1935, стр. XIX.

[3] Л. - Б. Альберти. Десять книг о зодчестве, т. II. Изд-во Всес. Академии архитектуры, 1937, стр. 338.

ние высоты недоступных предметов, измерение расстояний между двумя пунктами и т. п.), сформулировать принцип рычага, описать устройство фонтана и пересказать античную легенду об Архимеде, определившем удельный вес венца Гиерона [4].

Вряд ли можно, однако, упрекнуть Альберти в узком практицизме или голом эмпиризме. Для правильной оценки нужно принять во внимание общее состояние науки его эпохи: отказ от причинных объяснений был временным и направлялся главным образом против архаических объяснений древних и средневековых ученых, явно не удовлетворявших Альберти. Он прямо заявлял, что «из древних зданий ты полнее можешь узнать силу и свойство каждого камня, чем из писаний и повествований философов» [5]. Именно эта неудовлетворенность заставила его, например, оставить в стороне решение вопроса о причинах возникновения ветра, хотя как гуманист-литератор он и не преминул украсить свое изложение разноречивыми цитатами из прославленных авторов древности [6].

Научно-технические произведения Альберти — плодотворный результат встречи гуманистической учености и непосредственного практического опыта. Не столько о новизне тех или иных сведений приходится здесь говорить в первую очередь, сколько о том, что эти сведения были пущены в более широкое обращение, даже неновые идеи «заработали» по-новому. И притом они прошли критическую обработку,— фильтрацию и отсев. При общей оценке деятельности Альберти нужно всегда учитывать не только то, о чем он писал, но и то, о чем он не считал нужным писать.

Вместе с тем необходимо помнить, что далеко не все гуманисты Возрождения проявляли одинаковый интерес к естествознанию и технике. Самое слово humanitas имело в XV в. не тот смысл, который обычно вкладывают в него в нынешнем просторечии. Следуя Авлу Геллию [7], многие из гуманистов усматривали существо «человечности» (humanitas) в культивировании «благородных» искусств, т. е. в первую очередь так называемых «гуманитарных наук», и, в частности, классической филологии, противопоставляя себя самих «непросвещенной черни», классический латинский язык — варварскому, античную эпоху — последующим векам средневековья. Поэтому, например, чисто антикварный, археологический интерес преобладал в произведении Роберта Вальтурио «О военном деле»,

[4] Л.-Б. Альберти. Десять книг о зодчестве, т. II. Изд-во Всес. Академии архитектуры, 1937, стр. 67—100.
[5] Там же, т. I, кн. 2, гл. 8, стр. 57.
[6] Там же, т. I, кн. 1, гл. 3, стр. 14—17.
[7] Авл Геллий. Аттические ночи, XIII, 17.

напечатанном впервые в 1472 г. Собирательские интересы преобладали у Поджо Браччолини (1380—1459), который среди многих других забытых рукописей нашел в Сан-Галленском монастыре в Швейцарии трактат Витрувия. Такое же коллекционерство и преклонение перед древними авторами преобладало в деятельности Джорджо Валлы (1447—1500), который в своей энциклопедии «О вещах, к которым следует стремиться, и вещах, которых следует избегать» («De expetendis et fugiendis rebus»), напечатанном в Венеции в 1501 г., включил в отдел математики и механики отрывки из сочинений Архимеда, Евклида и Аполлония, не сумев достаточно критически разобраться в их научной ценности. Преклонение перед чистотой классической латыни приводило подчас к надменному игнорированию позднейшей научной литературы, как это было, например, с Анджело Полициано (1454—1494), который считал недопустимым ставить рядом «римлянина» Плиния и «варвара» Авиценну.

Именно против этой тенденции горячо восставал Леонардо да Винчи, заявляя: «Хотя бы я и не умел хорошо, как они, цитировать авторов, я буду цитировать гораздо более достойную вещь, ссылаясь на опыт, наставника их наставников. Они расхаживают чванные и напыщенные, разряженные и разукрашенные не своими, но чужими трудами, а в моих мне же самому отказывают; а если меня, изобретателя, презирают, насколько более должны быть порицаемы сами,— не изобретатели, а трубачи и пересказчики чужих произведений!» [8] Аристократическому «цицеронианству» такого рода гуманистов, писавших на латинском языке, Леонардо противопоставлял призыв писать на «народном», итальянском языке. «Я имею столько слов в моем родном языке,— писал он,— что скорее должен жаловаться на отсутствие надлежащего понятия о вещах, чем на отсутствие слов, при помощи которых я мог бы хорошо выразить содержание своей мысли» [9].

Многогранная деятельность Леонардо да Винчи (1452—1519), преемственно связанная со всей предшествующей эволюцией науки, явилась кульминационной точкой развития науки Возрождения в XV в. Дошедшие до нас записные книжки Леонардо свидетельствуют о внимательном изучении древних и средневековых авторов. Из античных авторов можно назвать имена Аристотеля, Архимеда, Евклида, Герона, Витрувия Плиния, Галена, Птолемея; из средневековых ученых Востока — Тебита ибн-Курра, ал-Кинди и Ибн-Сину; из за-

[8] Леонардо да Винчи. Избранные естественнонаучные произведения. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 25.
[9] Там же, стр. 24.

падноевропейских — Иордана Неморария, Вителo, Пекама, Альберта Саксонского и др.[10].

Вместе с тем нельзя забывать и о тех, кого Леонардо да Винчи не читал, но с кем он общался. Его записные книжки полны заметок вроде следующих: «Спроси Бенедетто Портинари, каким образом бегают по льду во Фландрии»; «Найди мастера по водным сооружениям и заставь рассказать о средствах защиты против воды и что они стоят». Леонардо интересуется, как строят плотины во Фландрии, собирается узнать у географа-путешественника Бартоломео Турко о приливах в Черном и Каспийском морях [11] и т. д.

Хотя в области теории теней Леонардо можно найти прямые параллели с античными и средневековыми трактатами, в заметках его в то же время содержится множество собственных тонких наблюдений над тенями и над явлениями, связанными с так называемой «воздушной перспективой»: башни в тумане, синева далеких гор, хлопья снега, освещение лесов и полей, цветовые отражения на лицах прохожих, проходящих по улицам, мокрым от дождя. Первичность таких наблюдений отражена в самой форме записей: «И я видел женщину, одетую в черное, с белым платком на голове, который казался вдвое бóльшим, чем ширина ее плеч, одетых в черное» [12]. Среди записей можно найти замечания о полете птиц: «Когда у птицы очень широкие крылья и небольшой хвост и хочет она подняться, она сильно поднимает крылья и, поворачиваясь, забирает под крылья ветер, который, становясь для нее клином, поднимает ее с быстротой,— как кортона, хищную птицу, которую я видел над Барбиги, идя в Фьезоле в 5-м году 14 марта» [13].

Леонардо внимательно читал средневековые трактаты по механике и физике. Но ни в одном из этих трактатов не было и речи хотя бы, например, о конкретном, экспериментальном изучении полета стрелы и артиллерийского ядра, или о слож-

---

[10] Вопросу об источниках Леонардо посвящены монографии Э. Сольми (E. S o l m i. Le fonti dei manoscritti di Leonardo da Vinci; Nuovi contributi alle fonti dei manoscritti di Leonardo da Vinci — «Giornale Storico della letteratura italiana» 31, 1908 и 1911) и П. Дюэма (P. D u h e m. Etudes sur Léonard de Vinci. Ceux qu'il a lus et ceux quil'ont lu. P., 1906—1914; 3 тома этой монографии перепечатаны в 1955 г.). Вторая монография, при всем обилии привлекаемого материала, в некоторых частных пунктах является спорной и совершенно неприемлемá по своей общей концепции, согласно которой итальянский Ренессанс явился «наследником парижской схоластики» и притом т о л ь к о наследником схоластики.

[11] Л е о н а р д о д а В и н ч и. Избранные естественнонаучные произведения. Изд-во АН СССР, 1955, стр 27, 393, 466.

[12] Т а м ж е, стр. 692.

[13] Т а м ж е, стр. 550—551.

нейших видах движения птиц при полете. Леонардо широко привлекал данные собственного и чужого производственного опыта. В отрывках, посвященных теории удара, использованы наблюдения над работой молотком,— наблюдения, почерпнутые непосредственно из практики скульптуры и металлообработки, из практики забивки свай и т. д. Мало того: Леонардо был не только зорким наблюдателем, но и активнейшим, неутомимым экспериментатором. Он экспериментально исследовал прочность горизонтальных балок, вертикальных стоек, наклонного бруса; он пытался экспериментально исследовать траекторию летящей стрелы и летящего ядра, ставя препятствия на разных расстояниях. Для изучения функций хвоста птицы он экспериментировал с ее моделью. Выясняя законы падения тел, он бросал с подмостков фигурки различной формы. Чтобы исследовать течение воды в разных частях реки, он пользовался окрашиванием струй, наблюдал движение зернышек в трубе или стеклянном ящике, измерял уклон течения посредством движущейся лодочки или кусочка пробки, изобретал приборы для измерения скорости течения на различной глубине, для наблюдения водоворотов. Исследуя законы воздушной перспективы, Леонардо пользовался стеклом, на которое наносил цвета отдаленных предметов, и определял при этом состав смеси красок.

Существенно подчеркнуть универсализм Леонардо: отдельные стороны его деятельности можно изолировать друг от друга лишь искусственно. Так, несомненно, что Леонардо пришел к вопросам оптики от живописи; теория света и теней, теория цветов привлекали его внимание прежде всего как живописца. Но как физика его интересовала и природа света сама по себе; не случайно ему принадлежат плодотворные, прогрессивные для его времени мысли об аналогии между распространением волн в воде и распространением света. Теория света и теней находила у Леонардо применение не только в живописи, но и в астрономии: толкуя свет Луны как отражение солнечных лучей от лунных морей, бороздимых волнами, Леонардо проявлял особый интерес к законам распределения света и тьмы на волнующейся водной поверхности. В теории монокулярного и бинокулярного зрения (и в частности при исследовании законов восприятия рельефа, интересовавших его как живописца) Леонардо применял свои анатомо-физиологические знания. Гидротехника смыкалась с геологическими наблюдениями и т. д.

Леонардо никогда не ограничивался пассивной регистрацией единичных наблюдений. Целенаправленное экспериментирование было устремлено к познанию общих закономерностей природы. Термин «закон природы» еще не установился во

времена Леонардо и не получил еще широкого распространения. Однако по существу то же самое понятие обозначалось у Леонардо словом regola (правило) [14]. Близко к тому же понятию закона понятие ragione (причина, разумное основание). В этом смысле нужно понимать слова Леонардо: «Нет действия в природе без причины (ragione), постигни причину, и тебе не нужен опыт» [15]. Это значит, что, по Леонардо, познание общей закономерности явления проникает гораздо глубже в существо вещей, нежели простая регистрация отдельных случаев того же явления. Согласно Леонардо, хотя природа и начинает с причины (ragione), но мы должны идти обратным путем, начиная с опыта, изыскивать «причину», т. е. общую закономерность явления [16].

Старший современник Леонардо, Леон-Баттиста Альберти избрал в качестве своей эмблемы крылатый глаз, а в своем трактате «О зодчестве» воздал хвалу зрению, как самому острому из чувств [17]. Для людей Ренессанса зрение было тем чувством, которое в наибольшей степени раскрывало перед ними все богатство действительности. «Все наше познание начинается с ощущений» [18],— писал Леонардо, повторяя формулу, известную на протяжении веков, но вкладывая в нее новое содержание. «Книга о живописи», составленная после смерти Леонардо из его фрагментарных записей, содержит восторженные похвалы «глазу», который «охватывает красоту всего мира», является источником достоверности в науках; более того, он породил самые науки и искусства, «измерил высоту и величину светил, открыл стихии и их расположение», является «государем математических наук» [19]. «Что побуждает тебя, о человек,— восклицал Леонардо,— покидать свое жилище в городе, оставлять родных и друзей и уходить в поля через горы и долины, что, как не природная красота мира, которой, если хорошенько вдуматься, мы наслаждаемся единственно посредством чувства зрения?» [20]

Однако это не значит, что познание ученого и художника упирается в аморфную массу чувственных данных. Леонардо требовал не простого видения, а «уменья видеть». Он критико-

---

[14] См., например: Леонардо да Винчи. Избранные естественнонаучные произведения. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 148.
[15] Там же, стр. 153.
[16] Там же, стр. 148.
[17] Л.-Б. Альберти. Десять книг о зодчестве, т. I. Изд-во Всес. Академии архитектуры, 1935, кн. 2, гл. 1, стр. 41.
[18] Леонардо да Винчи. Избранные естественнонаучные произведения. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 10.
[19] Там же, стр. 643.
[20] Там же, стр. 642.

вал наивно-сенсуалистическую позицию тех, кто утверждал, что «Солнце — такой величины, какой оно нам кажется» [21].

Неправ, по словам Леонардо, «бессмысленно срисовывающий» живописец, который «подобен зеркалу», подражающему всем противостоящим предметам, «не обладая знанием их» [22].

Источник трагедии научного творчества Леонардо заключался в разрыве между этой необычайной зоркостью — «умень-ем видеть» — и тем математическим аппаратом, который находился в его распоряжении. Леонардо-живописца глубоко волновали сложнейшие проблемы цветоведения, а вместе с тем ему еще не был известен даже закон синусов, один из основных законов диоптрики, не говоря о разложении белого цвета на спектральные цвета. Читая отрывки, посвященные гидротехнике и гидродинамике, можно видеть, что Леонардо интересовали сложнейшие явления движения воды, которые еще не поддавались математическому описанию. Вот почему на первый план выступал опыт гидротехника-практика, опыт корабельщика, опыт пловца; Леонардо зорко наблюдает особенности течения рек, размыв берегов, расположение подводных камней и невольно схематизирует сложнейшие явления. Разумеется, наблюдая полет птиц, Леонардо еще не мог дойти до открытия законов аэродинамики. И здесь на первом месте — зоркая наблюдательность, которая подчас сопровождалась схематизацией, упрощением явления. Так, например, наблюдая положения и движения птиц на высоте, Леонардо не всегда учитывал, что воздушные течения вверху не те же, что внизу, а потому неправильно оценивал роль ветра, формально правильно производя сложение и разложение сил так, как они ему рисовались.

По Леонардо, «пропорция обретается не только в числах и мерах, но также в звуках, тяжестях, временах и положениях и в любой силе, какая бы она ни была» [23]. Но в поисках этих универсальных пропорций, в стремлении к идеалу математического описания, Леонардо зачастую должен был ограничиваться констатацией самых общих соотношений «tanto-quanto» («чем больше, тем больше» и т. п.); отсюда проистекала примитивизация, сведение к простейшим действиям с величинами первой степени по тройному правилу. Так, например, сила света, интенсивность цвета были для Леонардо пропорциональны первой степени расстояния [24].

Широкие и разнообразные задачи, которыми занимался Леонардо да Винчи, были поставлены новым зарождающимся

[21] Леонардо да Винчи. Цит. соч., стр. 136—137.
[22] Там же, стр. 906.
[23] Там же, стр. 12.
[24] Там же, стр. 649—650. Об интенсивности света см. также стр. 699.

естествознанием. «Пропорционирование», к которому стремился Леонардо, должно было служить не только средством установить гармонический строй художественного произведения, и не только раскрыть количественные зависимости между вещами; в конечном итоге «пропорция» Леонардо должна была охватить *процессы*, т. е. функциональные зависимости между *изменяющимися* величинами. Разработка этой математической области еще находилась в зачаточном состоянии. По общеизвестному определению Энгельса, «поворотным пунктом в математике была декартова *переменная величина*» [25]. Размышления «калькуляторов» XIV в. (см. выше, стр. 115), подводившие к понятию переменной величины, были слишком тесно связаны с традиционной аристотелевской физикой, должны были оторваться от нее, поднявшись на более высокую ступень абстракции, чтобы вступить в плодотворное соприкосновение с реальными запросами практики. Задача эта была настолько трудной, что большинство ученых эпохи Возрождения предпочло идти собственным путем, не выискивая жемчужные зерна в куче схоластического сора, которым были полны многие сочинения средневековых «калькуляторов» и их последователей. У Леонардо можно найти лишь отголоски этих представлений, сказавшиеся отчасти и на его терминологии (термины «униформный», «дифформный», «градус» и т. п.).

Своеобразие отношения Леонардо к математике в том, что он всегда интересовался *физическим* смыслом того или иного алгоритма, диапазоном его возможного применения к фактам физического мира. Соотношения, рассматриваемые чисто абстрактно, вызывали его недоверие. Определив соотношение между величиной крыла и весом летучей мыши, Леонардо сразу же предостерегал от поспешного заключения, что то же соотношение должно сохраняться у всех животных без исключения. Чисто абстрактный анализ перипатетической формулы движения опять-таки прерывался апелляцией к опыту и репликой по адресу тех, кто «одним воображением хотели посредствовать между природой и людьми» [26].

При охарактеризованном уровне общего развития математики и только что указанных тенденциях Леонардо понятным становится его стремление заменить в ряде случаев математический вывод непосредственной *опытной* констатацией количественных соотношений между явлениями. Неслучайно поэтому значительное число измерительных приборов, описанных в заметках Леонардо. Таковы приборы для измерения силы ветра, для измерения пути, пройденного путником или повозкой,

[25] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 206.
[26] Леонардо да Винчи. Цит. соч., стр. 226.

таков гигрометр, известный уже ранее Л.-Б. Альберти и Николаю Кузанскому.

Энгельс назвал Леонардо «не только великим художником, но и великим математиком, механиком и инженером, которому обязаны важными открытиями самые разнообразные отрасли физики» [27]. Нельзя, думается нам, понимать эти слова Энгельса в разделительном смысле: Леонардо был великим математиком, великим механиком, великим инженером. Леонардо был великим человеком, в деятельности которого неразрывно были связаны математика, механика и инженерия, что позволило ему сделать открытия в разнообразных отраслях *физики*. Неслучайно, что самый обширный математический фрагмент в рукописях Леонардо, посвященный преобразованию площадей в равновеликие площади и тел в тела, равновеликие по объему, озаглавлен так: «Геометрия, охватывающая преобразования математических тел, которые состоят из вещества, способного растягиваться и сокращаться в зависимости от того, что необходимо изучающим их» [28]. Уже из этого заголовка явствует физичность математического мышления Леонардо, связь с практическими задачами, которые приходилось ему решать,— в данном случае при обработке металлов: чеканке, отливке деталей, при работе в качестве скульптора (в частности, при проектировании большой конной статуи Франческо Сфорца, миланского герцога).

Источник трагедии Леонардо, о которой мы уже говорили вскользь, заключался, следовательно, не в биографически-личных причинах, а в несоответствии между развитием физики и математики: для поставленных физических проблем не было адэкватного аппарата, исследование должно было ограничиваться наблюдением и экспериментом, без восхождения к той ragione, к тому закону, открытие которого, по мысли Леонардо, сделало бы ненужным суммирование отдельных частных опытов.

Трагичность фигуры Леонардо усиливается еще более, если взглянуть на исторические условия, в которых он жил. «После того как революция мирового рынка с конца XV столетия уничтожила торговое преобладание Северной Италии, началось движение в обратном направлении. Рабочие массами вытеснялись из городов в деревню...» [29] Раздробленная Италия была раздираема непрерывными войнами. Хищные, корыстолюбивые и честолюбивые правители отдельных областей были плохими меценатами. Леонардо был им нужен прежде всего как военный инженер и как живописец, увеличивающий блеск их двора. Им не было дела до его смелых замыслов в об-

[27] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 4.
[28] Леонардо да Винчи. Цит. соч., стр. 33—68.
[29] К. Маркс. Капитал, т. I. Госполитиздат, 1953, стр. 721.

ласти авиации. Им был не интересен физик-экспериментатор, математик, геолог, ботаник, анатом. В условиях беспрерывных войн Леонардо был лишен возможности широко развернуть созидательную деятельность в области гидротехники. Медленно, но неуклонно надвигалась феодальная реакция, еще более усилившаяся после смерти Леонардо, к середине XVI в.

Леонардо приходилось прокладывать пути новому экспериментальному естествознанию не только в обстановке непонимания и одиночества, но и в условиях острой идейной борьбы. Схоластика, как мы видели, вступила в стадию кризиса уже в XIV в. Но представители ее еще долго продолжали цепляться за старые позиции. Леонардо обрушивался на этих схоластов, которые занимались вопросами о сущности бога и бессмертии души,— вещами «недоказуемыми», «восстающими против ощущений», ведущими к бесконечным и бесплодным спорам и распрям. Он обличал искателей perpetuum mobile, не знающих истинных законов природы, алхимиков, которые хотят разбогатеть в один день, но живут и будут жить всегда в великой бедности, обрушивался на хиромантов и некромантов — заклинателей «духов», подробно раскрывая физическую нелепость понятия о нематериальных духах, действующих в природе, и называя подобные рассуждения «глупейшими из речей человеческих» [30].

Рука об руку с этой борьбой шла у Леонардо да Винчи ломка традиционных средневековых представлений о Вселенной. Земля перестает быть для Леонардо центром Вселенной. Перекликаясь со своим младшим современником, гениальным Коперником, Леонардо пишет многозначительные слова: «Солнце не движется». Его рассуждения о происхождении света Луны основаны на мысли, что Луна — другой мир, подобный нашему, что Вселенная — однородна. Он вплотную подошел к представлению о бесконечности Вселенной, которое стало определяющим для нового воззрения на мир.

До Леонардо в XV же веке два глубоко различных мыслителя с особенной энергией провозгласили новую идею бесконечности: Хасдай бен Авраам Крескас (1340—1410) и Николай Кузанский (1401—1464). Сочинение Крескаса «Ор Адонаи» было закончено им в 1410 г., в предполагаемый год его смерти. Первая задача, которую он поставил себе в этом сочинении, заключалась в том, чтобы «опровергнуть доводы и доказательства грека, затемнившего очи Израиля», т. е. Аристотеля [31].

---

[30] Леонардо да Винчи. Цит. соч., стр. 906.

[31] Еврейский текст и английский перевод 25 пропозиций первой книги «Ор Адонаи» помещен в книге: H. A. Wolfson. Cresca's critique of Aristotle. Problems of Aristotle's physics in jewish and arabic philosophy. Cambridge, Mass., 1929.

Шаг за шагом разбирал он аргументы Аристотеля против невозможности бесконечно большого тела, бесконечно большого протяжения, бесконечного числа. Представитель итальянского Возрождения Джованни Франческо Пико делла Мирандола (1469—1538) недаром цитировал Крескаса, критикуя аристотелевские концепции пространства и времени: новая концепция бесконечности была созвучна эпохе [32].

Николай Кузанский (Николай Кребс, 1401—1464), уроженец прирейнской области, учившийся в Падуе и близкий к итальянским гуманистам, настойчиво защищал идею, что Вселенная бесконечна, а следовательно, не имеет центра: ее центр — везде, окружность — нигде. Отсюда неизбежно вытекало следствие, что Земля уже не занимает какое-то привилегированное, центральное положение во Вселенной. По-новому предстали в этой связи и мысли об относительности движения, высказывавшиеся ранее (см. выше, стр. 123).

Николай Кузанский оказался созвучен эпохе и в другом отношении: в подчеркивании той роли, которая принадлежит количественным наблюдениям. В небольшом диалоге, написанном около 1450 г. и озаглавленном «О статических экспериментах», он наметил большую программу экспериментальных исследований. Беседа начинается с утверждения, что через различие веса надежнее, чем другими способами, можно проникнуть в «тайны вещей». В качестве примера приводится сравнение веса двух равных объемов воды, взятой из двух разных источников, что, по мнению автора, позволяет судить о различии их природы. В медицине взвешивание крови и мочи, применяемое вместе с наблюдением их цвета, дает более надежную основу для суждений, нежели заключения по одному лишь «обманчивому цвету»; природа трав, корней, стеблей, листьев, плодов, семян и соков постигается при помощи весов лучше, чем посредством «обманчивого вкуса». Николай Кузанский упоминает определение удельных весов, основанное на погружении тел в жидкость и позволяющее определять состав металлических сплавов и природу драгоценных камней. Как нам уже известно (стр. 55 и 89), эти приемы восходят к Архимеду и получили дальнейшее развитие на средневековом Востоке. «Взвесив дерево и взвесив после его сгорания золу, можно узнать, сколько воды было в огне». Николай Кузанский описывает первый гигрометр, для которого предлагает брать кусок шерсти, впитывающий влагу воздуха и становящийся в зависимости от этой влажности то тяжелее, то легче (анало-

[32] Известно влияние, которое Крескас оказал на Спинозу и на его учение о бесконечности материальной субстанции.

гичный гигрометр был описан несколько позднее в том же XV в. Л.-Б. Альберти и Леонардо да Винчи).

Большую роль играют у Николая Кузанского водяные часы (клепсидра): сравнивая вес воды, вытекающей в различных случаях, можно сопоставлять биения пульса (при одном и том же числе вздохов), определять глубину моря, скорость движения корабля, силу арбалетов и баллист, бомбард, скорость ветров (напомним, что Кардано даже позднее исходил в этом случае из гораздо менее надежной единицы измерения — из биений пульса).

«В музыке статические эксперименты чрезвычайно полезны, ибо из различия в весе двух консонирующих колоколов можно определить величину гармонического отношения», писал Николай Кузанский. Он не останавливался перед фантастическими проектами решения математических задач при помощи взвешивания (сравнение площадей и объемов, вплоть до квадратуры круга). Он полагал также возможным «взвешивать» силу магнита.

Идеи Николая Кузанского нашли свое отражение в труде падуанского медика С. Санторио (1561—1636), озаглавленном «О статической медицине» (1614); при помощи сконструированных им весов этот медик пытался определить величину «неощутимого испарения», происходящего через поры тела и в процессе дыхания. «Только тот,— полагал он,— кто будет знать, сколько и когда, больше или меньше теряет тело неприметным образом в процессе перспирации, только тот сумеет установить, сколько и когда нужно прибавить или отнять для сохранения и восстановления здоровья» [33].

Перейдем теперь к отличительным особенностям развития физических идей в XVI в. Тенденции, наметившиеся в предыдущем столетии, сохранились и продолжали развиваться. «Открытие Америки и морского пути вокруг Африки создало для подымающейся буржуазии новое поле деятельности. Остиндский и китайский рынки, колонизация Америки, обмен с колониями, увеличение количества средств обмена и товаров вообще дали неслыханный до тех пор толчок торговле, мореплаванию, промышленности и тем самым вызвали в распадавшемся феодальном обществе быстрое развитие революционного элемента.

Прежняя феодальная, или цеховая, организация промышленности более не могла удовлетворить спроса, возраставшего

---

[33] О труде Николая Кузанского «De staticis experimentis» и труде Санторио подробнее см.: В. П. Зубов. Из истории средневековой атомистики. Труды ИИЕ и ТАН СССР, т. I. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 302—304.

вместе с новыми рынками. Место ее заняла мануфактура»[34]. «Возрождение», начало которому было положено в Италии, все более захватывает другие страны. Внимание к технике, производственному опыту, практике все более начинает сказываться и в научной и художественной литературе. В бессмертном сочинении Рабле «Гаргантюа» (1534) герой повествования посещает со своим наставником ювелиров, часовщиков, чеканщиков монет, алхимиков и т. д. Испанский гуманист Хуан-Лодовико Вивес (1492—1540) в своем произведении «О преподавании наук» (De tradendis disciplinis) призывает к серьезному изучению строительного дела, навигации, сельского хозяйства, кулинарии, портновского дела и вообще ремесел, которые в средневековой иерархии «искусств» занимали самое скромное и подчиненное место. Показательно появление технических трактатов «Пиротехния» Ваноччо Бирингуччо (1480—1539) и «О горном деле» Георга Бауэра (Агриколы, 1494—1555). Первый из этих трактатов, посвященный в основном металлургии, появился в 1540 г., второй — в 1556 г. Несколько позднее, в 1574 г. в Праге увидел свет труд Лазаря Эркера «Aula subterranea» («Подземный чертог»), также посвященный горному делу.

В XVI в. продолжали сказываться гуманистические тенденции предшествующего столетия; так же как и раньше, многие ученые совмещали в одном лице натуралиста, техника и филолога. Примером могут служить: в Италии — Франческо Мауролико (1494—1575), горный инженер, оптик, издатель трудов Архимеда, Аполлония, Феодосия и Менелая; в Польше — Николай Коперник (1473—1543), не только астроном, медик и экономист, но и знаток греческого языка, переводчик сочинения Феофилакта из Симокатты; в Германии — Георг Агрикола, металлург, врач, политик-дипломат, получивший прекрасное филологическое образование. Гениально сочетал в своих научных трудах эксперимент и теорию фламандец Симон Стевин (1548—1620), инспектор сухопутных и гидротехнических сооружений.

Успехи техники неизбежно способствовали формированию нового типа ученого-самоучки, не связанного со старыми университетскими традициями. Примером является Никколо Тарталья (1499—1552), «магистр абака», преподававший коммерческую арифметику, а вместе с тем разрабатывавший вопросы баллистики (учение об оптимальном угле возвышения орудия, исследование траектории снарядов, брошенных под разными углами) в своих трудах «Новая наука» (La nova scientia, 1537)

[34] К. Маркс и Ф. Энгельс. Манифест Коммунистической партии. Избранные произведения, т. I. Госполитиздат, 1955, стр. 9—10.

и «Различные вопросы и изобретения» (Quesiti et invenzioni diverse, 1538 и 1546) [35].

Таким же самоучкой был венецианец Джованни Бенедетти (1530—1590), автор сочинения «Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber» («Книга различных математических и физических умозрений»), напечатанного в Турине в 1585 г. Начав с чтения книг Евклида под руководством Тартальи, он к концу своей жизни был математиком герцога Савойского.

Уже во второй половине XV в. и в начале XVI в. ученые, группировавшиеся при дворах правителей, приобрели для науки особое значение. Поощрение научных и технических знаний, в частности математических наук, вызывалось в первую очередь потребностями военного дела (фортификация, артиллерия) и гидротехнического строительства.

Одним из ученых центров был двор в Урбино — «городе математиков». Здесь работали: автор трактата об архитектуре и фортификации Франческо ди Джорджо Мартини (1425—1506), живописец и математик Пьеро деи-Франчески (ок. 1420—1492), математик Лука Пачоли (ок. 1445 — ок. 1514), автор «Суммы арифметики», написанной «для тех, кто умеет разумно применять в теории и практике математические науки». В XVI в. к числу урбинских математиков и механиков принадлежали Федериго Коммандино (1509—1575), переводчик Архимеда, Паппа, Герона и других греческих авторов, исследовавших вопросы о центрах тяжести тел; его ученик Гвидо Убальди дель Монте (1545—1607), позднее инспектор тосканских крепостей и покровитель Галилея.

Новые веяния отчасти сказались и на университетской науке. В Милане и Павии представителем ее был Джироламо Кардано (1501—1576), типичный энциклопедист XVI столетия, занимавшийся математикой, физикой и медициной. В математике наибольшую известность получило обнародованное им решение уравнений третьей степени, из-за которого он вел длительный спор о приоритете с Тартальей. Физические воззрения изложены в его энциклопедиях «О тонких материях» (1550) и «О свойствах вещей» (1557). Начиная с первичных стихий, Кардано переходит затем к небесным явлениям, от них — к минералам, растениям, животным и человеку, далее — к технической деятельности человека, рассматривая отдельные ремесла и искусства, и завершает оба своих труда «чу-

[35] Отрывки из работ Тартальи были включены Вальтером Рейффом (Ривиусом) в его немецкий перевод Витрувия (1547). Этот перевод был вскоре же широко использован Леонардом Фронспергером в его «Военной книге» (1566), из которой выводы Тартальи стали известны в России и вошли в «Устав ратных, пушечных и других дел» (1620).

десными» и «сверхъестественными» вещами. В своей автобиографии Кардано ставил себе в заслугу доказательство, что «учение Аристотеля о природе есть вещь пустая и вымышленная» [36]. Действительно, в ряде пунктов Кардано разошелся с традиционным аристотелевским учением: он не считал огонь особым элементом, сведя число элементов до трех (земля, вода, воздух), отвергал переход одного элемента в другой и т. д. В целом, однако, его произведения — причудливая смесь старого и нового: самых фантастических суеверий с плодами гуманистической учености и данными нового технического опыта.

Падуанский университет продолжал оставаться хранителем консервативных аверроистических традиций, но и здесь не могла не сказаться близость Венеции — торгового города, поддерживавшего торговые связи с Востоком, покровительствовавшего ремеслам и, в частности, «механическому искусству».

О роли венецианского Арсенала ярко свидетельствует позднейшее высказывание Галилея, с которого начинаются его знаменитые «Беседы»: «Обширное поле для размышления, думается мне, дает пытливым умам постоянная деятельность вашего знаменитого Арсенала, синьоры венецианцы, особенно в области, касающейся механики, потому что всякого рода инструменты и машины постоянно доставляются туда большим числом мастеров, из которых многие, путем наблюдений над созданиями предшественников и размышления при изготовлении собственных изделий, приобрели большие познания и остроту рассуждения» [37]. О том, что и в XVI в. к работе Арсенала присматривались люди науки, свидетельствует труд ученого комментатора Витрувия, Даниеле Барбаро (1514—1570), который при толковании десятой книги Витрувия, посвященной машинам, не раз ссылался на терминологию, применявшуюся мастерами венецианского Арсенала [38].

Характерно, что профессор Падуанского университета Джакомо Дзабарелла (1533—1589) уделил в своих трудах по логике главное внимание проблемам индукции и открытия новых научных истин в противовес односторонне дедуктивной направленности средневековой перипатетической логики.

Типичным представителем науки XVI в. является неаполитанец Джованни-Баттиста делла Порта (род. ок. 1540 г.,

---

[36] Джироламо Кардано. О моей жизни. М., ГИХЛ, 1938, стр. 197.

[37] Галилей. Сочинения, т. I. М—Л., ОНТИ, 1934, стр. 47.

[38] См. «Десять книг об архитектуре» Витрувия с комментарием Даниеле Барбаро. Изд-во Всес. Академии архитектуры, 1938, стр. XXV.

ум. в 1615 г.). Его «Натуральная магия» вышла первым изданием в четырех книгах в 1558 г. в Неаполе, а в исправленном и дополненном виде (в 20 книгах) — там же в 1589 г. Утверждая, что «натуральная магия» основана на действиях самой природы, Порта восставал против некритического следования авторитетам, против книжных знаний, не проверяемых опытом. Но фактически его собственное произведение явилось пестрым и в значительной мере некритическим сборником разнообразных рецептов и сведений, включая женскую косметику, мази, духи, краски для волос, фейерверки, кулинарию, охоту и рыбную ловлю, шифрование писем, симпатические чернила и т. п. Любопытно, что все, не укладывавшиеся в общую (довольно беспорядочную) схему произведения, было вынесено в последнюю книгу, носящую выразительное заглавие «Хаос» и представляющую собой, так сказать, «хаос в хаосе». Многие сведения почерпнуты у древних авторов, которых Порта обычно называет по имени, и у современных ученых и техников, имена которых он обычно не упоминает. Совершенно явно, что Порта не проверял на опыте большинство приводимых им рецептов; например, рецепты, как придать присутствующим лошадиные головы или как проверить целомудрие женщины при помощи магнита.

Такой же декларацией, не подкрепленной делами, остался совет уделять величайшее внимание количественной стороне явлений, дозировке и взвешиванию веществ,— поскольку, по словам Порты, «совершенство действий всех вещей заключается всецело в наилучшей пропорции надлежащей гармонии [39].

Во втором издании «Натуральной магии» физических проблем касаются книги 7-я (о магните) и 19-я (о «пневматике»). Большая 17-я книга посвящена зажигательным и «театральным» зеркалам, примыкая в этом отношении к сочинениям Герона. В той же книге (лишь во втором издании) в главе шестой автор «Натуральной магии» дал описание камеры-обскуры с линзой, предварив его фразой: «Теперь я возвещу то, о чем до сей поры всегда молчал и о чем считал нужным молчать». Это заявление давало повод приписывать Порте изобретение камеры-обскуры с линзой, что неверно: подобное описание имеется уже в рукописях Леонардо да Винчи (в XVI в. еще неопубликованных) и в сочинении Кардано «О тонких материях» (1550). Однако популярность «Натуральной магии» явилась причиной того, что камера-обскура с линзой приобрела широкую известность («Натуральная магия» выдержала 23 издания в латинском оригинале помимо 10 изданий на итальян-

[39] Io. Baptista Porta. Magiae naturalis... libri IV. Antverpiae, 1561, lib. I, cap. 20, p. 26 (ср. lib. I, cap. 19, p. 18 по изд. 1589).

ском языке и 8 — на французском, а также испанского, голландского и даже арабского переводов).

Другое заявление Порты [40] давало повод утверждать, будто он является изобретателем зрительной трубы. «Вогнутые линзы позволяют весьма отчетливо видеть далекие предметы, а выпуклые — близкие, а потому ты можешь пользоваться ими для лучшего зрения. Благодаря вогнутой линзе, ты видишь предметы очень мелкими, но четкими, а благодаря выпуклой — близкие предметы более крупными, но мутными: а если сумеешь правильно сочетать те и другие (si utrunque recte componere noveris), то и далекие, и близкие предметы будешь видеть более крупными и четкими. Немалую помощь мы оказали своим друзьям, которые видели далекие предметы расплывчатыми и близкие мутными, так что они стали все воспринимать в совершенстве».

Из контекста явствует, что речь идет об усовершенствовании очков, а не о зрительной трубе, однако не исключена возможность, что приведенный отрывок мог дать толчок к попытке сочетать две линзы, чего сам автор не имел в виду.

Энциклопедические сочинения Кардано и Порты типичны для XVI в., объятого жаждой новых сведений, стремящегося охватить все «разнообразие вещей», привлечь и тексты новооткрытых древних авторов, и данные расширяющегося технического опыта, и диковинные известия, получаемые от путешественников в далекие заморские страны. Кардано, Порта, так же как и швейцарский медик и химик Парацельс (1493—1541), бросают вызов вековым авторитетам во имя самостоятельного исследования.

Новая наука сделала наблюдение и опыт основным своим боевым лозунгом, но на определенном историческом этапе этот лозунг привел к противоречиям: исследователь-одиночка оказался не в силах охватить то «разнообразие вещей», которое открывалось при неимоверно быстром расширении старых границ опыта. Вместо непосредственного опыта приходилось обращаться, как и встарь, либо к книгам, либо к сообщениям очевидцев. Отсюда та причудливая смесь эксперимента и фантастики, которая отличает многие научные произведения XVI в.

Коллективные организации, академии XV—XVI вв. (как и первой половины XVII в.), не были еще академиями в современном значении этого слова. Они представляли собой в сущности ученые содружества, где в форме непринужденных бесед происходил обмен мнениями на самые разнообразные темы. Таковы были Телезианская академия в Неаполе, созданная философом Бернардино Телезио (1508—1588) для

[40] Io. Baptista Porta. Цит. соч., кн. XVII, гл. 10.

борьбы со схоластическим аристотелизмом, и «Академия тайн», организованная Портой также в Неаполе. Только коллективный, упорядоченный опыт мог коренным образом изменить положение дела: систематические работы научных центров (академий), организация научных экспедиций, регулярная связь между учеными различных стран,— только это могло обеспечить критическую проверку эмпирического материала, стихийно возраставшего в объеме. Все это стало возможным лишь в XVII в.

Нельзя забывать, наконец, что к середине столетия вместе с общим усилением феодальной реакции усилился напор сил, враждебных молодой экспериментальной науке. Для борьбы с новыми «ересями» в 1534 г. был основан орден иезуитов. В 1540 г. папа утвердил орден буллой, начинавшейся словами: «Боевой отряд воинствующей церкви...» На тридентском соборе (1545—1575) произошла консолидация сил католической реакции. В Испании, как и в других католических странах, свирепствовала инквизиция. Согласно уставу, регламентировавшему преподавание в иезуитских школах, в основу философского и естественнонаучного преподавания было положено чтение и схоластическое комментирование Аристотеля с характерным предупреждением: «не задерживаться на книгах физики столь долго, что на книги о душе и книги метафизики, главную часть философии, оставалось бы всего несколько месяцев» [41].

Представители этой так называемой «второй схоластики» зачастую превосходили схоластов XIII—XIV вв. по своей виртуозности. Начало ей было положено иезуитами Фонсека (1528—1597) в Коимбре и Суарецом (1548—1617) в Сеговии, Саламанке и Риме. Если в XIV в., в период распада схоластики, сквозь традиционную схоластическую форму порой пробивались новые живые мысли, то в воинствующей схоластике XVI—XVII вв. с самого начала не было ничего живого. Оторванная от действительности, она систематизировала взгляды далекого прошлого в засушенном виде, как растения в гербарии. Схоластические курсы стали на редкость стереотипны, везде одинаковы — в Португалии и Испании, в Риме и в Париже, в Польше и на Украине. Окончательно выработался тот тип схоласта, против которого направляли в первой половине века свои язвительные насмешки Эразм Роттердамский и Рабле, а позднее Мольер.

Трагической жертвой этой борьбы старого и нового пал Джордано Бруно (1550—1600), сожженный на костре по при-

[41] G. M. Pachtler. Ratio studiorum et institutiones scholasticae Societatis Jesu per Germaniam olim vigentes, t. II. Berolini, 1894, p. 139.

говору инквизиции. Проникнутый пафосом идеи о бесконечной Вселенной, неоднократно ссылавшийся в этом пункте на труды «божественного Кузанца», Бруно был пламенным защитником гелиоцентрической системы Коперника.

Эпиграфом к своей книге Коперник избрал древний девиз: «Пусть не входит сюда тот, кто не знает геометрии». Бруно, наоборот, стремился как бы распахнуть все двери, изложить новое учение о космосе в самых различных формах, для самых различных кругов; он писал то по-итальянски, то по-латыни, прозой и стихами. Свои мысли он излагал то в полемически заостренной форме тезисов, то в живой реалистической форме застольного диалога-спора между представителями противоположных воззрений.

Глубоко убежденный в том, что коперниканская система отражает действительность, а не является лишь удобной гипотезой, лишенной объективного значения, Бруно заявлял, что Коперника послали боги, как зарю, «которая должна предшествовать восходу солнца истинной античной философии, в течение веков погребенной в темных пещерах слепоты и злого бесстыдного, завистливого невежества»[42].

Бруно вдохновлялся представлениями античных материалистов Эпикура и Лукреция о бесконечном множестве миров,— представлениями, которые, как мы видели, лишь робко пробивали себе дорогу в позднем средневековье, когда множественность миров допускалась лишь как чисто мысленная, логическая возможность.

Заметим, что Бруно едва ли не первый раз обратил свой взор к научным теориям (а не только к поэзии) Лукреция. Издатели XVI в. обычно подчеркивали, что в поэме великого римского материалиста они ценят главным образом литературную форму, картины природы, а не «грезы» об атомах и пустоте.

В связи с Леонардо да Винчи нам уже пришлось говорить о разрыве между стремительным обогащением науки новыми экспериментальными данными и недостаточным математическим аппаратом. Этот разрыв до известной степени сохранился и в XVI в., в частности в области оптики, еще точнее — в области теории рефракции. Как мы уже знаем, начиная с XIII в. явления рефракции привлекали внимание ученых. Они продолжали привлекать внимание и позднее, но только в XVII в., после изобретения зрительной трубы, был открыт точный закон преломления.

В особом сочинении «О преломлении» (1593) Порта попытался дать первую теорию линз и исследовать строение глаза и законы зрения (в том чиле бинокулярного), однако не справился

[42] Джордано Бруно. Диалоги. Госполитиздат, 1949, стр. 56.

со своей задачей и не смог на основе старой теории «образов» дать сколько-нибудь удачное объяснение привлекаемых им фактов (и старых, и новых)[43].

Лишь посмертно, в 1611 г. было издано сочинение Франческо Мауролико «Фотисмы, касающиеся света и тени»[44], писавшееся в период 1521—1555 гг. Это сочинение привлекло к себе внимание только позднее, после изобретения зрительной трубы. Книга содержит правильное объяснение действия очков, хотя автору и остался неизвестным закон преломления, а потому он не мог точно изобразить ход лучей в линзе и в глазу.

В *механике* также наблюдается значительное развитие опытных наблюдений и эксперимента и наряду с этим более глубокое изучение и дальнейшее развитие архимедовских традиций.

Самые разнообразные эксперименты производил Леонардо да Винчи, пытаясь экспериментальным путем определить коэффициент трения скольжения, исследовать законы удара, сопротивление материалов, падение тел, траекторию горизонтально брошенного тела. Совершенно новаторскими были искания Леонардо в области авиации: помимо различных конструкций летательных аппаратов с крыльями в его записных книжках можно найти рисунки парашюта и геликоптера. Исследования центров тяжести находятся в русле античной традиции; более новы исследования центра тяжести полукруга и тетраэдра. В XVI в. архимедовские традиции продолжали и развивали Коммандино и его ученик Гвидо Убальди дель Монте (см. выше, стр. 145).

Прямым продолжением трудов Архимеда явились труды Стевина в области гидростатики. Закон Архимеда Стевин дополнил теоремой, согласно которой в случае равновесия центр тяжести однородного плавающего тела должен находиться выше центра тяжести вытесненной массы жидкости.

Невозможность вечного движения является для Стевина исходным тезисом, на основании которого он доказывает и теоремы, касающиеся давления жидкости в сосудах, и теоремы, касающиеся равновесия на наклонной плоскости.

Исходя из принципов, которые позднее легли в основу интегрального исчисления, Стевин исследовал давление жидко-

---

[43] После изобретения телескопа в 1610 г., в последние годы своей жизни Порта пытался освоить с точки зрения своих старых концепций новые открытия. Его упорство, а вместе с тем его беспомощность производят поистине драматическое впечатление. Незаконченная рукопись «О телескопе» осталась неопубликованной и была найдена лишь совсем недавно. См. M. A. Naldoni. L'ottica del Porta del «De refractione» al «De telescopio». Atti della Fondazione G. Ronchi, Anno VII, 1952, n. 1.

[44] Фотисмы — «озарения».

сти в сосуде с параллельными стенками и показал, что это давление зависит только от глубины и не зависит от величины, объема и формы сосуда; отсюда же Стевин вывел законы равновесия в сообщающихся сосудах.

Рассматривая вопрос об условиях равновесия на наклонной плоскости, Стевин воображает трехгранную призму с горизонтальными ребрами и лежащую на ней замкнутую цепь; одна из граней — горизонтальная, две другие образуют наклонные плоскости. Поскольку условия не меняются и остаются все время прежними, такая цепь двигаться не может, иначе было бы возможно вечное движение. Следовательно, можно удалить нижнюю симметричную часть цепи, и тогда мы убедимся, что левая часть цепи уравновешивает правую, т. е. на наклонных плоскостях равной высоты силы, действующие со стороны уравновешивающихся грузов вдоль наклонных плоскостей, обратно пропорциональны длинам этих плоскостей. Дальнейшие изыскания Стевина в этой области привели его к пользованию принципом сложения и разложения сил.

Мы уже говорили о теории *impetus*, получившей развитие в последний период средневековья. На протяжении XV—XVI вв. ученые продолжали пользоваться этим понятием. Рассмотрим отдельно применения этого понятия в случае вращательного, вертикального и горизонтального движений.

Вращение волчка и мельничного жернова, не прекращающееся сразу после того как они разобщены с источником движения, нередко фигурировало у средневековых ученых в качестве иллюстрации тезиса о сохранении *impetus*. Буридан даже высказывал в осторожной форме предположение, что такое движение могло бы продолжаться вечно, не будь противодействующей силы тяжести (см. выше, стр. 127). Для Аристотеля вечность движения сферической Вселенной была обусловлена *специфическими* свойствами небесной материи, качественно отличной от земной. В XV в. начинает утверждаться мнение, что всякое круговое (вращательное) движение может продолжаться вечно. Об этом заявлял, например, Николай Кузанский, опираясь на Прокла. Правда, одновременно с этим Николай Кузанский сближал impetus с душой, внося в механику анимистические представления.

В отношении падающих тел, как мы уже видели (стр. 127), Буридан отвергал мнение Аристотеля, будто скорость их тем больше, чем они ближе к своему «естественному» месту, т. е. к центру Земли. Наоборот, чем *дальше* находится тело от точки, куда оно падает, тем больше скорость в этой точке. С теми же самыми мыслями мы встречаемся в конце XVI в. у Бенедетти (см. стр. 145), которому неправильно приписывался приоритет в этом отношении. Более того, можно указать еще несколько

промежуточных звеньев: труды Алессандро Пикколомини (1547) и Юлия Цезаря Скалигера (1557), развивавших теорию аккумуляции *impetus'* ов в процессе движения под действием постоянной силы тяжести. Таким образом, постоянно действующая сила вызывает не равномерное движение, как думал Аристотель, а движение равномерно-ускоренное [45].

Укажем, что наряду с этим в XV и XVI вв. наметился и экспериментальный подход к изучению явлений падения. Различные варианты опытов производил Леонардо да Винчи, а позднее Стевин. Бросая шары с разной высоты, Стевин удостоверился, что они ударяются о землю одновременно.

Теория *impetus* находила применение и при анализе движения горизонтально брошенного тела. Здесь вопрос о силе *impetus* на разных стадиях движения долгое время оставался невыясненным. По Буридану, движущее (рука, тетива лука) некоторое время сопровождает движимое (камень, стрелу), и тогда сила вержения сочетается с силой импульса; затем наступает период, когда действует только приобретенный импульс, постепенно слабеющий в результате сопротивления «естественной тяжести» и среды. Соответственно вначале сила является наибольшей. Впрочем, у Буридана остается сомнение, почему стрела производит более сильное действие, будучи выпущена с более далекого расстояния,— он указывает, что, по мнению некоторых, действие импульса сказывается не сразу, как не сразу сказывается действие огня на процесс закипания воды.

В трудах Тартальи (1537, 1546), так же как и Кардано (1550) теоретически, с оглядкой на опыт практиков-артиллеристов, рассмотрены вопросы о траектории полета снаряда; но только Галилею принадлежит честь открытия, что траектория снаряда в этом случае (без учета сопротивления воздуха) имеет форму параболической кривой.

* * *

В итоге можно сказать, что в эпоху Возрождения на новой технической основе, в новой идеологической обстановке приобрели особое значение наблюдение и эксперимент. Новые представления о Вселенной — коперниканский гелиоцентризм, идея бесконечного изотропного пространства,— сопряженные с пересмотром понятий времени и движения, привели в состояние брожения динамику.

Господствовавшие в средние века представления о силе и движении подвергаются пересмотру в свете новых предста-

[45] История этого вопроса подробно рассмотрена в статье П. Дюэма «De l'accélération produite par une force constante». Congrès international de philosophie, Geneve, 1905, p. 859—915.

влений о Вселенной, отрываются от концепций ограниченного в пространстве космоса, до того накладывавших свой отпечаток на все рассуждения о движении (см. выше, стр. 123). Одновременно с этим математический аппарат оказывается еще далеко не достаточным для того, чтобы справиться с математическим описанием и собственно физическим объяснением тех сложных конкретных явлений, к которым впервые привлечено было внимание. Для подлинного рождения новой физической науки потребовалось, с одной стороны, развитие новой математики переменных величин, а с другой — подъем всей физики в целом на более высокую ступень абстрактного мышления. Этот сдвиг, происшедший в XVII в., был связан с именами Декарта и Галилея. Только на этой основе стало возможным механическое объяснение небесных движений, данное в трудах Ньютона, истолкование динамики небесных систем с точки зрения «земной» механики, прочно вставшей на ноги. Так сдвиги, происшедшие в XVI в. в астрономии, повлияли на развитие механики, которая, в свою очередь, в дальнейшем стимулировала новый прогресс астрономического знания.

Сказанное наглядно иллюстрируется на примере Коперника. Дав математическую интерпретацию небесных движений с точки зрения гелиоцентризма, глубоко убежденный в объективной истинности предложенной им системы, Коперник еще не мог дать ее физическую интерпретацию. Упразднив аристотелевское противопоставление небесного и земного, усматривая в Земле одно из небесных тел, Коперник счел себя вправе приписать Земле постоянное круговое движение, являвшееся у аристотеликов неотъемлемой привилегией «небесных» тел, противопоставляемых четырем «подлунным стихиям». Вместе с тем, однако, Коперник обладал еще далеко не ясными представлениями о центробежной силе, и в ответ на птолемеевское соображение, что в случае вращения Земли центробежная сила не замедлила бы сказаться на земных предметах, указывал, что такая сила проявляется лишь в «искусственно сделанных» предметах, вращаемых «насильственно», и не сказывается в тех телах, для которых круговое (вращательное) движение «естественно». Коперник был еще далек от идеи инерциального прямолинейного движения, мысля по-аристотелевски, что прямолинейное движение происходит лишь тогда, когда тела выведены из своего «естественного» положения и стремятся вновь занять «естественное» для них место, соединиться со своим «целым» (оттого-то земные предметы и падают на Землю).

Точно так же для Кеплера слово «инерция» означало лишь сопротивляемость движению, соответствуя скорее нашему понятию массы: он говорил, например, о естественной «адина-

мии» (или бессилии) тела переходить с места на место, о «естественной инерции,или покое», благодаря которой тело покоится в любом месте, где оно находится, предоставленное самому себе. Чтобы объяснить постоянство небесных движений, Кеплер прибегал к представлению о некоей движущей силе, исходящей от Солнца, действие которой он уподоблял действию магнитной силы. Заметим, что открытие трех кеплеровых законов было неразрывно связано с освоением теории конических сечений, известной уже древним, но почти вовсе не разрабатывавшейся в средние века, и — что не менее важно — с введением инфинитезимальных методов. Открытие кеплеровых законов позволило не сводить больше сложные небесные движения к комбинации одних лишь «совершенных» круговых движений. Насколько было трудно отрешиться от подобных представлений, показывает пример даже Галилея, недооценившего значение кеплеровых законов [46]. Но дело не в одной лишь трудности преодоления привычных представлений: как уже сказано, «физикализация» открытых законов, их механическое объяснение стали возможными в результате упорных исканий и борьбы лишь в конце следующего, XVII в. в трудах Ньютона.

---

[46] Недавно была сделана попытка показать, что немалую роль в этом случае сыграли эстетические представления Галилея о круге как совершенной фигуре наряду с представлениями о совершенстве и простоте мироздания. См. E. P a n o f s k y. Galileo as a critic of the arts: aesthetic attitude and scientific thought. Isis, v. 47, 1956, part I, № 147, p. 3—15.

Б. Г. Кузнецов

ГЕНЕЗИС МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЯСНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ИДЕИ КАРТЕЗИАНСКОЙ ФИЗИКИ

В предыдущих очерках рассматривалось развитие физических идей в рамках определенных исторических периодов, охарактеризованных с общеисторической точки зрения,— физические идеи древности, средневековья и Возрождения. Вплоть до XVI в. включительно очень трудно указать руководящие идеи, провозглашение и разработка которых позволяют охарактеризовать каждый период в развитии науки. С начала XVII в. каждый новый период связан с определенным обобщением физических знаний, и для каждого периода можно найти некоторую обобщенную идею. Наиболее общей идеей, объединяющей развитие физических взглядов в первой половине XVII в., была идея механического объяснения природы. Физика первой половины XVII столетия пронизана глубоким убеждением, что все физические явления можно свести к перемещению тел, которые отличаются друг от друга лишь своими геометрическими свойствами. Необходимо сразу же сказать, что эта идея в несколько модифицированной и усложненной форме прочно вошла в физику. Впоследствии же выяснилось, что сложные формы движения не сводятся к простому механическому перемещению, но вместе с тем и неотделимы от него; механицизм в этом смысле содержал рациональное зерно, и выросшая на механистической основе классическая физика сохранила свое значение в современной науке в качестве приближения, законного для очень широкой области.

Следует сказать, что стройная система механических законов, положенных в основу классической физики, была создана не в первой половине XVII в., а в последующий период,

но генезис идеи универсального механического объяснения природы был делом первой половины XVII в. От знаменитой декларации Галилея: «думая о материи, или телесной субстанции, я подразумеваю, что она ограничена, или обладает той или другой фигурой, что она по отношению к другой больше или меньше, что она находится в том или другом месте, в то или другое время, что она или движется или находится в покое...» [1] до картезианской физики, где нет ничего кроме движущейся и лишенной качественных свойств материи, мы видим одну линию последовательного развития принципа механического объяснения природы. Как уже сказано, это еще не законченная механическая картина мира — последняя была создана во второй половине XVII в. и главным образом в XVIII в.,— это именно *генезис* механического объяснения природы.

Условием механического объяснения природы и сведения физических процессов к перемещению бескачественной субстанции было дальнейшее преодоление антропоморфизма и антропоцентризма в науке, выяснение *относительности* той антропоцентрической картины мира, которую средневековье унаследовало от древности. Уже в средние века появилась идея бесконечной, не имеющей центра Вселенной и связанная с этим образом идея однородного и изотропного пространства. Но в XVIII в. эти идеи приобрели новую форму. Телескоп раздвинул границы космоса. Он нанес окончательный удар геоцентризму. Борьба против геоцентризма внесла в физику одну из самых фундаментальных идей — идею однородности пространства, тесно связанную с идеей инерции и классическим принципом относительности. Это было важнейшим результатом работ Галилея.

Ни Бэкон, декларировавший преимущества опытного исследования природы, ни выдающиеся экспериментаторы начала XVII в. не были основателями новой физики. Эта роль принадлежит Галилею. Его физические идеи лежат на главной дороге естественнонаучных открытий XVII в. Они тесно связаны с гелиоцентризмом. Мы остановимся вкратце на развитии гелиоцентризма и его воздействии на основные физические идеи XVII в.

Уже Коперник, стремясь показать объективный характер гелиоцентризма, выдвинул тезис об относительности движения. Вращение Земли вокруг Солнца и вращение Солнца вокруг Земли приводит к одним и тем же физическим явлениям. Это соображение было направлено против распространенных в средние века и в XVI в. аргументов против движения Земли.

---

[1] G. G a l i l e i. Le Opere. Firenze, Ed. Albèrti, 1842—1856, v. IV, p. 333.

Вторая часть задачи Коперника состояла в утверждении истинного характера движения Земли. Это чрезвычайно важная сторона гелиоцентризма. Церковная реакция в XVII в. часто принимала форму релятивирования гелиоцентризма, утверждения, будто гелиоцентризм обладает лишь прагматической ценностью. Подобная мысль, выраженная Осиандером в предисловии к книге Коперника, неоднократно повторялась. Осиандер, представитель протестантской церковной реакции, нашел преемников в ряде католических богословов, а впоследствии — представителей субъективного идеализма, утверждавших, что система Коперника не должна претендовать на объективный характер и представляет собой лишь практически полезное формальное построение.

В работах Галилея телескоп не только расширил Вселенную, но и дал значительный толчок представлению о ее бесконечности. Разумеется, бесконечность Вселенной не могла быть логически выведена из представлений о любых, самых громадных масштабах известной нам части Вселенной. Но исторически последовательное расширение той части Вселенной, которую можно наблюдать при помощи астрономических приборов, служит сильнейшим орудием превращения идеи бесконечности мира из натурфилософской догадки в более или менее достоверную физическую концепцию. Галилей считал своей исторической заслугой расширение космического кругозора людей. В 1638 г. в одном из писем, сообщая о своей слепоте, Галилей писал: «Вы можете себе представить, как я горюю, когда я сознаю, что это небо, этот мир и Вселенная, которые моими наблюдениями и ясными доказательствами расширены в сто и в тысячу раз по сравнению с тем, какими их считали люди науки во все минувшие столетия,— теперь для меня так уменьшились и сократились» [2].

Бесконечность мира у Галилея является основой бесконечности науки. Но, указывая на непрерывное изменение научных знаний, Галилей все время подчеркивает их достоверность, существование некоторого субстрата, который сохраняется при дальнейшем развитии представлений о природе.

Галилей говорит, что человеческий разум, как бы далеко он ни шел, всегда будет охватывать лишь бесконечно малую часть истины. Но вместе с тем по уровню достоверности разум способен вполне постичь природу. Он пишет: «Экстенсивно, т. е. по отношению ко множеству познаваемых объектов, а это множество бесконечно, познание человека как бы ничто, хотя он и познает тысячи истин, так как тысяча по сравнению с бесконеч-

[2] G. Galilei. Le Opere. Firenze, Ed. naz. 1890—1909, v. XVII, p. 247.

ностью как бы нуль; но если взять познание интенсивно, то, поскольку термин «интенсивное» означает совершенное познание какой-либо истины, то я утверждаю, что человеческий разум познает некоторые истины столь совершенно и с такой абсолютной достоверностью, какую имеет сама природа» [3].

В чем же заключается, согласно Галилею, действительная причина явлений природы? Это единая материальная субстанция, лишенная качественных свойств. Подобная механически ограниченная концепция была в то время направлена против схоластического объяснения. В этом отношении Галилей развил концепцию Кеплера, писавшего: «Там, где Аристотель усматривает между двумя вещами прямую противоположность, лишенную посредствующих звеньев, там я, философски рассматривая геометрию, нахожу опосредствованную противоположность; так что там, где у Аристотеля один термин: «иное», у нас два термина: «болсе» и «менсе» [4].

В работах Галилея мы часто встречаем утверждение о неуничтожаемости вещества, о том, что все перемены, происходящие в природе, состоят лишь в переходе к иным конфигурациям частей материи. Нужно только сказать, что идея механического объяснения природы у Галилея не получила еще такого резкого и одностороннего выражения, какое она приобрела у Декарта и примыкавших к нему физиков. Тем не менее эта идея была руководящим принципом исследований Галилея.

Если подчеркивать те новые элементы науки, которые отличают Галилея от предшествующих мыслителей, то важно отметить следующее. Идея механического объяснения природы у Галилея опиралась на открытия, сделанные при помощи оптических приборов, вооруживших глаз человека. Когда Галилей в ночь на 7-е января 1610 г. направил зрительную трубу на звездное небо, он руководствовался поисками некоторых общих механических закономерностей, простирающихся на бесконечное пространство и находимых с помощью физических приборов. Утром 7 января 1610 г. Галилей сообщил об открытии спутников Юпитера; вскоре он увидел ландшафт Луны, испещренный углублениями и возвышениями; далее он обнаружил, что Млечный путь состоит из отдельных звезд. Все это было доказательством гелиоцентризма, правда косвенным, но игравшим очень большую историческую роль. Небесные тела оказались похожими на Землю. Следующий шаг состоял в применении к небесным телам закономерностей земной механики. Наиболее важным принципом механики, примененным ко Вселенной, был принцип инерции. В «Диалоге о

[3] Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 89.

[4] Kepler. Opere omnia, t. 1. Frankfurt, 1858, p. 423.

двух системах мира» Галилей выдвинул идею космической инерции в качестве главного аргумента в пользу системы Коперника. Напомним читателю об этой книге.

В 1632 г. Галилей опубликовал «Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой», снабдив его предисловием, в котором, надеясь избежать нападок инквизации и иезуитов, предупреждал, что аргументы в пользу коперниканства приводятся лишь для того, чтобы продемонстрировать компетентность церковного запрета коперниканства. В беседах трех персонажей — Сагредо, Сальвиати и Симпличчио — раскрываются идеи Галилея. Первые беседы касаются вопроса о принципиальном единстве Земли и небесных тел, суточного вращения Земли, ее годового обращения и, наконец, проблемы приливов и отливов. Сначала Галилей стремится показать, что наблюдаемая картина неподвижной Земли имеет относительный характер. Основной аргумент состоит в том, что в инерциальных системах физические процессы происходят одинаково, что покой и движение по инерции эквивалентны по вызываемым ими физическим явлениям. При этом следует отметить, что у Галилея еще нет мысли о прямолинейном характере движения по инерции. Наоборот, он считает, что небесные тела движутся по инерции, описывая круговые орбиты. Это исключало возможность действительного объяснения движения небесных тел при помощи земной механики. Подобная задача была решена после того как Декарт пришел к идее прямолинейного инерционного движения, а Ньютон дополнил представление о движении по инерции законом тяготения.

Теория ускоренного движения была изложена Галилеем в «Беседах и математических доказательствах»— книге, написанной после расправы, последовавшей за опубликованием «Диалога». Приговоренный к молчанию, находясь под надзором инквизиции, Галилей написал книгу, которую в 1638 г. удалось опубликовать в протестантском Лейдене. Она называется «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местным движениям». Две новые отрасли науки — это динамика и сопротивление материалов. Наиболее важное для развития физики содержание «Бесед» состоит в доказательстве закона падения тел. Галилей выступает против аристотелевской концепции различной скорости падения различных по тяжести тел и доказывает постоянство скорости падения тел в пустоте мысленными экспериментами. Перипатетики утверждали, что большой камень падает быстрее меньшего. Приписывая большему камню скорость, равную восьми, а малому — скорость, равную четырем, Галилей приходит к тому, что эти два камня, соединенные вместе, будут падать со скоростью равной шести,

но объединенный таким образом груз тяжелее большого камня и, согласно перипатетическому взгляду, он должен падать скорее. Таким образом, трациционный взгляд приводит к противоречию. Подобные построения, высказывавшиеся уже средневековыми номиналистами, стали у Галилея основой дальнейших выводов, которые подтверждались уже не только мысленными, но и реальными экспериментами. Галилей переходит от теоретического рассмотрения падения тел в пустоте к изучению наклонной плоскости. «Затем, чтобы иметь дело с движением по возможности медленным, при котором уменьшается сопротивление среды, изменяющее явление, обусловливаемое простой силой тяжести, я придумал заставлять тело двигаться по наклонной плоскости, поставленной под небольшим углом к горизонту; при таком движении совершенно так же, как и при свободном отвесном падении, должна обнаружиться разница, происходящая от веса».

Эксперименты Галилея требовали новой техники измерения времени. Галилей пользовался большими сосудами с небольшими отверстиями внизу. Из такого сосуда вытекала вода; взвешивая ее, Галилей мог определить сравнительно точно время, в течение которого происходило движение шаров по наклонной плоскости.

Далее Галилей перешел к опытам с маятником. При этом можно было устранить трение тела, катящегося по наклонной плоскости. Галилею удалось установить, что свинцовый и пробковый шары, подвешенные на нитях одной и той же длины, описывают одни и те же дуги.

Значительную роль в развитии физики XVII в. имела вторая проблема, рассматривавшаяся в «Беседах и математических доказательствах»,— проблема сопротивления материалов. Галилей исходит из непрерывности вещества. Вещество может быть раздроблено на невидимые частицы. Эти частицы в свою очередь состоят из еще более дробных частей вещества. Дробимость вещества бесконечна, и элементы вещества имеют бесконечно малые размеры. «Если мы разделим тело на конечное число частей, то, без сомнения не сможем получить из них тела, которое занимало бы объем, превышающий первоначальный, без того, чтобы между частями не образовалось пустого пространства, т. е. такого пространства, которое не заполнено частями данного твердого тела; но если мы дойдем до последнего крайнего разложения тела на бесконечное множество мельчайших составляющих его частиц, то мы можем представить себе вещество занимающим в таком состоянии большее пространство без присутствия конечных пустых мест... Таким образом можно, например, превратить маленький золотой шарик в тело весьма большой величины без образования в нем

конечных пустых пространств. Во всяком случае мы должны признать, что золото состоит из бесконечно малых неделимых частиц» [5].

По мнению Галилея, самый тонкий порошок состоит из конечных частиц, которые могут быть разделены далее, жидкость же состоит из бесконечно малых частиц. «Отсюда, кажется мне, можно вполне основательно заключить, что частицы воды, из которых она, по-видимому, состоит (более тонкие, нежели любой мельчайший порошок, и лишенные всякой устойчивости), весьма отличны от частиц конечных и делимых; и я не могу найти причины различия иначе как в том, что они неделимы». Идеи «Диалога» и идеи «Бесед» еще не объединены. В «Диалоге» рассматриваются инерционные движения, в «Беседах» — ускоренные. Между тем, уже у Кеплера понятие ускорения вошло в астрономию. Объединение галилеева принципа космической инерции с кеплеровым представлением об ускоренном движении небесных тел было задачей, которую предстояло решить Ньютону. Что же касается общих физических представлений Галилея, его идея сводимости явлений природы к перемещению бескачественных частей вещества получила гораздо более последовательное и вместе с тем одностороннее развитие в физике Декарта. Декарт построил единую картину мира, где все явления, начиная от образования небесных тел и кончая физиологическими процессами, объяснялись теми или иными движениями бескачественной материи. Замысел Декарта, однако, не мог быть выполнен без произвольных построений. Если астрономия после Галилея быстро превратилась в науку, оперирующую точными измерениями, то физические, химические, геологические и биологические явления в первой половине XVII в. еще не могли быть объектом точного эксперимента. Отсюда в последнем счете произвольный характер картезианской физики.

Физика Декарта освободила науку от канонизированного средневекового аристотелизма. Она дала толчок экспериментальному изучению явлений звука, теплоты, света, магнетизма, электричества и тяготения, и результаты экспериментов позволили в следующий период перейти к более строгой и однозначной картине мира. Общий ход событий в сороковые-семидесятые годы XVII в. представляется в следующем виде.

В Италии в этот период началась полоса спада научной мысли. Свободная мысль должна была противостоять политической и идейной реакции, террору инквизиции и деятельности конгрегации индекса. По мере перенесения центров промышленности и торговли на север там вырастали новые научные центры.

[5] Галилей. Соч., т. I. Беседы и математические доказательства. М.—Л., ГТТИ, 1934, стр. 85—86.

Во Франции рост мануфактур, выступления горожан против королевской власти, борьба против засилия иезуитов создавали благоприятную, но, впрочем, крайне неустойчивую обстановку для антисхоластических тенденций в науке. Еще свободнее дышалось в Голландии, освобожденной от испанского владычества и духовного подчинения Ватикану.

В тридцатые годы, еще до процесса Галилея, начинается научная деятельность Декарта. Этот выходец из провинциального дворянства Франции, проведший свою юность в Париже и затем участвовавший в Тридцатилетней войне, в 1629 г. поселился в Голландии. Даже здесь он страшился католической церкви и под впечатлением процесса Галилея старательно подчеркивал условный характер своей системы. Впрочем, это не относится к первому изложению физических идей Декарта — «Миру или трактату о свете» (1622—1633), опубликованному только в 1664 г. В 1637 г. Декарт написал «Рассуждение о методе» с приложениями — оптическим трактатом и математической работой, положившей начало аналитической геометрии. Несколько позже, в 1644 г. вышли «Начала философии», излагающие, наряду с идеалистической метафизикой Декарта, его материалистичесыую физику. Первая часть этой книги собственно философская, вторая излагает учение Декарта о материи, третья говорит о строении Вселенной и четвертая — о Земле.

Исходная идея физики Декарта — отождествление вещества и пространства — лежала в основе универсальной системы чисто механического объяснения известных тогда астрономических, механических, физических, химических и биологических явлений. Постоянно оговариваясь насчет гипотетического характера механической картины мира, Декарт последовательно развертывает ее не только в пространстве, но и во времени, строя механистическую космогоническую систему. Он рассказывает, как образуются вихри различных элементов вещества, как эти вихри создают Солнце и планеты. Эти вихри объясняют тяжесть тел. Кинетические модели Декарта надолго стали образцом для физических теорий.

Одновременно с Декартом аристотелевскую физику атакует его современник, почти сверстник, Пьер Гассенди (1592—1655), провинциальный каноник, а затем профессор механики в Париже. Уже в юности он написал известный памфлет против Аристотеля «Exercitationes paradoxiae adversus Aristoteleos», затем, в сороковые-пятидесятые годы — изложение физики Эпикура («De vita, moribus et doctrina Epicuri», 1647, «Philosophiae Epicuri syntagma», 1655) и несколько работ по механике («De proportione qua gravia decidentia accelerantur» 1646; «De motu impresso a motore translato», 1649).

Восстанавливая эпикурейскую атомистику, Гассенди стремился объяснить свойства тел конфигурациями и формами неделимых частиц. Он объяснял тяготение, электричество, магнетизм и свет истечениями, состоящими из атомов различных форм. Атомистическая физика Гассенди, оперировавшая неделимыми атомами, и по существу континуальная физика Декарта, допускавшая, как мы увидим дальше, разрушение частиц, соперничали между собой в смелости и часто в противоречивости кинетических гипотез.

Схоласты получали удары и с другой стороны — со стороны развивавшегося и тесно связанного с производственной техникой экспериментального изучения природы. Эксперименты ставились и раньше; однако в средние века физические и химические эксперименты исходили из представлений о «влияниях» и «симпатиях»— из антикаузального арсенала средневековой науки. Начиная с Гильберта, эксперимент становится опорой механического естествознания. Но в начале XVII в. еще не было тех сравнительно совершенных технических приёмов, которые в середине века позволили расширить возможности и объем экспериментальных работ в физике. В тесной связи с ремесленной мануфактурной техникой экспериментальная техника тридцатых-пятидесятых годов XVII в. достигла уровня, характерными иллюстрациями которого могут служить приборы Отто фон Герике и Роберта Бойля.

Отто фон Герике (1602—1686) — бургомистр Магдебурга, генерал-квартирмейстер, фортификатор, политический деятель, дипломат и неутомимый физик-экспериментатор. Во второй половине сороковых и в пятидесятые годы он провел в Магдебурге серию замечательных опытов. Приборы Герике демонстрируют связь экспериментального искусства с техникой середины XVII в.

В 1663 г. Герике закончил свой большой труд, содержавший описание главных опытов. Труд этот — «Experimenta Nova Magdeburgica» вышел из печати лишь в 1672 г. Однако уже в пятидесятые годы была описана большая часть экспериментов Герике, и они были достаточно широко известны. Эти эксперименты демонстрировали давление и упругость воздуха и охватывали другие разделы физики, в частности электричество.

В сороковые-семидесятые годы экспериментальными исследованиями занимаются научные коллективы — первые исследовательские общества и академии. В 1657—1667 гг. существовала Флорентийская академия опытов («Academia del Cimento»). При дворе тосканского герцога собирались некоторые ученики Галилея и другие ученые, среди которых были выдающиеся мыслители, в частности Джиовани Борелли (1608—1658), один из предшественников Ньютона в изучении небесной механи-

ки, исследователь капиллярности и других проблем физики. Члены Флорентийской академии сообща опубликовали свои труды. Сборник таких трудов «Saggi di naturali esperienze fatte nei Academia del Cimento», вышедший во Флоренции в 1667 г., остается важным документом экспериментального естествознания XVII в.

Одновременно с Флорентинской академией было создано Королевское общество в Лондоне. Кружок регулярно собиравшихся естествоиспытателей получил в 1660 г. официальный статут, а в 1662 г.— свое современное название. Он избрал лозунгом «Nullius in verba» — «ничего словами», чтобы подчеркнуть свою враждебность ссылкам на «слова» — высказывания авторитетов и вместе с тем, чтобы отметить экспериментально-эмпирическое направление, враждебное схоластике, но таившее опасность эмпирической ограниченности, ставшей традицией науки в Англии, где до сих пор под «философским инструментом» подразумевают, например, термометр.

В 1666 г. Кольбер основал Академию наук в Париже, продолжившую известные работы по градусным измерениям в Европе и в отдаленных странах и посылавшую экспедиции за океан с четкими экспериментально-измерительными физическими задачами. В Германии в 1652 г возникло частное научное общество, в 1677 г. ставшее императорской Академией наук.

Синтезом натурфилософии тридцатых-пятидесятых годов и экспериментальных достижений того же периода было творчество Роберта Бойля (1627—1691). Он был непосредственным продолжателем Гассенди в восстановлении эпикурейской атомистики. Бойль стремился объяснить всю сумму явлений расположением, движением и формой мельчайших, далее неделимых частиц, атомов. Сцепляясь, атомы образуют твердые тела. Распадаясь, они образуют жидкости. Изменения физического состояния и химических качеств представляют собой движения атомов. Вместе с тем Бойль— продолжатель экспериментальных работ Отто фон Герике, с результатами которых он познакомился в пятидесятые годы. Усовершенствование воздушного насоса, экспериментальное доказательство соотношений между объемом и давлением газа, опыты в области гидростатики, электричества и оптики были крупнейшим вкладом английского мыслителя в физику второй половины XVII в[6].

Наиболее крупным мыслителем рассматриваемого периода, в творчестве которого начался переход к следующему пе-

[6] Его результаты изложены в книгах: R. B o j l e. «Sceptical Chemist» (1661), «Origin of forms and qualities according to the corpuscular philosophy» (1664), «New experimentum physico-mechanical, touching the spring of the air» (1660), «Hydrostatical paradoxis» (1661), «Experiments and considerations touching colours» (1663) и др.

риоду, был великий математик и физик Христиан Гюйгенс (1629—1695). Уроженец Голландии и воспитанник Лейденского университета, он в пятидесятые годы начал ряд замечательных работ по геометрии и по теории вероятности, затем усовершенствовал зрительную трубу, с помощью которой открыл спутник и кольцо Сатурна в 1657 г. Гюйгенс сконструировал часы с маятником — точка пересечения чрезвычайно важной для науки конструктивно-технической тенденции периода мануфактур и крупных механико-математических проблем. В 1666 г. он переехал в Париж. Отмена Нантского эдикта заставила Гюйгенса вернуться в Гаагу. Здесь, наряду с астрономическими исследованиями, Гюйгенс создал свой бессмертный «Трактат о свете», изданный в Лейдене в 1690 г. Изложенную в нем волновую теорию света Гюйгенс сообщил Парижской академии наук уже в 1678 г.

Таковы наиболее крупные вехи исторического пути физики в тридцатые-семидесятые годы XVII в. Посмотрим теперь, к каким конкретным результатам в отдельных областях механики, акустики, теории тепла, света, магнетизма, электричества и тяготения приходила научная мысль в течение этого периода.

В рассматриваемый период постепенно выкристаллизовывались исходные понятия классической механики. Важно подчеркнуть, что предпосылкой их были некоторые собственно физические представления о веществе. Декарт отождествлял материю с пространством. По воззрению Декарта, непроницаемость отнюдь не отличает материю от пространства. Напротив, непроницаемость совпадает с неистребимостью, неуничтожаемостью самого пространства. В письме к Мору, написанном в 1649 г., Декарт пишет: «Не лучше ли определить материю тем, что это есть субстанция непроницаемая или осязаемая ... Но это свойство тела быть осязаемым, эта непроницаемость есть — подобно, например, способности смеяться в человеке,— то, что в правилах логики принято называть proprium quarto modo. Это не есть истинное, существенное свойство материи, каковое я полагаю в протяжении. И подобно человеку, которого определяют не как смеющееся животное, а как разумное, и тело должно определять не его непроницаемостью, а его протяженностью, тем более что свойство осязаемости и непроницаемости имеют отношение к частым и предполагает в нашем уме идею тела отдельного и ограниченного, а мы между тем очень хорошо можем представить себе непрерывное тело, неопределенной и неограниченной величины, в котором усматривается только протяжение» [7].

[7] Descartes. Oeuvres. Ed. Cousin, 1824—1826, t. X, p. 195.

Таким образом, непроницаемость относится к вторичным, несубстанциальным свойствам тела. Далее, в том же письме Декарт указывает на неуничтожаемость пространства и невозможность совмещения двух частей пространства. Отсюда вытекает реальное и *материальное* бытие пространства. Оппоненты Декарта считали непроницаемость признаком материи, отличающим ее от пустоты, от пространства, не заполненного материей. Для Декарта чистая протяженность обладает теми же свойствами. Поэтому он говорит о материальности всякой протяженности. «В пространстве,— продолжает Декарт,— сколь бы пустым мы его ни воображали, мы легко представляем себе различные части определенной величины и фигуры и можем в воображении переносить их одни на место других, но никоим образом не можем представить себе, чтобы две такие части проникали друг в друга в том же месте, ибо здравому смыслу противно, чтоб это было и чтобы какая-нибудь часть пространства была отнята. Обратив внимание, что столь реальные свойства могут быть только в реальном теле, я осмелился утверждать, что абсолютно пустого пространства нет и что все протяженное есть непременно тело» [8].

Мор ссылался на мнение Эпикура, Демокрита и Лукреция. Декарт отвечает ему, что перечисленные философы считали заполненными только те части пространства, которые непосредственно воздействовали на органы чувств. Пространства, которые почему-либо не воздействовали на наши органы чувств, они считали пустыми. «Действительно,— продолжает он,— хотя чувства наши не всегда представляют нам внешние тела такими, каковы они на самом деле, но лишь по отношению к нам,— а насколько могут быть нам полезны или вредны,— мы, однако, с детства стараемся думать, что в мире нет ничего, кроме того, что представляют нам чувства; что, таким образом, нет тела, которое не действовало бы на чувства, и что всякое место, где мы ничего не чувствуем, есть пустое место» [9].

Мысль Декарта о неуничтожаемости пространства, совпадающей с непроницаемостью материи, в очень ясной форме была высказана Пьером Режи, который писал, что нельзя прибавить кубический дюйм пространства к другому кубическому дюйму, чтобы не получилось вместе два дюйма [10]. Действительно, эта количественная характеристика пространства не только служит основой непроницаемости материи в картезианской физике, но и совпадает с непроницаемостью.

---

[8] Descartes. Oeuvres. Ed. Cousin, 1824—1826, t. X, p. 195.
[9] Там же.
[10] См. Cours de philosophie selon les principes de M. Descartes, v. I. Amsterdam. 1691, p. 291.

Декарт борется против представления о пространстве, как о некотором пустом сосуде, который заполняется предметами. Вернее сказать, он приравнивает пространство именно к такому сосуду, но показывает, что сосуд именуется пустым лишь в условном смысле. В обычном словоупотреблении под пустотой разумеют отнюдь не абсолютную пустоту. Сосуд для воды считается пустым, если вода в него не налита, рыбный садок пуст, когда заполнен водой, но рыбы в нем нет, корабль мы называем пустым, если он заполнен лишь балластом. Подобным образом мы называем пустым пространство, в котором нет ощущаемых предметов. Однако материальная субстанция может заполнять пространство, не оказывая воздействия на наши органы чувств. Поэтому нельзя думать, будто в пространстве, в котором ничто не воздействует на наши органы чувств, действительно ничего нет. При таком утверждении мы «впадаем в ту самую ошибку, как если бы, благодаря привычке говорить, что сосуд, наполненный только воздухом, пуст, заключили, будто имеющийся в сосуде воздух не есть пребывающая вещь» [11].

Декарт приводит в качестве примера некоторый сосуд. Если этот сосуд пусть абсолютно, т. е. между его стенками не содержится никакого материального тела, то это значит, что между стенками вообще ничего нет, что эти стенки соприкасаются друг с другом. Декарт излагал эту мысль в теологической форме:

«Поэтому, если спросят: что случится, когда бог устранит тело, содержащееся в данном сосуде, и не допустит никакое другое тело проникнуть на покинутое место, то на такой вопрос должно ответить: в таком случае стороны сосуда сомкнутся. Ведь когда между двумя телами ничего не пролегает, то они необходимо касаются друг друга, и явно нелепо, чтобы тела были отделены друг от друга, т. е. между ними как бы имелось расстояние и, в то же время, это расстояние было бы «ничто»; поэтому всякое расстояние есть модус протяжения и не может существовать без протяженной субстанции» [12].

Из геометризации материи вытекали основные идеи картезианской механики. Эта механика сыграла существенную роль в генезисе классических законов движения. В рассматриваемый период еще не могло произойти окончательное слияние земной и небесной механики. Оно осуществлено только в ньютоновых «Математических началах натуральной философии» в последней четверти XVII в. Необходимым условием было математически разработанное и опирающееся на точные измерения

---

[11] Р. Декарт. «Начала», ч. II, § XVII, стр. 47.
[12] Там же, § XVIII, стр. 47

учение о соединении инерционного движения небесных тел с центростремительным ускорением силы тяжести. Такое учение и было высказано в «Началах». Ньютоновская теория тяготения и основанная на этой теории система мира были итогом развития учения о падении тел. После галилеевской динамики такое развитие опиралось на многочисленные гравиметрические измерения, проделанные большим числом исследователей в течение XVII в.

Развитие механики от Галилея до Гюйгенса мы будем рассматривать с той стороны, которая имела наибольшее значение для собственно физических теорий. С такой точки зрения значительный интерес представляет изучение маятника. Движение маятника изучали все крупные физики следующего после Галилея поколения. Из них упомянем о работах известного уже нам члена Флорентийской академии Джиованни Борелли. В работе «De vi repercussionis et motionibus naturalibus a gravitate pendentibus», вышедшей в 1670 г., Борелли, развивая учение Галилея о маятнике, доказал, что ускорение и замедление маятника вызываются одной и той же причиной — его тяжестью, и поэтому маятник должен подняться на ту же высоту, с которой он опустился. Но эта работа меркнет перед открытием, имеющим первостепенное значение и для истории физических теорий и для истории техники — в том числе техники физического эксперимента.

Речь идет о изобретении часов с маятником.

В литературе по истории физики названо немало предшественников Гюйгенса в изобретении таких часов. Уже Галилей в 1636 г. изложил проект соединения маятника со счетчиком, который поддерживал бы движение маятника.

Гюйгенс в 1657 г. присоединил маятник к уже известной конструкции часов с гирями. Пятнадцать лет после этого он разрабатывал теорию маятника, изложение которой «Horologium oscillatorium» вышло в 1673 г. в Париже. Значение этой книги выходит далеко за рамки проблемы маятника. Она возвестила начало периода в развитии физики в целом. Гюйгенс показал, что качание любого тела может быть сведено к простой математической задаче, в которой речь идет о простом маятнике. Что же касается самого простого маятника, то Гюйгенс создал классическую теорию его движения. При этом он построил изохронный маятник, заставив нить маятника прилегать к циклоидальным поверхностям с обеих сторон. Так как развертка циклоиды — также циклоида, маятник при указанных условиях описывает циклоиду. Гюйгенс доказал, что циклоида представляет собой кривую, при движении по которой тяжелое тело при своем падении проходить путь от высшей до низшей точки всегда в одно и то же время, незави-

симо от высоты падения. Круговой маятник в бесконечно малой области возле низшей точки движется так же, как циклоидальный. Поэтому маятник с длинной нитью и небольшим размахом можно приблизительно считать изохронным. Гюйгенс создал стройную теорию маятника, оказавшую значительное влияние на физику в целом и на теорию тяготения в особенности. Часы с маятником стали основой точной экспериментальной техники. Физика не могла бы развиваться в основном для рассматриваемого периода направлении, она не могла бы стать точной наукой, основанной на количественных измерениях, если бы Гюйгенс, обобщая методы и достижения науки и практики первых трех четвертей XVII в., не создал универсальный прибор, дающий возможность точного измерения времени. Точное измерение времени было историческим условием перехода науки от изучения геометрических форм и траекторий движущихся тел к собственно физическим задачам.

В «Horologium oscillatorium» Гюйгенс изложил и свою знаменитую теорию центробежных сил. Более подробно она изложена в статье «De motu et vi centrifuga», опубликованный уже после смерти Гюйгенса. Гюйгенс исследует, на какую высоту поднялось бы движущееся с заданной скоростью тело, если бы оно двигалось вверх по касательной к кругу. Это расстояние, как он доказывает, пропорционально скорости и обратно пропорционально радиусу круга. Закон, определяющий центробежную силу для кругового движения, может быть перенесен на любое криволинейное движение, если заменить скорость кругового движения мгновенной скоростью, а радиус круга — радиусом кривизны в данной точке.

О центробежной силе говорил и Борелли в 1666 г. в работе «Theoria Mediceorum planetarum ex causis physics deducta», где круговое движение планет объясняется тем, что стремление к Солнцу уравновешивается инерцией планеты. Но это очень далеко от стройной и точной теории Гюйгенса.

Теория маятника и теория центробежных сил подготовила механику Ньютона, основанную на понятии силы и законе тяготения. Вместе с тем в XVII в. подготовлялись кинетические теории, сводившие закономерности физического мира к упругим ударам.

В физике Декарта теория удара занимала центральное место. Это вытекало из основных посылок картезианства. Сведение всех свойств тела к протяженности заставляло Декарта отличать тело от окружающего пространства только одним способом — тело движется относительно окружающей его материи и в этом состоит его индивидуальность. Поэтому, с точки зрения Декарта, движение относительно, под «движением в истинном смысле» Декарт понимал движение относи-

тельно соседних тел. Движение может происходить только по кругу, так как при отсутствии пустоты тело может двигаться, лишь участвуя в круговом движении, так, чтобы место впереди освобождалось движущимся предыдущим звеном круговой цепи, а оставленное сзади место занималось последующим звеном этой цепи; таким образом Декарт пришел к понятию *вихря*, игравшему такую большую роль в его физике и космогонии. Представленное самому себе тело движется прямолинейно.

Причиной ускорения и искривления пути служат удары соседних тел. Никакой другой причины движения Декарт не допускает. Законы удара у Декарта относились к «совершенно твердым телам». Эти законы указывают, с какой скоростью и в каком направлении будут двигаться после столкновения тела с различными первоначальными скоростями. Исходная идея этого закона состоит в утверждении, что при столкновении тело сообщает другому такое же количество движения, какое оно само теряет. Если же тело не может привести в движение другое, то оно сохраняет все свое количество движения по абсолютной величине и меняет лишь направление. Законы удара тел, выдвинутые Декартом, не соответствуют действительности.

Основной ошибкой теории удара, выдвинутой Декартом, было отсутствие строгого разграничения упругих тел от неупругих и затем арифметическое суммирование количеств движения. В дальнейшем эти ошибочные посылки Декарта были преодолены. Важным переломным моментом в развитии учения об ударе был конкурс, объявленный в 1668 г. Британским Королевским обществом. Присланные на конкурс работы Валлиса (1616—1703), Рена (1632—1772) и Гюйгенса содержали большое число новых идей. Валлис дал четкое определение неупругого удара и высказал основной принцип теории неупругого удара. Он, как и Рен, исходил из алгебраического сложения количеств движения. Однако наиболее крупными по своему значению были результаты Гюйгенса, доказавшего, что при упругом ударе сохраняется сумма произведений масс на квадраты скоростей.

Гюйгенс обосновывал свою теорию упругого удара на основе классического принципа относительности. Он рассматривает явление упругого удара в движущейся системе, «когда пассажир некоторого корабля приводит в соударение два равных шара с равными по отношению к кораблю и частям корабля скоростями». В этом случае, говорит Гюйгенс, шары должны отскочить друг от друга с равными же по отношению к кораблю скоростями так, как если бы явление происходило в неподвижной системе.

Гюйгенс выводит формулы сохранения живых сил для упругого удара:

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2,$$

где m_1 и m_2 — массы, а v_1, v_2, u_1, u_2 — скорости тел.

Картезианская теория удара основана на идее сохранения количества движения. Мерой движения картезианцы считали произведение массы на скорость. Позже, в связи с идеями Лейбница, мы упомянем об известном споре, касавшемся различных мер неуничтожаемого движения.

Существенным итогом физики первых трех четвертей XVII в. было создание сравнительно точных представлений о давлении воздуха, упругости газов и количественных соотношений между объемом, давлением и температурой газов.

Ученик Галилея Еванджелиста Торричелли (1608—1647) в «Trattato del moto dei gravi», вышедшем во Флоренции в 1641 г., развивая идеи галилеевой динамики, в связи с гидротехническими нуждами искал законы истечения жидкостей, в частности законы истечения жидкостей из сосудов. Торричелли доказал, что скорость частицы жидкости в струе, вытекающей из отверстия сосуда, равна скорости, которую приобрела бы частица, падая от своего первоначального уровня до уровня отверстия. Отсюда выходит, что указанная скорость пропорциональна квадрату высоты первоначального уровня частицы над отверстием.

Наиболее важное открытие Торричелли — давление воздуха. Торричелли знал о выводах, сделанных на основе применения водяных насосов. Невозможность поднять воду выше определенного уровня объясняли тем, что «боязнь пустоты» ограничена определенной высотой водяного столба. Торричелли перешел от опытов с водой к опытам с ртутью, определяя давление воздуха на ртутный столб, и получил сравнительно полный вакуум над ртутью в запаянной трубке — торричеллиеву пустоту, открытие которой сильно дискредитировало средневековые понятия и толкнуло физику к важным экспериментам.

Один из крупнейших мыслителей XVII в., автор знаменитых памфлетов против иезуитов и Сорбонны, выдающийся математик и один и создателей гидростатики, Блэз Паскаль (1623—1662) в сороковые годы узнал о результатах Торричелли. Ему сообщил об этом Мерсенн, игравший большую роль в науке того времени благодаря оживленной научной переписке, которую он вел со множеством исследователей. Паскаль повторил исследования Торричелли, пользуясь при этом не ртутью, а водой и красным вином. Потом, когда Паскаль узнал о подробностях экспериментов Торричелли, он усовершенство-

вал ртутный барометр и обнаружил колебания ртутного столба при изменении высоты. 19 сентября 1648 г. один из друзей Паскаля, поднявшись по его просьбе на гору, зарегистрировал изменения высоты ртутного столба. Затем сам Паскаль произвел аналогичные наблюдения, поднимаясь на высокие здания Парижа. Описание таких наблюдений было дано в книге «Traité de l'equilibre des liquers et de la pesanteur de la masse de l'air», написанной Паскалем в 1653 г. и напечатанной в 1663 г.

Одновременно велись исследования, посвященные упругости воздуха. С только что описанными исследованиями их объединяли некоторые общие экспериментальные приемы и переплетение наблюдений, относящихся к упругости и тяжести воздуха в одних и тех же экспериментах.

Герике перемежал описания воздушного насоса с антисхоластическими декларациями. Чтобы опровергнуть «боязнь пустоты», Герике выкачивал воду из бочки водяным насосом. Но через щели бочки в нее проникал воздух. Тут и сказался новый уровень производственной техники. Герике удалось с помощью магдебургских ремесленников построить воздушный насос, выкачивающий воздух из большого медного шара. Здесь, разумеется, играла решающую роль не самая возможность заказать сравнительно сложный прибор,— его можно было сделать и раньше,— а те конструктивные идеи и требования к точности деталей, которые распространялись в XVII в. в научных и ремесленных кругах.

Герике демонстрировал масштабы воздушного давления с помощью известных магдебургских полушарий, описание которых вошло почти во все книжки по физике, начиная с шестидесятых годов XVII в. В мае 1654 г. Герике показал знати, духовенству и горожанам медные полушария, которые плотно соединялись с помощью прокладки из кожи, пропитанной раствором воска в скипидаре, после чего из образовавшегося шара выкачивали воздух и 24 лошади не могли оторвать одно полушарие от другого. Герике обнаружил различное давление воздуха на различных уровнях. Он сконструировал манометр, водяной барометр, предсказывавший погоду, произвел важные опыты по взвешиванию воздуха, обнаружил необходимость воздуха для горения. Последнее имело большое значение для химии; напомним, что многие ученые XVII в., в том числе Декарт, говорили о лампах, которые могут будто бы гореть столетия в закрытых помещениях. Герике построил термометр — трубку с вакуумом над столбом спирта и шкалой, на которой начальной точке соответствовала средняя температура первых осенних заморозков.

Как уже было сказано, Бойль усовершенствовал насос Герике. Он, в частности, сконструировал зубчатую задвижку,

которая не допускала обратного хода рукоятки насоса. При помощи воздушного насоса Бойль обнаружил ряд важных явлений: при выкачивании воздуха над ртутной ванной барометра ртуть в трубке барометра падает; в вакууме прекращается действие сифона; дым в сосуде, откуда выкачан воздух, опускается вниз; теплая вода в вакууме закипает; тело не удается зажечь, если воздух из сосуда, в котором помещено тело, выкачан. Во времена Бойля некоторые ученые пытались объяснить вновь открытые явления существованием невидимых нитей, поддерживающих ртуть в трубке барометра. Полемизируя с ними, Бойль производил новые опыты, в которых он сравнивал объемы воздуха с его давлением. Составленная Бойлем таблица позволила вскоре установить обратную пропорциональность между объемами и давлением воздуха.

Эти исследования были продолжены Мариоттом (1620—1684), известным механиком и оптиком второй половины XVII в. Работы Мариотта по механике жидкостей и газов опубликованы в 1676 г. («Essai sur la nature de l'air») и в 1686 г. (Traité du mouvement des eaux et des autres fluides). Здесь содержаться многочисленные экспериментальные подтверждения установленного Торричелли закона истечения жидкости из сосуда. В одной из названных книг Мариотт, через четырнадцать лет после Бойля, на основе гораздо более обширного экспериментального материала, доказал и развил представление о пропорциональности между объемом и давлением воздуха. Заслугой Мариотта является также применение механики газов к некоторым теоретическим построениям, касающимся метеорологии.

В третьей четверти века важные исследования в области давления и упругости воздуха были произведены Дени Папеном (1647—1712). Папен в семидесятые годы в Париже был помощником Гюйгенса; впоследствии, в результате религиозных преследований, он переехал в Англию и одно время работал с Бойлем в качестве его помощника. В книге «Nouvelles experiences du vide avec la description des machines servant à les faire» (1674) Папен описывает приборы, которые большей частью построены по указаниям Гюйгенса. Среди них находится воздушный насос с тарелкой и колпаком. Папен обнаружил зависимость точки кипения от давления воздуха. Во второй половине семидесятых годов Штурм ввел важное усовершенствование в воздушный насос, применив конические клапаны в дне цилиндра и в поршне.

Исследования в области давления и упругости газов были важной составной частью той подготовки научных атомистических концепций, которые ознаменовали следующий период в истории физики. В XVII в. еще не было и не могло быть

широкой, охватывающей всю природу атомистической картины мира. Только в результате научного развития, подготовленного экспериментальной техникой XVII в., атомистические идеи в следующий период стали действительно «работать», ими начали руководиться не только в натурфилософских догадках, но и в экспериментальной деятельности.

В «Трактате о мире» Декарт различает три элемента: огня, неба и земли. Элемент огня состоит из частиц, лишенных постоянной формы; они дробятся различным образом и заполняют промежутки между частицами других элементов. Элемент неба состоит из шарообразных частиц, поэтому при любом сжатии этого элемента между частицами сохраняются промежутки, заполненные элементом огня. Благодаря этому элемент неба всегда смешан с элементом огня. Третий элемент — элемент земли, состоит из крупных медленно движущихся частиц. Декарт указывает, что реальный огонь, реальное небо и реальная земля никогда не состоят целиком из частиц соответствующего элемента. Однако огонь в основном содержит первый элемент, мировое пространство — второй и земля — третий земной элемент. Впоследствии Декарт несколько колебался в вопросе об элементах, но в «Началах философии», окончательно формулируя исходные идеи своей физики, Декарт повторил учение о трех элементах. При этом он рисует картину последовательной дифференциации материи. Первоначально частицы материи, обладающие различной формой, благодаря обтачиванию становятся шарообразными, а промежутки между ними заполняются осколками, которые в свою очередь дробятся. Чем меньше частицы, тем больше их поверхность по сравнению с объемом и, следовательно, тем большее воздействие они испытывают со стороны окружающих частиц. Поэтому дробление материи непрерывно увеличивается, и в конце концов наряду с шарообразными частицами элемента неба образуется тончайшее вещество, состоящее из крайне мелких быстродвижущихся осколков — элемент огня, заполняющий промежутки между шарообразными частицами элемента земли. Впоследствии образуется и третий элемент. Ему-то Декарт и приписывает инертную массу и вес, который, по мнению Декарта, не пропорционален массе.

Для картезианской физики существует лишь два агрегатных состояния: твердые тела состоят из неподвижных частиц, а жидкие, принципиально не отличающиеся от газообразных, состоят из непрерывно движущихся частиц. Различная скорость частиц дает постепенный переход от твердого состояния, т. е. от неподвижности частиц, к жидкому состоянию, т. е. к быстрому движению частиц. Декарт определяет пламя, как жидкость с чрезвычайно быстрым движением частиц. Оно воздей-

ствует на другие тела, приводит в быстрое движение их частицы и таким образом превращает их в жидкость. По мнению Декарта, плавление и сгорание представляют по существу одно и то же быстрое движение частиц, превращающее твердое вещество в жидкость. Температура соответствует скорости движения частиц. Декарт рисует множество гипотетических, по большей части не соответствующих действтельности моделей, объясняющих различные детали изменения агрегатных состояний и горения. Однако мысль о кинетической природе теплоты оказала существенное воздействие на развитие физических концепций XVII—XVIII вв. По мнению Декарта, частицы всех тел находятся в непрерывном движении, и если бы это движение прекратилось, нельзя было бы говорить об индивидуальном существовании частиц.

С помощью гипотетических вихрей Декарт рисует историю Вселенной. Каким бы ни было первоначальное состояние мира, рано или поздно в материи возникают вихревые движения.

Декарт считает, что ближе к центрам вращения собираются однородные частицы и вихревое движение приводит к деформации элементов. В центре вихря собирается элемент огня. Так образуется огненное Солнце и в других центрах — другие неподвижные звезды. Вокруг огненного центра движется материя неба, увлекающая с собой частицы третьего элемента. Последние в конце концов собираются и образуют планеты. Декарт описывает, как молекулярные толчки приводят в движение образующиеся планеты и заставляют их вращатся вокруг оси. Далее развертывается история Земли. Первоначально земля состоит из элемента огня; впоследствии на поверхности жидкой массы образуются темные участки, состоящие из третьего элемента. Они увеличиваются, и Земля покрывается твердой корой. Раскаленное ядро поныне сохраняется в центре Земли, оно окружено слоями, состоящими из различных веществ.

В области теории теплоты физика в течение XVII в. накапливала экспериментальный материал, необходимый для того, чтобы кинетические воззрения на теплоту стали более строгими и однозначными. Здесь особенно важно развитие термометра. В XVII в. он только появился. Флорентийская академия пользовалась спиртовым термометром, в котором над столбом жидкости воздух был удален и конец трубки залит сургучем. Шкала флорентийских термометров была неопределенной; в качестве начальной и конечной точек были приняты низшая и высшая температуры, обычно наблюдающиеся во Флоренции. О термометре Герике уже говорилось выше.

Перейдем к проблеме эфира. Генезис этого понятия — основной, исторически прогрессивный результат картезианской физики, если говорить о ее крупных позитивных обобщениях.

ментах. Оно казалось необходимым для объяснения тяжести и света. В теории тяготения Декарт был одним из многочисленных предшественников Ньютона, говоривших о зависимсти между тяжестью и расстоянием. В письме к Мерсенну, датированном июлем 1638 г., Декарт описывает опыт, который мог бы доказать зависимость тяжести от расстояния между тяжелым телом и центром Земли.

Нужно поставить весы на высокой башне, у подножья которой находится глубокий колодец, и взвешивать груз, подвешенный к чашкам весов на длинной нити, опущенной с вершины башни в колодец. Затем тот же груз и нить следует взвесить, положив их на чашку весов. «Но вследствие того, что расстояние от глубины колодца до вершины башни очень мало сравнительно с диаметром Земли, а также по другим соображениям, которые опускаю, опыт этот мог бы служить для указанной цели лишь в том случае, если бы разность в весе тела на разных высотах была очень значительна».

Предполагая, что эксперименты не дадут окончательного ответа на вопрос, Декарт выдвигает иные, чисто абстрактные аргументы. В дальнейшем Декарт говорит о зависимости тяжести от расстояния до центра Земли. Небесные тела, по составу близкие к Земле, притягиваются Землей, но значительное расстояние между этими телами и Землей «уничтожает» их тяжесть. Декарт ссылается на различные, по большей части фантастические, представления о потере тяжести на значительной высоте. Он пишет о птицах, летающих с бóльшей легкостью в верхних слоях атмосферы, упоминает о бумажном змее, который теряет частично свой вес, поднявшись в воздух, и сообщает об опытах, при которых снаряд, выпущенный по направлению к зениту, не падает обратно на Землю. Об этом опыте Декарт узнал от Мерсенна и в приводимом письме объясняет своему корреспонденту, что опыт нужно производить с большим ядром, которое может быть легко найдено впоследствии. Декарт приложил к письму чертеж установки, гарантирующей неизменное вертикальное положение ствола при выстреле. Здесь характерно наличие технических интересов Декарта, но гораздо характернее другое—отсутствие количественной определенности и количественных измерений в намеченных опытах. Еще важнее то обстоятельство, что у Декарта нет мысли о количественной характеристике зависимости тяжести от расстояния. В этом отношении его отделяет от Ньютона громадный интервал — теория Ньютона кажется принадлежащей другой эпохе. Так же далеки от экспериментов Ньютона мысленные эксперименты Декарта и его неопределенные ссылки на опыт. Зато, конструируя гипотезы, Декарт в своей стихии. Дальнодействие несовместимо с его философией.

Во времена Декарта многие физики развивали идею тяготения на расстоянии, разумеется, в примитивной форме, несравнимой с ньютоновской универсальной системой. Декарт резко протестовал против подобных идей. Когда Мерсенн познакомил Декарта со взглядами Роберваля, говорившего о всемирном тяготении, Декарт отвечал:

«Нет ничего более абсурдного, чем одно допущение, присоединенное к предыдущему;автор принимает, что известное свойство присуще каждой отдельной части материи в мире и что в силу этого свойства эти части движутся друг к другу и взаимно притягиваются; он принимает также, что сходное свойство присуще каждой из частиц на земле, рассматриваемой в ее отношении ко всем другим частицам, и что это свойство не наносит ни малейшего ущерба предыдущему. Чтобы это понять, приходится допустить не только то, что каждая из материальных частичек одухотворена и что в ней живет даже огромное число не мешающих друг другу различных душ, но также, что эти души материальных частиц одарены сознанием, что они поистине божественны, ибо они без всякого вестника могут знать, что происходит в самых отдаленных местах и там оказывать свои действия» [13].

В «Трактате о Мире» Декарт объясняет тяготение давлением второго элемента, т. е. частиц небесного флюида. Частицы малого неба, окружающие Землю, благодаря центробежной силе стремятся удалиться от нее. Однако ни одна из частиц не может подняться без того, чтобы другая не совершила противоположного движения. Чтобы камень поднялся вверх, нужно, чтобы равный объем воздуха, находящийся над ним, уступил место камню и в конце концов чтобы соответствующий объем воздуха опустился по направлению к Земле. Чтобы камень опустился по направлению к Земле, соответствующий объем воздуха должен подняться. И наоборот, чтобы поднялся воздух — камень должен опуститься. Частицы камня крупнее и поэтому менее восприимчивы к ударам частиц небесного флюида, чем частицы воздуха. Поэтому воздух в большей степени, чем камень, стремится от Земли к периферии ее неба и, таким образом, камень должен, уступая ему место, стремиться к Земле.

В IV части «Принципов философии» Декарт подробно излагает аналогичные идеи. «Если бы пространство вокруг Земли было пусто, т. е. наполнено таким только телом, которое не может ни помогать, ни препятствовать движению других тел,— что собственно и надлежит разуметь под именем пустоты,— Земля же тем не менее вращалась бы, как и ныне, за двадцать четыре часа вокруг своей оси, то все ее части, не очень

[13] Descartes. Oeuvres. Ed. Cousin, 1824—1826, v. IX, p. 55.

тесно с ней соединенные, отделились бы от нее и разлетелись бы во все стороны по небу, как разлетается в воздухе песок, бросаемый на кружащуюся вертушку. Если бы так было, все земные тела могли бы быть названы скорее легкими, чем тяжелыми»[14].

Но действительное положение совершенно иное. Земля окружена небесным флюидом — вторым элементом. Источник тяжести — некоторое смещение небесного флюида по отношению к Земле. Запас движения в частицах небесного флюида больше той величины, которая необходима для вращения вместе с Землей. Поэтому небесный флюид вращается в ту же сторону, что и Земля, несколько быстрее самой Земли. Кроме того, частицы небесной жидкости в вихре Земли имеют различные, в общем беспорядочные движения. «Движения эти, не могущие происходить по такому прямому пути, какой имели бы, если бы не встречалось Земли, стремятся сделать ее круглою, подобно тому, как было сказано о капле воды. Они же производят то, что небесная материя имеет более стремления удаляться от центра вращения, чем какая-либо часть Земли, почему материя эта и может считаться легкою по отношению к Земле»[15].

Представления Декарта о тяготении включают произвольные гипотезы и неопределенные характеристики зависимости тяготения от расстояния. Декарт допускает даже полное исчезновение тяжести на большом расстоянии. Однако картезианская теория тяготения обладала громадным философским преимуществом, так как она отказалась от дальнодействия и оставалась, таким образом, целиком на почве механистической причинности. Поэтому не методологические принципы динамизма, а новые факты и соответствие между законами ньютоновской механики и наблюдениями заставили естествоиспытателей отказаться от теории вихрей. Даламбер писал об этой теории: «Смею сказать, и со мною согласятся, что тогда нельзя было ничего придумать лучше этих вихрей, ныне сделавшихся смешными. Астрономические наблюдения, послужившие к их разрушению, были еще несовершенны и отнюдь не достаточны. Потому не было ничего естественнее, как предположить жидкий поток, несущий планеты. Только длинный ряд явлений, соображений и вычислений мог заставить отказаться от столь увлекательной теории; ее особое преимущество было в том, что она давала объяснение тяжести тел действием центробежной силы самого вихря; смело скажу, что это объяснение тяжести есть одна из прекраснейших и остроумнейших гипотез, когда-либо придуманных в философии. Вот почему физики оставили

[14] Декарт. Начала, ч. IV, § XX.
[15] Декарт. Начала, § XXII, стр. 278.

ее только как бы против воли, будучи увлечены теорией центральных сил и позднейшими опытами» [16].

В XVII в. большинство физиков объясняло тяготение кинетическими моделями в духе Декарта. Мы остановимся на взглядах Гюйгенса. Как уже неоднократно указывалось, Гюйгенс глубоко усвоил основные методологические принципы Декарта, отказавшись от большинства произвольных гипотез картезианской физики. Для Гюйгенса постичь явления это значит разглядеть сквозь качественное разнообразие явлений единую материю и движение частей. «Ни один из предшественников Декарта,— писал Гюйгенс,— не познал лучше него то, что ничего полезного нельзя понять в физике, кроме того, что можно свести к принципам, которые не выходят за пределы нашего разума. Таковы принципы, которые зависят от тел, рассматриваемых без их качеств, «движений этих тел».

Трудность картезианской программы состоит в том, что нужно из небольшого числа кинетических понятий вывести громадное количество самых разнообразных явлений. Немудрено поэтому, что Декарт в ряде случаев не смог дать действительное механическое объяснение, лишенное произвольных домыслов.

«Но величайшая трудность,— продолжает Гюйгенс,— заключается в том, чтобы показать, каким образом такое множество различных вещей обязано своим происхождением этим немногим принципам. Неудивительно поэтому, что в некоторых специальных вопросах, которые он предлагал исследовать, его попытки не увенчались успехом».

В частности, Гюйгенс считал неудачной теорию тяготения, выдвинутую Декартом. Однако его собственное решение проблемы идет в методологическом отношении по следам Декарта. «К этим вопросам принадлежит, по-моему, проблема тяжести. Об этом нетрудно будет судить по некоторым моим замечаниям о том, что он писал по этому поводу. К ним я мог бы прибавить ее некоторые. При всем том я должен сознаться, что его попытки и воззрения, хотя и ложные, все же проложили мне путь к тому, что я сам нашел в этом деле».

В своем «Рассуждении о причине тяжести» («Dissertatio de causa gravitatis») Гюйгенс показал, что тяжесть не может быть объяснена центробежной силой вихря, кружащегося вокруг Земли. В этом случае тяжесть была бы направлена не к центру, а к оси Земли, служащей осью вихря. Действительно, действие центробежной силы везде, кроме экватора, направлено не по радиусу Земли, а по радиусу параллели. Далее Гюйгенс, подходя к теории тяготения с более строгим количественным

D'Alambert. Oeuvres, v. I. Paris, 1821, p. 69.

критерием, показывает, что вихревое движение должно быть гораздо быстрее, чтобы объяснить силу тяжести на земной поверхности. Наконец, тяжесть должна быть обратна плотности, так как наиболее плотные тела стремились бы к периферии вихря. Поэтому Гюйгенс предполагает, что небесный флюид, вызывающий своим движением тяжесть земных тел, перемещается относительно Земли в разные стороны. Частицы этого флюида описывают вокруг Земли самые разнообразные круги, и поэтому общим центром их служит центр Земли.

Кинетические теории тяготения появлялись в течение всего XVII и XVIII вв.,а также и позднее. Впоследствии в связи с обзором атомистики будут рассмотрены некоторые из них.

Перейдем теперь к другой функции эфира — распространению света. Теория света Декарта изложена в «Трактате о Мире», — в «Диоптрике», в некоторых главах «Метеоров» в третьей части «Принципов философии», а учение о восприятии света в трактате «О человеке».

В теории отражения и преломления света Декарт пользуется следующей механической аналогией. Переход лучей из оптически более плотной среды в менее плотную, например из воды в воздух, Декарт сравнивает с движением шара, который опускается по наклонной прямой и ударяется о горизонтально расположенное полотно, прорывая его. При этом шар частично теряет свою скорость и отклоняется от первоначального направления. Переход света из менее преломляющей среды в более преломляющую объясняется по аналогии с шаром, который при переходе в новую среду приобретает бóльшую скорость. По мнению Декарта, свет в более плотных средах распространяется быстрее. При переходе в менее плотную среду он частично теряет скорость. Как изменится путь светового луча при таком переходе? Декарт рассматривает наклонное движение шара, разрывающего полотно, как векторную сумму горизонтального и вертикального движений. Вертикальное движение уменьшается встречей с полотном, горизонтальное остается без изменений, так как в горизонтальном направлении ткань не может служить препятствием для движения шара. Поэтому движение шара после того как он прорывает полотно будет обладать другими составляющими: вертикальное, направленное вниз движение уменьшится, а горизонтальное останется без изменения. Диагональ, по которой фактически движется шар, отклонится от первоначального направления и пойдет дальше от вертикального и ближе к горизонтальному. Подобным же образом луч света переходит из более поглощающей среды в менее поглощающую, например из воды в воздух. По мнению Декарта, которого придерживался впоследствии и Ньютон, свет распространяется в воде быстрее, чем в воздухе.

Отсюда вытекает, что луч, переходя из воды в воздух, приближается к вертикальному направлению. На самом деле он отклоняется от вертикального направления. В случае перехода света из менее поглощающей среды в более поглощающую, например из воздуха в воду, Декарт пользуется обратной аналогией. Шар, переходя через горизонтальную поверхность, получает добавочный импульс по направлению своего движения. При таком допущении шар отклоняется от первоначального пути и приближается к отвесному направлению. Соответственно преломляется луч света при переходе из воздуха в воду. Отклонение луча Декарт измеряет сравнением синусов углов и приходит к заключению, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления — величина постоянная.

Рассматривая законы преломления света в «Диоптрике», распространение его от Солнца и звезд в «Принципах», а физиологическую оптику в трактате «О человеке», Декарт в сущности не дал ясного представления о том физическом процессе, который лежит в основе распространения света. В оптических работах Декарта много внешних аналогий. Много места, например, уделено аналогии между наблюдателем, воспринимающим изображение предметов, и слепым, ощупывающим предметы палкой. Пользуясь этой аналогией, Декарт говорит, что свет, испускаемый телами, представляет собой быстрое движение, которое доходит через посредство воздуха или других прозрачных сред до глаза, так же как движение или сопротивление тела доходит до руки слепого через посредство палки. «Это сравнение,— продолжает Декарт,— позволяет нам, во-первых, не удивляться, что свет распространяется к нам мгновенно, так как действие, с помощью которого мы приводим в движение один конец палки, мгновенно доходит до другого конца даже в том случае, если расстояние от одного конца палки до другого будет больше, чем от земли от неба» [17].

С помощью той же аналогии Декарт разъясняет различные цвета: «различие, какое слепой замечает между деревом, камнем, водой и т. д. посредством своей палки, для него не меньше тех, какие мы находим между красным, желтым, зеленым и другими цветами. Различия эти представляют собой не что иное, как различные способы движения упомянутой палки или сопротивления ее движению. Поэтому нет надобности предполагать, что от предметов переходит к глазу нечто материальное, позволяющее нам видеть цвет и свет,или чтобы в предметах было что-либо подобное идеям и ощущениям, какие мы получаем от них. Точно так же из тел, которые ощупывает слепой, ничто не выходит и не проходит по палке до руки; сопротивле-

[17] Descartes. Oeuvres. Ed. Cousin, v. V, p. 6.

ние движения этих тел — единственная причина его ощущения, они не имеют ничего сходного с идеями, которые он составляет о предметах»[18].

Декарт говорит, что слепой может воспринимать свойство окружающих тел не только в том случае, когда эти тела толкают палку, но и ощупывая тела палкой, приводя в движение самую палку. Аналогичным образом можно представить себе, что из глаз выходят лучи, ощупывающие предметы. Однако такое действие, переходящее от глаз к предметам, свойственно лишь животным, видящим в темноте. Человек воспринимает свет и краски лишь в том случае, когда сами предметы светятся или освещены и таким образом воздействуют на глаза. Как мы видим, Декарт не отказался еще полностью от традиционной античной фикции лучей зрения, исходящих из глаз.

Таким образом, луч света представляет собой смещаемую часть среды, находящейся между глазом и предметом. Эта среда состоит из частиц второго элемента. При этом Декарт отнюдь не думал, что смещение постепенно передается от точки к точке вдоль луча. Смещаемая часть второго элемента это действительно палка, абсолютно жесткое тело, передающее свет с бесконечной скоростью, мгновенно. Декарт придавал решающее значение бесконечной скорости распространения света. В одном из писем он писал: «Мне эта теория представляется столь насомненной, что если бы — что невозможно — была доказана ошибочность ее, я готов был бы признать себя человеком, решительно ничего не понимающим в философии. Вы настолько доверяете вашему опыту, что декларируете свою готовность признать всю вашу философию ложной, если нет никакого промежутка времени между моментом, когда видно движение фонаря, и моментом, когда он приведен в движение. Я же заявляю вам, что если бы этот промежуток времени был установлен наблюдением, вся моя философия была бы поколеблена до основания»[19].

Декарт был прав. Представление о постепенной передаче деформации от точки к точке трудно сформулировать и развивать без некоторых динамических понятий. Поэтому не Декарт, а Гюйгенс мог построить теорию световых волн. Только Гюйгенс выдвинул систематическую, опирающуюся на известные в то время факты волновую концепцию. В «Трактате о свете» Гюйгенс прежде всего формулирует общий принцип, из которого, по его мнению, должны исходить все физические теории: причины всех явлений природы необходимо искать в механических процессах, в противном случае приходится отказаться

[18] Там же.

[19] Descartes. Oeuvres, t. I. Publ. Adam et Tannery, Paris, 1897, p. 307

от всякой надежды когда-либо и что-либо понять в физике»[20]. Однако нельзя остановиться на гипотезе световых частиц. Ей противоречит прохождение световых лучей друг через друга и далее конечная скорость распространения света. Решающее значение для Гюйгенса имеет аналогия с распространением звука, которая раскрывает действительную природу света.

Подобно тому как звук представляет собой волновое движение воздуха, свет — это волновое движение эфира. Эфир, по мнению Гюйгенса, состоит из чрезвычайно твердых частиц. Их твердость объясняет большую скорость распространения света. Твердость эфирных частиц для Гюйгенса исходный факт. Он лишь самым беглым образом бросает мысль о внутренней структуре частиц эфира, объясняющей их твердость. Переходя к вопросу о распространении световых волн, Гюйгенс употребляет известный волновой принцип: «Каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна передавать свое движение не только ближайшей частице, лежащей на проведенной от светящейся точки прямой, но необходимо передает его также и всем другим частицам, которые касаются ее и препятствуют ее движению». Таким образом вокруг каждой частицы должна образоваться волна, центром которой она является.

Гюйгенс рисует следующую картину распространения волн. Положение волнового фронта в каждый момент определяется огибающей сферических волн. Там, где эти волны не имеют огибающей, световой поток не распространяется. Пользуясь этим тезисом, Гюйгенс доказывает, что свет всегда должен давать резко очерченную тень. Таким образом, волновая теория позволяет объяснить основной факт, служивший оправданием корпускулярной теории. Вообще для Гюйгенса характерно стремление вывести законы геометрической оптики из волнового принципа. Однако вследствие этого Гюйгенс уходит от объяснения тех явлений, которые исторически оказались основой победы волновой теории и которые корпускулярная теория не могла объяснить. Речь идет о дифракции. Гюйгенсово объяснение четко очерченной геометрической тени исключает возможность объяснения дифракции, интерференции и поляризации света.

Из этого краткого перечисления физических открытий и обобщений, которыми XVII в. обогатил науку, видно, что идея механического объяснения природы в это время была уже не только декларацией, она «работала», она толкала физику к позитивным достижениям. Здесь слово «работала» имеет применительно к XVII в. иной смысл по сравнению со смыслом,

[20] Гюйгенс. Трактат о свете, М.— Л., ОНТИ, 1935, стр. 11—12.

который ему можно придать, говоря о последующих периодах. Убеждение в механической природе физических процессов не могло еще привести к однозначным и достоверным физическим теориям. Физика Декарта включала не только экспериментальные подтвержденные конструкции, но и конструкции, в отношении которых нельзя было указать, в чем состоит решающий эксперимент. Все дело в качественном характере механических законов, с помощью которых пытались объяснить физические явления. Правда, в динамике Галилея были количественные соотношения; но, вообще говоря, эти сотношения были еще очень далеки от законов, которые могли бы принять форму уравнений. В первой половине XVII в., как и в предыдущий период, математика развивалась рядом с механикой; они не приобрели еще объединенных форм, характерных для посленьютоновского периода.

Сравним идею механического объяснения природы в XVII в. с подобной идеей в XVIII—XIX вв., и мы сразу увидим, чего не хватало XVII в. Прежде всего ему не хватало самой механики как системы определенных и строгих количественных соотношений, опирающейся на разработанный математический аппарат. Это было достигнуто работами Эйлера, Д'Аламбера, Лагранжа — всей серией механико-математических исследований, начатой «Математическими началами натуральной философии» Ньютона. Количественная определенность механики — необходимая, но недостаточная предпосылка физики, в которой механистическая тенденция позволяла открыть однозначные связи между механическими схемами и физическими явлениями. Для этого нужно было превращение физического эксперимента в количественный эксперимент. Эта задача была решена в XVIII в. и в первой половине XIX в.

Поэтому, чтобы указать историческую связь между генезисом механического объяснения природы и его наиболее крупными достижениями, нужно посвятить ближайшие очерки, во-первых, превращению механики в систему количественно-определенных законов — уравнений и, во-вторых, развитию физики количественных экспериментов. И та и другая проблема во многом связаны с работами Ньютона.

Б. Г. Кузнецов

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ НЬЮТОНА

Создание классической механики, изложенной в ньютоновых «Математических началах натуральной философии» (1687), было важнейшим событием в истории физики. Нас интересует историческая связь классической механики с подготовившей ее эволюцией физических идей, а также воздействие классической механики на содержание, стиль и темпы развития физики в последующий период. Остановимся прежде всего на исторических истоках идей Ньютона. Этими истоками было развитие производительных сил.

Спорадически применявшиеся в мануфактурной промышленности машины, практика строительства зданий и кораблестроения, артиллерия (в особенности внешняя баллистика) привели к накоплению большого числа наблюдений, относящихся к механическим процессам. В течение всего XVII столетия понятия инерции, ускорения и силы становились все более четкими. В работах Галилея, Борелли, Декарта и особенно Гюйгенса уже были подготовлены необходимые элементы для создания единой стройной и последовательной системы определений и теорем, лишеной фантастических гипотез, произвольных моделей и априорных конструкций.

Но реакция против картезианства осложнилась идеологическими мотивами. После того как Спиноза сделал из картезианства выводы, прямо направленные против религии, церковь, не только католическая, но и протестантская, стремилась в противовес основным идеям Декарта выдвинуть взгляды, которые позволили бы религии сохранить свои позиции. В Англии эти идеологические мотивы звучали особенно сильно. Здесь не было прямого церковного террора, направленного против передовых научных идей. Здесь протестантская церковь

подбирала аргументы против материализма в самой естественнонаучной литературе, использовала ограниченность естественнонаучных знаний, абсолютизировала условные понятия, придавала физическим построениям формальное значение, а формально-условным конструкциям — абсолютный смысл. Не только теологи XVII в. толкали естествознание к метафизическому абсолютизированию классической механики. Одним из идейных источников подобных тенденций была английская философия XVII—XVIII вв. Приглаженный, примиренный с религией, беззубый материализм Локка был образцом для естествоиспытателей, желавших сохранить позиции церкви и при этом развивать и совершенствовать научно-технические предпосылки капиталистического производства.

Гениальная работа Ньютона «Математические начала натуральной философии», вышедшая в свет в 1687 г., прежде всего завершала длительный процесс построения гелиоцентрической небесной механики. Здесь получили строгие определения понятия инерции, ускорения и силы, абсолютного и относительного движения, тяготения и т. д., понятия, которые формулировались в течение XVII в. в достаточно неопределенной форме.

«Математические начала натуральной философии» состоят из трех книг. Первая книга посвящена движению тел под влиянием сил, вторая — движениям в сопротивляющейся среде и, наконец, третья — системе мира. Вначале Ньютон дает определение количества вещества, количества движения, инерции и силы; затем особый раздел посвящен понятию абсолютного и относительного движения, времени и пространства. После этого Ньютон формулирует классические законы движения, на которых основывается вся классическая механика. Далее он рассматривает движение тел, на которые действуют центростремительные силы. В этой связи Ньютон излагает исходные принципы анализа бесконечно малых — метод флюксий. Однако в дальнейшем он не пользуется этим методом для изложения классической механики.

Значительная часть первой книги «Начал» посвящена движению тел под действием центральных сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния между телами. Переходя от притяжения точек к притяжению тел, Ньютон показывает, что и в этой области можно пользоваться установленным ранее законом притяжения точек.

Во второй книге Ньютон описывает движение тел под воздействием тяготения в сопротивляющейся среде. При этом Ньютон излагает основные принципы гидростатики. Задача этого раздела состоит в том, чтобы опровергнуть вихревую теорию Декарта. Ньютон доказывает, что вращение жидкости не может объяснить движение планеты. Затем Ньютон

помещает раздел «Правила и умозаключения в физике», где формулируется так называемый индуктивный метод. После этого рисуется картина Вселенной. Завершением этой картины является закон тяготения, пропорционального массам тел и обратно пропорционального квадрату расстояния между телами. С помощью этого закона Ньютон выводит найденные раньше Кеплером закономерности движения планет. Заключительные разделы содержат доказательства сжатия Земли вдоль оси вращения и теорию приливов. Последние страницы «Начал» содержат теологические и натурфилософские выводы.

В 1713 г. вышло второе издание «Начал». Его редактировал Роджер Котс, который предпослал изложению предисловие с резкой критикой картезианских воззрений. Вместе с тем Котс подчеркивал теологические выводы из механики Ньютона.

В положительном содержании «Начал» исходная роль принадлежит знаменитым законам, изложенным в начале книги. Три основных закона Ньютона являются исходными принципами классической механики: закон инерции («Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние»[1]), закон силы («Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует»[2]) и закон равенства действия и противодействия («действию всегда равно и противоположно противодействие», или иначе, «взаимодействия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны»[3]).

Основное значение принадлежит второму закону, по отношению к которому первый является частным случаем. Второй закон, если его выразить в дифференциальной форме, утверждает, что сила является производной по времени от количества движения. Сила, связывающая между собой два тела, не зависит от их состояния и от наличия других тел. Принцип суперпозиции сил выражается в виде правила параллелограмма. Из этого правила Ньютон выводит теорию простых машин и переходит от динамических задач к статическим. Далее Ньютон из основных законов механики выводит принцип сохранения количества движения в замкнутых системах, утверждая, что центр тяжести системы не изменит своего состояния покоя или движения в результате взаимодействия входя-

[1] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Ник. морской академии, вып. IV, Пг., 1915, стр. 36.
[2] Там же, стр. 37.
[3] Там же, стр. 38.

щих в систему тел, и, наконец, из независимости действия сил от состояния системы и из закона, согласно которому взаимодействие тел зависит от их расстояния, Ньютон выводит классический принцип относительности:

«Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения»[4].

Основная физическая проблема «Начал»— проблема тяжести тел. Ньютон решает ее феноменологически. Прежде всего, он указывает на тяжесть всех тел, встречающихся на Земле. Тела, стремящиеся вверх, также обладают тяжестью, они поднимаются над Землей только потому, что их плотность меньше, чем плотность окружающих тел. Таким образом, на Земле все тела обладают тяжестью. Переход к космическому тяготению может быть осуществлен с помощью принципа взаимности действия. Если все тела тяготеют к Земле, то и Земля тяготеет к ним. Если бы тяготение тел не было взаимным, то тела, соединившись, двигались бы в направлении силы тяготения. Следовательно, по крайней мере одно космическое тело — Земля — тяготеет к другим телам.

Далее Ньютон вводит количественные определения. Из равенства ускорений вытекает, что тяжесть тел, равноотстоящих от центра Земли, пропорциональна их массам. Соответственно и тяготение Земли к указанным телам пропорционально массам. Отсюда следует, что земные тела притягивают друг друга с силой, пропорциональной их массам.

Ньютон переходит к небесным телам. В силу закона инерции они двигались бы прямолинейно, если бы к ним не были приложены силы. Криволинейные траектории небесных тел доказывают существование таких сил. Ньютон выводит из законов Кеплера существование силы тяготения между планетой и Солнцем, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Планеты движутся по эллиптическим орбитам, так как они показывают действие силы тяготения, направленной к одному из фокусов орбиты, где находится Солнце. Когда планета приближается к Солнцу, сила тяготения возрастает обратно пропорционально квадрату расстояния и таким же образом она убывает, когда планета удаляется от Солнца. Из этой простой закономерности Ньютон сравнительно легко получает законы, открытые Кеплером.

Центростремительное ускорение планеты зависит от расстояния между планетой и Солнцем, оно обратно пропорционально квадрату этого расстояния и для разных планет про-

[4] И. Ньютон. Цит. соч., стр. 45.

порционально их массам. Но ускорение силы тяжести на Земле также пропорционально массе тела. Ньютон предположил, что сила, заставляющая тела стремиться к центру Земли, тождественна по своей природе с силой, искривляющей пути планет и заставляющей их обращаться вокруг Солнца. Это была гениально смелая мысль. Но еще более значителен научный подвиг, который отличает Ньютона от его предшественников в открытии закона тяготения. Ньютон доказал, что тяготение обратно пропорционально квадрату расстояния, с такой исчерпывающей убедительностью, что последующая наука могла уточнить и обобщить этот закон, но уже не могла его отбросить.

Благодаря этому открытию изменился самый характер физики. Она приобрела твердую и универсальную основу — закон, относящийся к движению всех тел природы,— чтобы строить единую картину мира как его однозначное и достоверное отображение. Если первоначальный замысел — сведение всех физических процессов к перемещению масс под действием сил — оказался далеким от подлинной природы, то переход к более точным представлениям был результатом развития физики на основе ньютоновой механики центральных сил.

Стремясь придать закону всемирного тяготения абсолютную достоверность, Ньютон обращается к конкретным астрономическим наблюдениям. Он сравнивает с падением тела на земной поверхности движение Луны вокруг Земли. Центростремительное ускорение Луны, по вычислению Ньютона, будет в $60^2 = 3600$ раз меньше, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли, так как расстояние от центра Земли до Луны Ньютон принимает равным 60 радиусам Земли. Если бы расстояние от Луны до Земли уменьшилось и Луна вращалась бы вокруг Земли непосредственно возле земной поверхности, то ее ускорение стало бы больше в 3600 раз и было бы равным ускорению силы тяжести земных тел. Этот расчет подтверждается сопоставлением астрономических данных с измерением силы тяжести на Земле. Отсюда следует, что отождествление космической силы, искривляющей путь небесного тела, с тяжестью основано на наблюдении и эксперименте и должно рассматриваться как достоверное представление.

Ньютон пришел к этому представлению еще в 1665—1667 гг. В это время он жил в Вульсторпе, так как занятия в Кембридже прекратились из-за эпидемии чумы. Здесь Ньютон пришел к идеям всемирного тяготения, дифференциального исчисления и к основным идеям в области оптики. Эти годы научного творчества Ньютона не имеют аналогий в истории науки по богатству и мощи замыслов ученого. Он пришел к мысли о всемирном тяготении в 1665 г. и тогда же — к методу флюксий, т. е. к идее дифференциального исчисления.

«В том же году,— вспоминал Ньютон,— я начал думать о тяготении, простирающемся до орбиты Луны, и нашел как оценить силу, с которой шар, вращающийся внутри сферы, давит на поверхность этой сферы. Из правила Кеплера о том, что периоды планет находятся в полуторной пропорции к расстоянию от центров их орбит, я вывел, что силы, удерживающие планеты на их орбитах, должны быть в обратном отношении квадратов их расстояний от центров, вокруг коих они вращаются. Отсюда я сравнил силу, требующуюся для удержания Луны на ее орбите, с силой тяжести на поверхности Земли и нашел, что они почти отвечают друг другу»[5].

Двадцать лет спустя Ньютон опубликовал в «Началах» свое открытие в окончательной форме. Оно потребовало напряженной теоретической работы. В течение долгого времени вычисления не подтверждали тождества космического тяготения и земной тяжести. Ньютон производил эти вычисления, взяв неточное значение земного радиуса. Он принимал длину одного градуса меридиана равной 60 милям, как тогда считали. Поэтому у него получилось, что ускорение силы тяжести на поверхности Земли равняется 13,9 *фут/сек*^{2}. Между тем, тела, падающие на поверхность Земли, имеют ускорение, равное 15,1 *фут/сек*^{2} (981 *см/сек*^{2}). Позднее, после того как Пикар, измеряя в 1671 г. дугу меридиана, пришел к выводу, что один градус соответствует не 60, а 69 милям, Ньютон мог исправить эту ошибку; но это время не было для Ньютона периодом бездеятельности. Это был период раздумия и колебаний, которые способствовали развитию и уточнению теории тяготения. У нас нет достаточных материалов для того, чтобы восстановить ход мыслей Ньютона после того как он в 1665 г. впервые стал изучать проблему тяжести, распространяющейся до Луны. Мы имеем право предположить, что некоторое расхождение между вычисленным и наблюдаемым ускорением на земной поверхности Ньютон мог отнести за счет отклонения действительной орбиты Луны от круга. Действительно, в вульсторпские годы Ньютон с помощью открытого им метода флюксий стремился обобщить понятие радиуса круга и изучить проблему радиуса кривизны некоторой кривой. Понятие радиуса кривизны было введено еще в 1669 г. Кеплером. Ньютон воспользовался им, чтобы рассчитать центростремительное ускорение при некруговом движении. Впоследствии Ньютон обобщил закон центростремительного ускорения таким образом, чтобы он оказывался справедливым не только для круга, но и для любого криволинейного движения, если радиус круга заменить

[5] Цит. по книге: С. И. В а в и л о в. Исаак Ньютон. Изд-во АН СССР, 1943, стр. 102—103.

радиусом кривизны в данной точке кривой. В 1679 г. Ньютон доказал, что тяготение, обратно пропорциональное квадрату расстояния, может объяснить не только вращение по кругу, но и вращение по другим кривым. Если тело движется по любой кривой таким образом, что радиус-вектор, соединяющий центральное тело с движущимся, описывает в равные промежутки времени равные площади, то движущееся тело испытывает притяжение к центральному телу, обратно пропорциональное квадрату радиуса-вектора. Если центральное тело находится в фокусе эллипса, по которому движется тело, то последнее притягивается к центральному с силой, обратно пропорциональной квадрату радиуса-вектора. Таким образом, из закона тяготения могла быть выведена кеплерова небесная механика эллиптических планетных движений. В этом отношении обобщение Ньютона опиралось на идеи Гюйгенса. В своей теории центробежных сил Гюйгенс показал, что круговое движение включает стремление тел уйти от центра, причем это стремление прямо пропорционально квадрату скорости и обратно пропорционально радиусу. Если вместо радиуса окружности говорить о радиусе кривизны, то указанный закон сохраняется для всякого криволинейного движения. Исходя из этого, Ньютон установил, что движение тела, тяготеющего к некоторому центру, обратно пропорционально квадрату расстояния, будет происходить по коническому сечению, в фокусе которого находится центр тяготения. От чего зависит вид конического сечения, по которому движется тело? Он зависит от соотношения между силой первоначального толчка и, соответственно, инерциальной компонентой движения, с одной стороны, и тяготением — с другой. Если бы тяготение не было обратно пропорционально квадрату расстояния, то тела не двигались бы по коническим сечениям. Таким образом, движение небесных тел по коническим сечениям приводит к обратной пропорциональности между тяготением и квадратом расстояния как к универсальному закону космоса. Если первоначальный боковой толчок очень мал, то тело устремится к Солнцу почти с той же скоростью, что и при падении. Такое тело приобретет громадную скорость и вместе с ней значительную центробежную силу, которая заставит его, приблизившись к центру тяготения, отойти затем на большое расстояние. Таким образом, при незначительной первоначальной скорости движение тела вокруг центра тяготения будет происходить по очень вытянутому эллипсу. Примером таких тел, двигающихся по орбитам с большим эксцентриситетом, служат кометы. Они устремляются почти к самому Солнцу и, таким образом, их тангенциальная скорость при приближении к Солнцу зависит по преимуществу от тяготения. Напротив, при значи-

тельном первоначальном толчке орбита тела приближается к кругу; такова, например, орбита Луны.

Исторически исходным пунктом ньютоновой теории тяготения были определенные физические гипотезы, допускавшие существование эфира. В семидесятые годы Ньютон еще высказывал кинетические гипотезы, объяснявшие тяготение давлением эфира. Он предполагал, что одна из составных частей эфира непрерывно конденсируется в Земле, затем испаряется, поднимается кверху и снова падает вниз, увлекая с собой тяжелые тела. С этой точки зрения эфир представляет собой неоднородное вещество, включающее различные «эфирные газы». Наличие различных «эфирных газов» служило объяснением электрических, магнитных и гравитационных явлений. По мнению Ньютона, высказанному в статье «Об одной гипотезе, объясняющей свойства света» (1675 г.), «Солнце, как и Земля, впитывает газы для сохранения своего сияния и для сдерживания планет, чтобы они не удалялись от него». Однако Ньютон, разрабатывая подобные гипотезы, стремился дать на их основе строгую количественную теорию и проверить эту теорию точными количественными экспериментами. Такая задача была важным поворотным пунктом не только в творческом пути Ньютона, но и в развитии науки XVIII в. в целом. Произвольные кинетические гипотезы в духе Декарта противоречили требованию однозначности и строгости физических теорий, а это требование вытекало из основных особенностей технического и идейного развития во второй половине XVII в. Наука в лице Ньютона пошла по линии феноменологической трактовки понятий, оставив будущему разработку кинетических моделей, которые объяснили бы наблюдавшиеся, измеренные и математически интерпретированные факты. Метафизическая мысль того времени возвела ньютоновский отказ от кинетических гипотез в абсолютный принцип познания, но в действительности речь шла о закономерном условном отказе от гипотез. Знаменитое изречение Ньютона «hypotheses non fingo» в условной, отнюдь не абсолютной форме устраняло кинетические гипотезы. Оно лишь указывало науке путь феноменологического описания и математического анализа, путь, который впоследствии должен был привести к возрождению кинетических гипотез, но уже лишенных произвольности и неоднозначности, с которыми мирились во времена Декарта, но никак не могли примириться в последующий период.

Ньютон не знал причины «первоначального толчка», определившего скорость движения планет по круговой орбите. Он приписал этот толчок богу. Но в следующем веке наука в космогонических теориях, выводивших «первоначальный толчок» из молекулярного движения, вышла за пределы

механической картины мира и вместе с тем нанесла новый удар теологии, выступив против креационизма в вопросе о происхождении Земли и солнечной системы.

Феноменологическая физика Ньютона поставила перед наукой ряд проблем, которые могли быть решены лишь значительно позже. К ним прежде всего принадлежала проблема природы тяготения. Прямые попытки построения объясняющих тяготение космических моделей эфира при всем своем историческом значении не могли решить этой проблемы. Действительный шаг вперед от ньютоновской теории тяготения был сделан только общей теорией относительности, обобщившей и подытожившей длительное развитие концепции силовых полей. У истоков этих концепций находилась теория гравитационного поля, исходившая из ньютонова закона тяготения.

Этот закон был началом и прообразом классических физических теорий, находивших закономерности силовых полей. Законы движения, сформулированные в «Началах», были основой классической механики в собственном смысле. Из второго закона непосредственно вытекают уравнения движения, которым Лагранж впоследствии в своей «Аналитической механике» придал новый, чрезвычайно плодотворный вид. Из закона тяготения непосредственно вытекают уравнения гравитационного поля, ставшие прообразом для уравнений других силовых полей. Взаимная независимость уравнений поля и уравнений движения была основой раздельного существования механики и физики. Нелинейный характер уравнений тяготения Эйнштейна и вывод уравнений движения из уравнений поля в работах Эйнштейна, Инфельда и Гоффмана, а также Фока (в тридцатые годы нашего столетия) показали условность разделения двух видов физических закономерностей.

Уравнения гравитационного поля были исходным пунктом феноменологической физики. Но последняя исторически развивалась во взаимодействии с физикой наглядных кинетических моделей. Электродинамика Максвелла исторически связана не только с аналитической механикой и феноменологической теорией тяготения, электростатикой и магнетизмом, но и с концепциями эфира в физике XVII—XIX вв. Эти концепции, как и физика моделей в целом, были связаны с ньютоновыми гипотезами, которые вопреки hypotheses non fingo запечатлелись не только в оптике, но и в механике Ньютона.

Ньютоновская физика моделей, несмотря на свой условный характер, разработана в некоторых пунктах с большими подробностями. В частности, об эфире Ньютон в некоторых мемуарах говорит очень обстоятельно, наделяя его рядом свойств, и объясняет с помощью эфира большое число физических

явлений. В 70-е годы мысль об эфире была лейтмотивом научных высказываний Ньютона; это связано с явлениями, наблюдавшимися при помощи воздушного насоса [6]. В мемуаре «Теория света и цветов, заключающая гипотезу объяснения свойств света, описание наиболее существенных явлений различных цветов тонких пластин и мыльных пузырей, равным образом зависящих от ранее характеризованных свойств света» Ньютон характеризует эфир как чрезвычайно разреженный газ. Его существование он доказывал затухающим движением маятника в стеклянном сосуде, лишенном воздуха. Эфир состоит из различных ингредиентов. Последние в различных сочетаниях дают все находимые в природе вещества. «Возможно,— пишет Ньютон,— что все сооружение природы не что иное, как различные сочетания некоторых определенных эфирных духов, или паров, как бы сгущенных осаждением, весьма сходно с тем, как пары сгущаются в воду»[7].

В оптическом трактате 1675 г. Ньютон выдвигает кинетическую гипотезу, объясняющую тяготение движением эфира. Земля поглощает и сгущает «дух», т. е. эфирное вещество. Это вызывает нисходящие потоки эфира, которые прижимают тела к Земле с силой, пропорциональной поверхности их частиц. «Огромное тело Земли,— пишет Ньютон,— в котором повсюду, во всех его частях, может быть до самой середины, происходит вечная работа, может непрерывно сгущать столь большое количество этого духа, что для пополнения запасов вызывает его опускание сверху с огромной быстротой; при таком опускании эфир может сносить вместе с собой и тела, пронизанные им, с силой, пропорциональной поверхности всех частиц, на которые он действует... Возможно, что и Солнце, подобно Земле, обильно впитывает этот дух для поддержания сияния своего и для удержания планет от дальнейшего удаления от него»[8].

Следует подчеркнуть, что из этого воззрения вытекает равенство всех частиц по величине и по форме, иначе вес не был бы пропорционален массе.

Для собственно физических идей Ньютона и, в частности, для его представлений об эфире, особенно важна «Оптика» и ряд трактатов и статей о свете. Они исторически связаны с конструированием телескопа.

В 1684 г. Ньютон начал работать над усовершенствованием телескопа. Вскоре он установил, что основной недостаток телескопических наблюдений связан с хроматической аберра-

---

[6] См. С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. Изд-во АН СССР, 1943, стр. 95.

[7] Там же, стр. 95.

[8] Там же, стр. 96.

цией — с появлением радужной каймы, окружающей изображение предмета, наблюдаемого в телескоп. В то же время Ньютон пришел к мысли об отражательном телескопе — рефлекторе и решил построить новый зеркальный телескоп. В 1668 г. он создал модель такого телескопа, а в 1671 г.— первый крупный отражательный телескоп. В связи с этими практическими работами Ньютон пришел к теории света.

В начале 1672 г. Ньютон представил Королевскому обществу доклад, в котором излагалось открытие дисперсии света. Этот доклад был итогом пятилетних экспериментальных исследований. Значительно позже, в 1704 г., Ньютон выпустил книгу содержавшую результаты более чем тридцатилетних исследований по теории света. Это была знаменитая «Оптика». Еще позже, в 1728 г., уже после смерти Ньютона, вышли «Лекции по оптике».

Экспериментальные работы Ньютона, положившие начало не только новому периоду в развитии учения о свете, но и в известной степени поднявшие на новый уровень экспериментальную физику в целом, были сделаны в течение 1665—1676 гг. Ньютон исследовал прежде всего преломление света в призмах. Он пропускал луч света через небольшие отверстия в темную комнату. Луч света падал на стеклянную призму. На поставленном сзади призмы экране получался цветной спектр. Ньютон доказал, что белый свет состоит из окрашенных лучей, причем каждый луч отклоняется в различной степени при преломлении и, таким образом, призма позволяет разложить обычный свет на монохроматические лучи, падающие на различные места экрана. Соответственно лучи различных цветов обладают различным преломлением в одних и тех же средах. Ньютон придавал решающее значение эксперименту, в котором он изучал монохроматические лучи. Позади призмы помещался экран с маленьким отверстием, сзади него еще один экран, также с отверстием, затем вторая призма и воспринимающий экран. Поворачивая призму, можно было пропустить через отверстия во втором экране любой монохроматический луч. Оказалось, что вторая призма не рассеивает свет, а показатель преломления возрастает от красного цвета к синему.

В различные периоды своей жизни Ньютон высказывал различные представления о природе света. Вначале он склонялся к гипотезам об эфире, передающем свет на расстояние. Впоследствии Ньютон остановился на так называемой эмиссионной теории, согласно которой существуют элементарные корпускулы — световые частицы, движение которых лежит в основе распространения света.

Главным аргументом в пользу этой теории и соответственно главным возражением против волновой эфирной теории

Ньютон считал прямолинейность распространения света. Явления, которые доказывают его волновую природу, получали у Ньютона объяснение с помощью усложнения корпускулярной концепции. При этом Ньютон подчеркивал условный и неоднозначный характер как волновых, так и корпускулярных гипотез, противопоставляя и те и другие однозначным результатам эксперимента. Ньютон легко переходит от одной гипотезы к другой, соединяет в одном и том же трактате разноречивые версии, высказывает их подчас в полувопросительной или вопросительной форме. Эволюция оптических идей шла в сторону корпускулярной концепции. Постепенно создавалась картина мира, в которой не было ничего кроме частиц материи (в том числе световых частиц), действующих друг на друга через пустоту и движущихся в пустоте с ускорением под действием сил или равномерно и прямолинейно — в отсутствии сил; силы при этом имеют центральный характер, пропорциональны массам тел и обратно пропорциональны расстояниям между телами.

Такие представления лежали в основе важнейших физических идей XVIII в. Но это не значит, что континуальные концепции исчезли. Во-первых, они продолжали свое существование в виде континуальных моделей, призванных объяснить оптические, электрические, тепловые явления и самую природу тяготения. Во-вторых, в отличие от частиц вещества силовые поля и прежде всего гравитационное поле представлялись континуальными. Правда, речь шла о формальных величинах, непрерывно распределенных в пространстве. Но этим величинам предстояло войти в новые физические теории в качестве реальной физической среды.

П. С. Кудрявцев

ОСНОВНЫЕ ЛИНИИ РАЗВИТИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИДЕЙ в XVIII в.

В эволюции физики в XVIII в. отчетливо различаются две главные тенденции: тенденция накопления эмпирического материала и тенденция математического описания физических явлений на основе более или менее вероятных гипотез о действующих агентах. В результате развития этих тенденций в течение XVIII столетия оформляется экспериментальная и теоретическая физика, развивающаяся в дальнейшем в тесной связи с математикой.

Оставляя в стороне историю накопления эмпирических фактов, рассмотрим кратко основные черты эволюции математических методов физики. Галилей, Гюйгенс и Ньютон показали путь приложения математики к решению задач механики. Этот путь был продолжен Л. Эйлером (1707—1783), Ж. Лагранжем (1736—1813) и другими математиками, механиками и физиками XVIII в. Программа этого направления была намечена в предисловии к «Началам» Ньютона: «по явлениям движения распознать силы, а затем по силам объяснить остальные явления» и далее вывести из начал механики и остальные явления природы.

Поскольку, таким образом, во главу угла ставились принципы механики, необходимо было более точно определить эти принципы и основные понятия. Основными понятиями механики и всего естествознания являются материя, пространство и время. Считалось ли это пространство заполненным материей, как у Эйлера и Ломоносова, или силами, как у Бошковича и Канта, оно оставалось изотропным и однородным евклидовым пространством. Вся система механики Ньютона, начиная с принципа прямолинейного, равномерного инерцион-

ного движения и кончая законом убывания гравитационного поля точки с расстоянием, была неразрывно связана с этими свойствами (пространства). Что касается материи, то она мыслилась прежде всего как некоторая субстанция, лежащая в основе всех совершающихся явлений. Более конкретным и вместе с тем достаточно абстрактным образом этой субстанции является «тело» (corpus). Материю в ее механической интерпретации можно было мыслить как совокупность тел. Однако как в вопросе о структуре самого тела, так и в вопросе о существовании промежуточной среды между механически осязаемыми телами существовали различные точки зрения. Та точка зрения, которую принято считать «ньютонианской», является по существу не чем иным, как атомизмом. Тела мыслятся состоящими из атомов, плавающих в пустом пространстве. В мире нет ничего кроме атомов и пустоты — этот тезис древних атомистов продолжал действовать и в XVIII в. Ему противостоял другой тезис: в мире нет ничего кроме материи и движения, причем сама материя мыслилась как протяженный континуум. Эту точку зрения развивали картезианцы. Главной причиной этого размежевания было то, что наука еще не изучила в достаточной степени иных форм движения, кроме механического движения. При таком уровне знаний вопрос об источнике движения и вопрос о «месте» движения возникали сами собой. Картезианцы отводили вопрос об источнике движения принципом сохранения движения, а постоянное контактное взаимодействие частей континуума, по их мнению, обеспечивало, как казалось, постоянное изменение движений без применения каких-либо сил. Зато у них возникала трудность с «местом» движения: «куда движется» то или иное тело (часть континуума). Трудность эта устранялась допущением цикличности всех движений, допущением, которое было очень трудно согласовать с повседневным опытом. В связи с этими трудностями возникла третья точка зрения, истоки которой можно возвести к Лейбницу. Согласно этой точке зрения, в основе всего лежат непротяженные действующие сущности — монады. В работах Канта и особенно Р. И. Бошковича (1711—1787) эта идея была подробно разработана.

Атомы Бошковича — это непротяженные материальные точки, обладающие инерцией и являющиеся центром сил. Силы эти могут быть и притягательными, и отталкивательными в зависимости от расстояния. В рассматриваемую эпоху идеалистический источник системы Бошковича, ее отрыв от чувственного опыта не могли привлечь на ее сторону естествоиспытателей, боровшихся с метафизическими «монадами», в какой бы форме они ни фигурировали. Здесь мы вплотную подошли к вопросу о силах, о споре между сторонниками так

называемого «близкодействия» и «дальнодействия». Картезианская система исключала силы из физической картины, тогда как в ньютонианской системе они являлись необходимым звеном. Важным элементом ньютонианской системы взглядов был также первоначальный запас движения («начальные условия»), пресловутый «первый толчок». Однако спор о близкодействии и дальнодействии на данном этапе имел часто иллюзорный, метафизический характер. Сам Ньютон считал нефизический скачок на расстояние глубочайшей нелепостью. Нельзя забывать, что именно теория тяготения начала создание математического аппарата теории поля, тогда как картезианцы разрабатывали конкретные модели и образы поля. Как ни парадоксально это звучит, но именно Ньютон был подлинным основателем «близкодействия», Декарт же был скорее сторонником дальнодействия. С физической точки зрения спор между сторонниками близкодействия и дальнодействия сводится к следующему; передается ли «действие» или процесс мгновенно или оно передается с конечной скоростью. Декарт полагал, что свет распространяется мгновенно. Ньютон исходил уже из факта конечности скорости света, и интерпретировал процесс распространения светового поля в корпускулярных образах. Ценность категории силы в механике была ясна и стороннику несколько подправленного картезианского направления Эйлеру, и склоняющемуся к ньютонианству, но не принимавшему динамизма Даламберу. Они хорошо чувствовали то, что позднее ясно выразил Энгельс: «Измеримость движения и придает категории силы ее ценность»[1]. Но как раз с точки зрения «измеримости движения» дело обстояло неблагополучно.

Согласно второму закону Ньютона, сила измеряется изменением количества движения за единицу времени. Та же самая величина может быть измерена производимой ею деформацией, в результате которой возникает упругая сила, уравновешивающая действие приложенной силы. По третьему закону Ньютона геометрическая сумма количеств движения взаимодействующих тел сохраняется, так, что, например, сумма количества движения соударяющихся шаров до удара и после удара одинакова. Во всех этих формулировках под «количеством движения» понимается произведение массы на скорость. Эта мера движения ведет свое происхождение от Декарта, хотя точное определение численного значения (не векторного) количества движения впервые было дано Ньютоном во втором «Определении» его «Начал». За год до выхода «Начал» Лейбниц опубликовал статью «Краткое доказательство ошибки знаменитого Декарта и других, относящихся к закону природы,

[1] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1948, стр. 227.

согласно которому бог желает сохранить количество движения одним и тем же»[2], в которой, рассматривая статическое измерение сил, обращает внимание на то, что деформация, производимая падающим грузом, больше, нежели деформация, производимая покоящимся грузом. Отсюда он делает вывод о наличии в природе двух классов сил: «мертвых», подобных покоящимся грузам, и «живых», подобных движущимся грузам. Для первых подходящей оказывается мера Декарта-Ньютона mv, для вторых — мера mv^2. Этой статьей было положено начало знаменитому спору о мерах движения. Даламбер в своей «Динамике», касаясь этого спора, пишет: «Когда говорят о силе движущихся тел, то или с произносимым словом вовсе не связывают никакой ясной идеи, или под ним понимают лишь свойство движущихся тел преодолевать встречаемые ими препятствия или сопротивляться этим препятствиям»[3]. Таким образом, Даламбер во всех случаях сводит измерение силы к статическому. Это обстоятельство играет важнейшую роль в динамике Даламбера, о чем будет сказано дальше. «Если это (т. е. измеряемость сил препятствиями —*П. К.*), — продолжает Даламбер, — твердо усвоить, то очевидно, что движению тела можно противопоставить три вида препятствий: препятствия непреодолимые, совершенно уничтожающие всякое движение, далее препятствия, оказывающие как раз такое сопротивление, какое лишь необходимо для того, чтобы уничтожить движение тела и уничтожающие его мгновенно, — это случай равновесия и, наконец, препятствия, уничтожающие движение постепенно, это случай замедленного движения»[4].

Характерно для периода механического взгляда на природу допущение «уничтожения» движения и существования «непреодолимых» препятствий, вроде «абсолютно твердых тел». Даламбер сам признает, что с такого рода абстракциями механике делать нечего «они не могут служить для определения силы». Далее он указывает, что при измерении действия уравновешивающими это действие препятствиями произведение массы на скорость, или, что то же самое, количество движения может служить выражением силы. «Всеми признается и то, — продолжает Даламбер, — что в случае замедленного движения число преодоленных препятствий пропорционально квадрату скорости»[5].

Таким образом, по Даламберу, двойная мера движения обусловлена двояким способом измерения «сил»: либо по способу уравновешивания, либо по способу замедления движения.

---

[2] См. Розенбергер. История физики, ч. 2, М.—Л., ГТТИ, 1933, стр. 244.
[3] Даламбер. Динамика. М.—Л., ГТТИ, 1950, стр. 25.
[4] Там же, стр. 25—26.
[5] Там же.

В одном способе «действием служит то расстояние, которое проходится равномерно в течение данного времени; этого рода действие пропорционально скорости». В другом способе «действие выражается тем расстоянием, которое проходится вплоть до полного поглощения движения, и это действие пропорционально квадрату скорости»[6]. Оба способа совершенно эквивалентны. «Предложите решить одну и ту же задачу из механики двум геометрам, из которых один является противником живых сил, а другой их сторонником. Решения обоих этих геометров, если вообще они верны, совпадут друг с другом». В самом деле, вычисляем ли мы силу по уравнению

$$F = \frac{d}{dt}(mv),$$

или по уравнению

$$F = \frac{d}{dt}\left(\frac{mv^2}{2}\right),$$

результат должен быть одинаковым. Однако Энгельс совершенно справедливо указывал, что «в этом вопросе должна была оставаться неясность, пока не знали, что делается с уничтожающимся как будто механическим движением»[7].

Этот вопрос уже стоял на очереди. То, что механическое движение может только квазиуничтожаться, ясно видели Эйлер и Ломоносов. По Ломоносову, движение не может возникнуть из покоя, т. е. «нулевого движения», и он считает поэтому тяжесть не чем иным, как «задержанным движением»[8]. Эйлер широко использует гидродинамический принцип Бернулли (являющийся по существу законом сохранения энергии для идеальной несжимаемой жидкости) для объяснения тяготения, электрических и магнитных притяжений. Идея «скрытых движений» очень популярна в физических воззрениях XVIII в. Она неразрывно связана с общим принципом сохранения, который настолько укоренился в умах естествоиспытателей, что Ломоносов упоминает о нем в письме к Эйлеру от 5 июля 1748 г., как о чем-то само собой разумеющемся. Однако формулировка Ломоносова настолько универсальна и гибка, что, например, С. И. Вавилов счел возможным говорить о некотором всеобщем «законе Ломоносова». «Ломоносов,— пишет С. И. Вавилов,— навеки вперед как бы взял в общие скобки все виды сохранения свойств материи. Глубочайшее содержание великого начала природы, усмотренного Ломоносовым, раскрывалось постепен-

---

[6] Даламбер. Динамика. М.—Л., ГТТИ, 1950, стр. 28.
[7] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955, стр. 70.
[8] М. В. Ломоносов. Полное собр. соч., т. I, Изд-во АН СССР, 1951, стр. 243.

но и продолжает раскрываться в прогрессивном историческом процессе развития науки» [9].

В самом деле, Ломоносов с удивительной смелостью и вместе с тем осторожностью утверждает *«всеобщий закон природы»*, закон сохранения чего-либо. Природу этих инвариантов Ломоносов не раскрывает точнее; однако он приводит в качестве примеров таких инвариантов материю, движение, упоминает о нерастяжимости интервала времени. Нельзя не отдать должное научной проницательности Ломоносова, понявшего во всей общности огромную методологическую важность закона сохранения для естествознания. В своих конкретных исследованиях он опирался на этот принцип, решительно отвергая дальнодействие, уничтожение и возникновение движения, скрытые качества.

По существу конкретная механика уже вступила на путь поисков таких принципов. Иоганн Бернулли формулирует принцип возможных перемещений (1717), Даламбер — принцип уравновешивания сил инерции движущими силами и реакциями связи, Мопертюи, Эйлер (1744)— принцип наименьшего действия. К этим принципам следует прибавить сформулированный Ньютоном и Вариньоном принцип суперпозиций движений и сил (правило параллелограмма). Этот принцип был распространен Вариньоном и на моменты сил, суммируемых по правилу параллелограмма. Лагранж в своей «Аналитической механике» (1788) подверг историко-критическому анализу принципы статики и динамики и вывел аналитические условия равновесия материальной точки и системы. Объединив принцип возможных перемещений с принципом Даламбера, Лагранж вывел для системы точек уравнения движения первого и второго рода. Последние уравнения, благодаря введенному Лагранжем методу обобщенных координат, оказались удивительно мощным орудием исследования, применимым не только к решению механических задач.

Таким образом, к концу XVIII в. механика превратилась в стройную дедуктивную математическую дисциплину, развивавшуюся в тесном взаимодействии с математическим анализом. Ее творцы (Эйлер, Даламбер, Лагранж и др.) были вместе с тем выдающимися математиками, «геометрами», по терминологии того времени.

Особенно существенным достижением математической физики XVIII в. явилась разработка ею проблем физики сплошных сред. Для этих проблем был создан специальный математический аппарат в виде дифференциальных уравнений в част-

---

[9] С. И. Вавилов. Собр. соч., т. III. Изд-во АН СССР, 1956, стр. 98.

ных производных. Одной из первых проблем такого рода была задача о колебаниях струны. Предельным переходом от системы точек, связанных нитью, или более простым способом с точки зрения «сплошной» струны может быть получено уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Даламбер в 1747 г. показал, что решением этого уравнения может быть сумма произвольных функций

$$u(x, t) = f_1(x + at) + f_2(x - at).$$

Эйлер, исследуя в 1747 и 1748 гг. это решение, показал, что оно может быть представлено в виде такой суммы, если даны начальные значения $u(x, o)$, т. е. $u(x, t)$ для начального момента времени. Если же даны начальные значения смещений точек струны и их *скорости*, то получается *единственная* волна, бегущая в одну сторону. Этот вывод Эйлера весьма важен с точки зрения истории принципа Гюйгенса (парадокс с отсутствием обратной волны) [10]. Но в истории физико-математических наук большее внимание привлекла другая дискуссия: как широк произвол в выборе непрерывных функций, являющихся решением волнового уравнения. Эйлер и позднее Лагранж доказали, «что эти функции могут быть любого вида: непрерывного или прерывного, лишь бы только они представляли начальное состояние струны» [11]. Но Эйлер считал, что функции могут быть разбиты на два класса: одни, выражаемые в элементарных функциях (например, тригонометрических), и другие, представляемые кривыми, начерченными произвольным образом. Класс этих последних функций несравненно шире и не может быть сведен к функциям только первого класса. Между тем Даниил Бернулли в 1753 г. нашел, что решение волнового уравнения сводится к сумме тригонометрических функций, и сделал отсюда вывод, что произвольная функция может быть представлена тригонометрическим рядом. Этот вывод Бернулли и подвергся критике со стороны Эйлера и Лагранжа. Однако Фурье в своей «Аналитической теории тепла» доказал правоту Бернулли.

Важнейшим результатом физики континуума было создание Эйлером теории движения идеальной жидкости. Основу этой теории составляли знаменитые уравнения гидродинамики Эйлера

$$Xq = Pq - \left(\frac{dp}{dx}\right), \quad Yq = Qq - \left(\frac{dp}{dy}\right), \quad Zq = Rq - \left(\frac{dp}{dz}\right),$$

[10] См. Л. С. Минченко. Физика Эйлера. Труды ИИЕиТ АН СССР, т. 19. Изд-во АН СССР, 1957, стр. 244—245.

[11] Ж. Лагранж. Аналитическая механика, т. 1. М.—Л., ГТТИ, 1950, стр. 517.

где q — плотность жидкости, рассматриваемая как непрерывная функция точки, p — давление жидкости в данной точке, P, Q, R — компоненты силы, действующей на данную частицу жидкости, отнесенной к единице массы, и наконец, x, y, z — дифференциальные выражения, представляющие изменения компонент скорости *данной части жидкости*:

$$X = \left(\frac{du}{dt}\right) + u\left(\frac{du}{dx}\right) + v\left(\frac{du}{dy}\right) + w\left(\frac{dv}{dz}\right),$$

$$Y = \left(\frac{dv}{dt}\right) + u\left(\frac{dv}{dx}\right) + v\left(\frac{dv}{dy}\right) + w\left(\frac{dv}{dz}\right),$$

$$Z = \left(\frac{dw}{dt}\right) + u\left(\frac{dw}{dx}\right) + v\left(\frac{dw}{dy}\right) + w\left(\frac{dv}{dz}\right).$$

К этим уравнениям прибавляется «уравнение непрерывности»

$$\frac{dq}{dt} + \frac{d(qu)}{dx} + \frac{d(qv)}{dy} + \frac{d(qw)}{dz} = 0.$$

Для стационарного движения несжимаемой жидкости при наличии потенциала скоростей S:

$$u = \frac{\partial S}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial S}{dy}, \quad w = \frac{\partial S}{\partial z},$$

оно переходит в важное уравнение

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = 0.$$

Это уравнение, полученное Эйлером в механике сплошных сред, было найдено также Лапласом в 1785 г. в теории тяготения. Процессы в среде и мгновенное дальнодействие точечных масс оказались выражающимися одним и тем же математическим законом. Тому же закону, как выяснилось позже, подчиняется стационарный поток тепла в теплопроводящей среде. Это явилось позже одним из источников максвелловской теории [12].

Казалось бы, Эйлером был вполне подготовлен математический аппарат волновой оптики и акустики и прежде всего такого типично волнового явления, как интерференция. Действительно, Эйлер в своей «Новой теории света и цветов» (1746) впервые написал уравнения, лежащие в основе элементарной теории интерференции. Распространение света Эйлер мыслит совершающимся в форме конических световых пучков,

[12] См. Дж. К. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитных волн поля. М., ГТТИ, 1952, стр. 14.

вдоль которых распространяются независимые продольные колебания. В этой системе нет места принципу Гюйгенса, о котором, кстати сказать, Эйлер и не упоминает. Объемную волну он рассматривает по принципу суперпозиции линейных некомпланарных движений, совершающихся синхронно, в связи с чем Эйлер совершенно игнорирует фазовые соотношения. Игнорирование принципа Гюйгенса и идея независимых конических пучков отвела Эйлера от проблемы дифракции, а игнорирование фазовых соотношений — от проблемы интерференции. Единственным физическим результатом квазиволновой оптики Эйлера явилась его теория цветов. Именно Эйлер впервые связал цвет с частотой колебаний и впервые высказал оригинальную резонансную теорию окраски тел.

Оригинальную теорию цветов, явившуюся прототипом последующих химических теорий света, высказал Ломоносов. Тела предполагаются состоящими из трех сортов частиц, соответствующих трем первоначальным химическим «элементам», по тогдашним химическим представлениям: соляной, ртутной и серной, или горючей материи. Этим трем сортам «материальных» частиц соответствуют три сорта частиц эфира, из коих первому роду соответствует красный цвет, второму — желтый, третьему — голубой. «Прочие цвета рождаются от смешения первых». Частицы первого рода — самые крупные, третьего — самые мелкие. При распространении в эфире волнового движения частицы его движутся «зыблющимся и коловратным движением», при падении световых лучей на тело частицы эфира волновым движением прижимаются к частицам телам и тогда, по принципу совмещений, сформулированному Ломоносовым, приводят во вращение соответствующие частицы тела. Если поверхность тела состоит из частиц всех сортов, то все эфирные частицы передают им свое вращательное движение и такое тело кажется черным. Если же на поверхности тела нет этих смешанных частиц, но имеются только чистые земляные или водяные, то тело будет казаться белым. В промежуточных случаях получаются различные цвета.

Несмотря на архаические химические представления в теории Ломоносова и смешение физиологического и физико-химического понятий цвета, мы можем констатировать наличие в ней очень здравых физических идей, а именно: 1) синтез волновых и корпускулярных представлений в оптике, 2) принцип волнового распространения света через эфир, 3) превращение светового движения в тепловое при падении света на черные тела, 4) составление всех цветов из трех простых, 5) своеобразный принцип «резонанса» (принцип совместности движений частиц) и, наконец, 6) идея о зависимости цвета пламени от химического строения горючего вещества. Но в общем волно-

вая оптика XVIII в. не добилась сколько-нибудь существенных успехов.

Бóльших успехов достигла корпускулярная оптическая теория. Ей удалось естественно и легко объяснить аберрацию, открытую Брэдли в 1728 г. Этим открытием и его истолкованием было положено начало длительной серии экспериментов и теорий оптики движущихся сред, увенчавшихся в конечном итоге созданием теории относительности.

Сложнее была ситуация в области тепловых явлений. Неразработанность основных понятий (температура, количество тепла, теплоемкость, теплопроводность и т. п.), несовершенство экспериментальной методики создавали немалые трудности на пути построения ясной физической теории тепловых явлений. «В физике нелегко что-либо установить, не прибегая к опытам и испытаниям, и... голые рассуждения, не подкрепленные опытом, часто ведут к ошибкам»[13],— писал один из основателей теплофизики, русский ученый, академик Г. В. Рихман (1711—1753). Эта мысль несомненно разделялась большинством современников Рихмана, и XVIII в. был эпохой основания экспериментальной теплофизики и прежде всего — термометрии и калориметрии.

В теоретической интерпретации установленных фактов опирались на закон сохранения, причем выявились две точки зрения. Согласно одной точке зрения, теплота представляла неуничтожаемый флюид, и, следовательно, можно говорить о количестве этого флюида, содержащегося в теле, и ставить вопрос о зависимости этой величины от структуры тела, его массы и других условий. Эта точка зрения сыграла большую роль в основании калориметрии. Другая точка зрения примыкала к ранее сформулированным идеям Бэкона — Ньютона и рассматривала теплоту как род движенля. Наиболее последовательно и с наибольшей полнотой эта точка зрения проводилась М. В. Ломоносовым.

В работе «Размышления о причине теплоты и холода», опубликованной на латинском языке в «Новых комментариях» Петербургской Академии наук (1750, т. 1), но доложенной Академии наук пятью годами раньше (21 и 25 января 1745 г.), Ломоносов выдвигает тезис: «теплота состоит во внутреннем движении материи»[14].

В соответствии со своей общей натурфилософской концепцией, согласно которой «мир полон материи», Ломоносов различает в телах два вида материи: «собственную», называемую им «связанной», и «протекающую» через поры первой. При-

[13] Г. В. Рихман. Труды по физике. Изд-во АН СССР, 1956, стр. 84.

[14] М. В. Ломоносов. Полное собр. соч., т. II. Изд-во АН СССР, 1951, стр. 11.

чина теплоты, по Ломоносову, «заключается во внутреннем движении связанной материи тел»[15]. Это внутреннее движение, по мнению Ломоносова, может быть только вращательным движением частичек тела. Такая гипотеза вытекает у Ломоносова опять-таки из его натурфилософских концепций, в которых нет места силам, действующим на расстоянии. Сцепление частиц твердого тела осуществляется непосредственным контактом этих частиц; следовательно, внутреннее движение частиц должно быть таким, чтобы оно не нарушало этого контакта. Таким движением может быть только вращательное, так как уже при колебательном движении частиц они должны отходить друг от друга.

Отметим, что позже Ломоносова аналогичную идею высказал известный английский химик Дэви. Эту идею Джоуль называл «прекрасной». Она была весьма искусно использована самим же Ломоносовым (см. ниже) для объяснения упругости газов. Любопытно, что через сто лет после Ломоносова тот же Джоуль пытался показать, что «вращательное движение, аналогичное описанному сэром Дэви, способно объяснить закон Бойля — Мариотта, а также и другие явления, представляемые упругими жидкостями»[16].

С помощью своей гипотезы Ломоносов объясняет выделение теплоты при трении, при ковке железа, передачу теплоты от нагретого тела холодному. В последнем случае частица нагретого тела, вращаясь быстрее, передает часть своего движения медленно вращающимся частицам, причем «столько же движения уходит от первых, сколько прибавляется у вторых»[17]. Далее Ломоносов применяет свою теорию к явлениям теплоотдачи, вообще говоря, сложным и малоизученным в то время, и, наконец, к явлениям плавления. Здесь он высказывает интересную идею, что отталкивательная сила частиц обязана своим происхождением взаимодействию вращательных моментов частиц. «Отсюда следует,— пишет Ломоносов,— что... причина текучести и газообразности тел есть вращательное движение частиц, и возбуждаемая им отталкивательная сила достаточна для нарушения сцепления частиц в такой степени, что частицы могут или свободно скользить друг около друга и растекаться или при полном уничтожении их связи рассеиваться в воздухе»[18]. Но рассеявшиеся частицы сохраняют свое вращательное движение; поэтому «тела газообразные и жидкие всегда имеют в себе теплоту, хотя бы и небольшую, какими

[15] М. В. Ломоносов. Полное собр.соч.,т. II. Изд-во АН СССР, 1951, стр. 13.

[16] В сб. «Основатели кинетической теории материи». Под ред. А. К. Тимирязева. М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 37.

[17] М. В. Ломоносов. Цит. соч., стр. 29.

[18] Там же, стр. 35.

бы холодными ни казались»[19]. Но для конденсированных систем мыслимо такое состояние, при котором тело находится в «совершенном покое»: «Следовательно, по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц»[20]. В такой форме была впервые в науке высказана мысль о существовании абсолютной температуры.

Последняя часть работы Ломоносова посвящена критике теории теплорода. В этой критике много остроумия, интересных наблюдений и догадок. Особенно важно замечание, что увеличение в весе обжигаемых тел, наблюдавшееся в опытах Бойля, сводится к тому, «что весом обладают либо части пламени, сожигающего тело, либо части воздуха, во время обжигания проходящего над прокаливаемым телом»[21].

Кончается работа Ломоносова общим выводом, «что нельзя приписывать теплоту тел сгущению какой-то тонкой, специально для того предназначенной материи, но что теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи». «Тем самым,— продолжает Ломоносов,— мы не только говорим, что такое движение и теплота свойственны и той тончайшей материи эфира, которой заполнены все пространства, не содержащие чувствительных тел, но и утверждаем, что материя эфира может сообщать полученное от Солнца теплотворное движение нашей Земле и остальным телам мира и их направить, являясь той средой, при помощи которой тела, отдаленные друг от друга, сообщают теплоту без посредничества чего-либо ощутимого»[22]. Так Ломоносов, как бы предвосхищая будущее развитие термодинамики, включает в свою термодинамическую систему и излучение.

Теория тепла Ломоносова несомненно принадлежит к блестящим достижениям современной ему эпохи. Однако историческая ограниченность теории заключается в том, что Ломоносов не знает еще иных форм движения, кроме механической, в связи с чем возникали серьезные трудности при объяснении явлений, связанных с химическими превращениями, прежде всего с горением. Ломоносов весьма остроумно показывает несостоятельность теории теплорода, в применении к такому явлению как воспламенение пороха от случайной искры на морозе. «Каким образом, спрашивается, в самую холодную зиму, когда все охвачено легким морозом, или в самой холодной морской глубине, где, согласно этой гипотезе, теплородной материи почти совершенно нет, порох заряженной, внезапно зарядившейся

[19] Там же.
[20] Там же.
[21] Там же, стр. 47.
[22] Там же, стр. 53—55.

искры, вспыхивает вдруг огромным пламенем?»[23]. Но ведь и для теории Ломоносова ответ на этот вопрос не так-то прост: откуда, в самом деле, взялось столь бурное движение частичек?

За этот уязвимый пункт ухватились критики Ломоносова. Так, Эрлангенский магистр Арнольд по поводу примера с порохом не без язвительности говорил: «ежели б вертение частиц около их оси почитать единственною причиною воспаления, то б по основаниям г. Ломоносова, иногда и целая куча пороха не загорелась. Ибо он думает, что всякое тело может сообщить другому телу не большее движение, но какое оно само имеет». Ортодоксальный механист не мог не привести и возражения с постепенным «затуханием» механического движения: «коловратное движение... от часу также и слабее сталкивалось и наконец бы и совсем перестало, следовательно и теплота б Ломоносова купно с тем движением пропало; но сие печально б было, наипаче в России»[24].

Последний аргумент показывает, что критик совершенно не понимал системы Ломоносова, основанной на законе сохранения; однако энергетику горения при тогдашнем уровне знаний действительно было трудно обосновать. Эйлер пытался выйти из этого затруднения допущением гипотезы, что частицы горючего вещества (например, пороха) представляют собой «шарики», содержащие запас скрытого движения, который по мере горения освобождается, являя собой своеобразную модель цепной реакции[25]. Эйлер неодобрительно отнесся к критике Арнольда, «ибо хорошо известно, что все имеющееся в книгах по физике о причине теплоты отнюдь недостаточно для того, чтобы хоть несколько осветить этот серьезный вопрос: поэтому усилия тех, которые над ним работают, неизменно заслуживают высокой похвалы»[26]. Сам Ломоносов ответил на критику «Рассуждением об обязанностях журналистов», в котором, между прочим, читаем: ...«журналист не должен спешить с осуждением гипотез. Они дозволены в философских предметах и даже представляют собой единственный путь, которым величайшие люди дошли до открытия самых важных истин. Это—нечто вроде порыва, который делает их способными достигнуть знаний, до каких никогда не доходят умы низменных и пресмыкающихся во прахе»[27].

---

[23] М. В. Ломоносов. Цит. соч., стр. 45.

[24] Пилярский. Материалы для биографии Ломоносова. СПб., 1865, стр. 782.

[25] См. Л. С. Минченко. Физика Эйлера. Труды ИИЕиТ АН СССР, т. 19. Изд-во АН СССР, 1957, стр. 221—270.

[26] М. В. Ломоносов. Сочинения, т. 8. Изд-во АН СССР, 1948, стр. 184.

[27] М. В. Ломоносов. Полн. собр. соч., т. III. Изд-во АН СССР, 1952, стр. 231.

К числу наиболее замечательных достижений Ломоносова относится его теория упругости воздуха. Прежде чем перейти к этой теории, необходимо остановиться на работе предшественника Ломоносова в этой области — Д. Бернулли, посвятившего теории упругости газов десятую главу своей «Гидродинамики» (1738). Бернулли совершенно ясно представляет, что упругость газа («упругость жидкости», по его терминологии) обусловлена ударами о стенки сосуда *движущихся* «чрезвычайно быстро в различных направлениях» частиц [28]. При сжатии газа его давление повышается «во-первых, вследствие того, что число частиц по отношению к пространству, в котором они заключены, становится теперь большим, и, во-вторых, вследствие того, что каждая частица чаще повторяет свой удар[29]. Далее Бернулли указывает, что «упругость воздуха повышается не только вследствие сгущения, но и вследствие увеличения теплоты, ибо известно, что всюду, где возрастает внутреннее движение частиц, теплота повышается; отсюда следует, что увеличение упругости воздуха, не изменяющего своего объема, дает основание предполагать повышение интенсивности движения частиц, что хорошо согласуется с нашей гипотезой [30].

Бернулли указывает, что давление будет расти пропорционально квадрату скорости. Однако расчет, произведенный Бернулли, имеет чисто геометрический характер. Он не учитывает механизма соударения, взаимодействий между молекулами, картины движения последних. В его расчетах не фигурируют ни масса, ни скорость молекулы, однако входит такая статистическая величина как *среднее* расстояние между молекулами $D - d$, где D — среднее расстояние между центрами молекул, d — диаметр молекул. В окончательной формуле появляется величина m, характеризующая объем конденсированного коллектива молекул.

Поэтому закон Бойля — Мариотта у него получается только в том случае, если $m = 0$, что выполняется для воздуха при обычном давлении и большом разрежении. Будет ли закон выполняться «для воздуха значительно более сгущенного, это я считаю еще недостаточно выясненным. Ведь до сих пор еще не было поставлено опытов с такой степенью точности, какая требуется в данном случае. Вся задача сводится к тому, чтобы определить значение m, но тем точнее следует эту задачу наладить и притом с воздухом чрезвычайно сжатым; степень же

[28] В сб. «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 15.
[29] Там же, стр. 16.
[30] Там же, стр. 17.

теплоты воздуха во время его сжатия должна тщательно поддерживаться неизменной»[31].

Итак, Бернулли вполне отчетливо представляет физические обстоятельства, при которых выполняется закон Бойля — Мариотта (неизменность числа частиц и температуры, не слишком большая степень «сгущения» газа), однако, как было уже сказано, использует чисто геометрические соображения, без анализа молекулярной механики.

Работа Ломоносова «Опыт теории упругости силы воздуха» отличается от всех предыдущих работ на эту тему именно тем, что автор ее выдвигает на первый план молекулярную механику; надо «рассмотреть две вещи: природу самих частиц и силу, которой они удаляются друг от друга»[32]. Здесь Ломоносов сразу же ставит вопрос — входит ли упругость в число свойств частиц или нет, и решает этот вопрос отрицательно. По мнению Ломоносова, частицы должны быть *атомами*, в смысле древних атомистов, т. е. должны быть «*лишены всякого физического сложения и организованного строения*»[33]. Они телесны, т. е. обладают массой и протяженны. Они имеют сферическую форму с шероховатой поверхностью, обусловливающей взаимодействие частиц при непосредственном контакте. Это взаимодействие необходимо, ибо сила упругости газа, по Ломоносову, «происходит от какого-то непосредственного взаимодействия его атомов»[34]. Это контактное взаимодействие должно обусловливать отталкивание: «отдельные атомы воздуха в беспорядочном чередовании сталкиваются с ближайшими через нечувствительные промежутки времени, и когда одни находятся в соприкосновении, иные друг от друга отскакивают и наталкиваются на ближайшие к ним, чтобы снова отскочить; таким образом, непрерывно отталкиваемые друг от друга частыми взаимными толчками, и они стремятся рассеяться во все стороны»[35].

Такова модель движения атомов, призванная объяснить упругость. Остается найти физическую причину отталкивания. Исходя из опытного факта, что упругость газов зависит от температуры, Ломоносов делает смелый вывод: «Взаимодействие атомов воздуха обусловлено только теплотою»[36]. Теплота же, по Ломоносову, «состоит во вращательном движении частиц горючего тела»[37]. Отсюда идея, что отталкивание обусловлено вза-

---

[31] В сб. «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 17.
[32] М. В. Ломоносов. Цит. соч., т. II, стр. 109—111.
[33] Там же, стр. 113.
[34] Там же.
[35] Там же, стр. 121.
[36] Там же.
[37] Там же.

имодействием соприкасающихся вращающихся частиц, взаимодействием, подобным взаимодействию волчков, которыми играют мальчики на льду. Модель Ломоносова позволяет ему не только интерпретировать закон Бойля — Мариотта, но и барометрический закон и зависимость упругости от температуры. Правда, Ломоносов не дает точного количественного расчета закона Бойля,ограничиваясь качественной картиной,но в «Добавлении» к своему «Опыту» ,в ответ на соображения Рихмана,прямо говорит, что у него есть сильное сомнение в справедливости закона Бойля. Ломоносов полагает, что отношение упругостей не совпадает с отношением плотностей при больших сжатиях. В частности, Ломоносов ошибочно объясняет разрыв бомбы при замерзании воды большой упругостью воздуха в пузырьках, имеющихся в воде при сильных сжатиях. Эта упругость возрастает потому, что при больших плотностях по мнению Ломоносова, возрастает вероятность столкновения между частицами.

Теория упругости Ломоносова — одна из интереснейших страниц физики XVIII в. Несмотря на известную наивность и грубость модели, основные идеи ее — взаимодействие вращательных моментов и «шероховатость» молекул — весьма замечательны. Основатели статистики ясно понимали, какую существенную роль играет «шероховатость» частиц. Абсолютно гладкие молекулы и стенки не дают статистики, так же как абсолютно гладкие шарики Ломоносова не дают необходимого отталкивания. Шероховатость же атомов обусловливает не только отталкивание, но и статистику направлений отталкивания: «отталкивательное действие будет чаще всего происходить по линиям, более или менее наклонным к горизонту, и, таким образом, сила упругости будет проявляться во все стороны»[38]

Однако общий характер физического мышления эпохи был феноменологическим. В моделях, правда, не было недостатка, но основная линия физики все же вела в сторону точного описания фактов. Линия эта диктовалась необходимостью; физика открывала новые и новые факты, интерпретация которых в механических образах становилась все более и более трудной. В особенности это относилось *к электрическим явлениям.*

Наэлектризованные тела внешне оставались теми же, что и ненаэлектризованные; и однако, они производили эффектные и поразительные действия. Электрическая искра указывала на какую-то связь между электричеством и «материей огня». В своих первых письмах Б. Франклин (1706—1790) прямо говорит об «электрическом огне», который можно извлечь из наэлектризованного тела с помощью острия. По мнению Франк-

[38] М. В. Ломоносов. Цит. соч., стр. 125.

лина, человек, стоящий на изолированной подставке и натирающий стеклянную трубку, передает ей часть своего электрического огня, в результате чего он оказывается наэлектризованным *отрицательно*, а трубка *положительно*.«Чтобы электризовать *плюс* или *минус*,— пишет Франклин,— требуется знать лишь только то, что части трубки или шара, которые натираются, притягивают в момент трения электрический огонь и, значит, забирают его из предмета, которым производится натирание; эти же самые части, как только прекратится натиран, стремятся отдать полученный ими огонь любому предмету с меньшим его количеством»[39].

Менее конкретно и более осторожно писал за два года до Франклина Рихман: «Электричество есть акцидентальное качество тел, посредством которого они притягивают другие, более легкие, приведенные в равновесие тела и отталкивают эти тела, наделенные слабым сцеплением после своего притяжения»[40]. Рихман, однако, склоняется к мысли, что электричество — род движения: «Нет сомнения, что электричество производится телесными силами и должно происходить от определенного движения некоторой тонкой материи в атмосферах тел, ибо все телесные перемены совершаются посредством движения, следовательно и эти»[41].

Замечательно, что Рихман (как и Ломоносов) высказал идею об измерении электрических сил с помощью весов. Рихман сконструировал первый электрометр — «электрический указатель» и с его помощью начал исследование электризации тел. Хотя здесь мы и не излагаем эсперимептов, однако следует упомянуть об опытах Рихмана по разряжению наэлектризованных тел. Заряд можно уменьшать последовательным контактом с неразряженными телами. Из этих наблюдений Рихман вывел следующее заключение: «Если электричество все время убывает, причем оказывается, что когда прикладывают тела большей массы, оно убывает больше, а когда прикладывают тела массы меньшей, оно убывает меньше, представляется вероятным, что сами носящиеся в воздухе корпускулы и прочие близкие к ним тела, способные заряжаться производным электричеством, влияют на убыль так, что это электричество распределяется равномерно между этими массами»[42]. В этом замечании опять-таки проскальзывает идея сохранения и перераспределения электричества.

---

[39] Б. Франклин. Опыты и наблюдения над электричеством. (Письмо II от 11 июля 1747 г.). Изд-во АН СССР, 1956, стр. 13.

[40] Г. В. Рихман. Труды по физике. Изд-во АН СССР, 1956, стр. 230.

[41] Там же, стр. 237.

[42] Там же, стр. 320.

В более поздних работах Рихман вполне отчетливо говорит о распределении электричества, его сохранении в изолированном теле; однако он не соглашается с Франклином в вопросе об отрицательном электричестве, «ибо мне очень трудно понять отрицательное электричество, если только не принять, как в механике, что движение материи в противоположном направлении есть движение отрицательное»[43].

В письме к Коллинсону от 29 июля 1750 г. Франклин со всей определенностью изложил свою теорию электрической субстанции. По Франклину, «электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц, так как она способна проникать в обыкновенную материю, даже в самые плотные металлы, с большей легкостью и свободой, как бы не встречая при этом сколько-либо заметного сопротивления»[44].

Эта электрическая материя, имеющая атомное строение, отличается от обычной материи и является по отношению к последней чем-то посторонним. «Электрическая субстанция отличается от обыкновенной материи в том отношении, что частицы последней взаимно притягиваются,а частицы первой — отталкивают друг друга... И хотя частицы электрической субстанции взаимно отталкивают друг друга, они сильно притягиваются всей прочей материей...; если массе обыкновенной материи любых размеров и протяженности придается какое-то количество электрической субстанции, то она мгновенно и равномерно рассредоточится повсюду. Таким образом, обыкновенная материя по отношению и к электрической жидкости является как бы своеобразной губкой»[45].

«Но в обыкновенной материи содержится (как правило) столько электрической субстанции, сколько она может заключать в себе. Если прибавить ей этой субстанции еще, то та разместится снаружи, на поверхности, и образует то, что мы называем электрической атмосферой: в этом случае говорят, что предмет наэлектризован»[46]. Электрическая жидкость Франклина удовлетворяет закону сохранения.

С помощью своей теории Франклин объяснил действие конденсатора, показав, что его обкладки электризуются разноименно, объяснил действие острия. В связи с этим последним у него возникла идея громоотвода, которую он иллюстрировал остроумной моделью: вращающееся коромысло весов, одна из чашек которых представляла заряженное облако, а другая — нейтральное, проходила над вбитым в пол молотком («здание»),

---

[43] Там же, стр. 293.
[44] Б. Франклин. Цит. соч., стр. 53.
[45] Там же, стр. 53.
[46] Там же, стр. 54.

и при прохождении наэлектризованной чашки наблюдалось притяжение последней молотком и даже проскакивала искра. Этого не происходило, если на конце молотка была укреплена игла. Доказательство электризации грозовых туч было дано Франклином в его знаменитом опыте со змеем, опыте, вызвавшем большой резонанс.

В России изучение атмосферного электричества проводили с большим успехом М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман. Заслугой Рихмана является применение им измерительного прибора («электрического указателя») в исследовании электрического состояния. Он впервые начал с помощью своего указателя изучать геометрию поля вокруг заряженных проводников различной формы. Трагическая смерть Рихмана 26 июля 1753 г. во время наблюдения грозы у «громовой машины» прервала его плодотворные исследования. Известие о его гибели поразило ученый мир и заставило подумать о необходимых предосторожностях при электрических опытах. Чешский священник Прокоп Дивиш (1696—1765) устроил в 1754 г. первый громоотвод. Ломоносов, готовивший вместе с Рихманом речь об атмосферном электричестве, выступил, несмотря на противодействие церковных кругов, с этой речью 25 ноября 1753 г. В ней он изложил свою оригинальную теорию электризации облаков вследствие наличия в атмосфере вертикальных воздушных течений. Гипотеза о существовании этих течений — лишнее доказательство проницательности Ломоносова. Отстаивая в своей речи взгляд на северные сияния как на явления электрической природы, Ломоносов указывал, что эти явления происходят на большой высоте; оценка этой высоты близка к современным данным. Отрицая дальнодействующие силы, Ломоносов полагал, что электрические явления заключаются в движении некоторой тонкой материи, по-видимому эфира. Эфир, по Ломоносову, является ареной световых, электрических, магнитных и гравитационных явлений. В этом воззрении на эфир, равно как и в отрицании дальнодействия, Ломоносов является прямым предшественником Фарадея. Эфирную теорию электрических явлений развивал также Эйлер.

Коллега Ломоносова по Петербургской Академии наук Франц Ульрих Теодор Эпинус (1724—1802) выступил в 1759 г. с трактатом «Опыт теории электричества и магнетизма». Этот трактат несомненно представляет значительную веху в истории электричества. Эпинус развивает унитарную теорию Франклина, распространяя ее и на магнитные явления. В обоих этих явлениях Эпинус усматривает глубокое сходство и предполагает их взаимную связь. Частицы как электрической, так и магнитной жидкости взаимодействует друг с другом отталкивательными силами «даже на значительном расстоянии».

Однако Эпинус оговаривается, что он, как и Ньютон, считает, что физические действия на расстоянии невозможны.

Хотя Эпинус не установил точного закона электрических сил, он открыл и объяснил многие факты. Ему принадлежит опыт с разборным конденсатором; он отметил влияние стекла на емкость конденсатора; он объяснил явление электрической индукции, открытое Рихманом и после него Кантоном и Вильке, открыл электрическую поляризацию, высказал мысль о колебательном характере разряда конденсатора, применил к исследованию поля «электрическую стрелку» (диполь), открыл пироэлектричество турмалина. Он экспериментально и теоретически исследовал картину силовых линий вблизи магнитов. Правда, Эпинус отрицал реальное значение силовых линий, он рассматривал их как формальный образ дальнодействующих сил. В отличие от Эпинуса, Эйлер считал эти линии картиной действительного движения магнитных истечений, предвосхищая будущие воззрения Фарадея.

В 1759 г. появилась дуалистическая теория Саймера, которая в конце концов победила унитарную теорию Франклина — Эпинуса и в преобразованном виде дошла до наших дней. На основе дуалистических представлений Кулон интерпретировал найденные им законы взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов, с открытием которых в теории электрических явлений наступил новый период.

Подведем краткие итоги развития физики в XVIII в. Физика завершила первый этап своего развития с начала научной революции, распространила экспериментальный метод на область тепловых и электрических явлений, широко применила математический анализ в механике. В области теоретической интерпретации физических явлений конкурировали две концепции: концепция формального описания на основе представления о скрытых агентах и концепция единого механического подхода ко всем явлениям на базе принципа сохранения материи и движения. Первая точка зрения в конечном счете оказалась господствующей, в результате чего природа оказалась расчлененной метафизическими перегородками на отдельные, не связанные друг с другом области; широкое распространение получили эмпиризм и формальное описание. Однако в целом XVIII в. подготовил почву для будущих попыток создания единой картины мира на основе закона сохранения и превращения энергии и концепцией атомов и эфира.

П. С. Кудрявцев

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Раздробленность физической картины мира, о которой говорилось в предыдущей главе, еще более усилилась в результате открытий Л. Гальвани и А. Вольта. Появились новые «флюиды» — «животное электричество», «гальвани-вольтовская жидкость», новые «силы» — сила тока, химическая сила и т. д. Физиологи говорили о «жизненной силе», регулирующей действия физических и химических сил. Огромное количество этих сил и флюидов запутывали физическую картину и являлись питательной средой как для самых фантастических философских спекуляций, так и для унылого эмпиризма.

Размежевание философии и опытного естествознания в первой четверти XIX в. было одной из характерных черт той духовной атмосферы, в которой возник великий принцип естествознания — закон сохранения и превращения энергии. Недаром один из основателей этого принципа Г. Гельмгольц (1821—1891) напомнил позже об этом размежевании: «Всем известно,— говорил Гельмгольц в 1855 г.,— что между нами (т. е. естествоиспытателями и философами.— *П. К.*) уже давно ведется ожесточенный спор, который недавно, казалось, замолк, но во всяком случае не потому, что одна партия убедила другую, а потому, что каждая сомневается в возможности убедить противную. Натуралисты охотно и громко хвалятся тем, что большие успехи естественных наук начались с того момента, когда они совершенно очистились от влияния натурфилософии»[1].

Гельмгольц полагает, что Кант и даже Фихте еще стояли «на вполне одинаковой почве с натуралистами», поскольку

[1] Г. Гельмгольц. Популярные речи, ч. II. СПб., 1899.

они принимали, что «познание существующего должно черпаться из опыта».

«Но спор разгорелся, когда после смерти Фихте Шеллинг стал господствовать над наукой в Южной, а Гегель — в Северной Германии. Недовольная уже положением, указанным ей Кантом, философия захотела открыть новые пути, чтобы найти, без помощи опыта, но путем чистого мышления, те конечные результаты, коих должны были достигнуть опытные науки. Она не отчаивалась обнять все высшие вопросы неба и земли, настоящего и будущего.

Враждебные отношения этих философских школ к научным основаниям естествознания особенно резко выразились в страстной, в высшей степени нефилософской полемике Гегеля и некоторых его учеников против Ньютона и его теории. Среди образованных людей Германии того времени интерес к философским наукам превосходил интерес к естественным наукам, вследствие чего последние казались побежденными»[2].

Ранее Гельмгольца, как раз в период открытия закона сохранения энергии, о той же ситуации говорил А. И. Герцен в «Письмах об изучении природы» (1845).

Но Герцен, который, по выражению Ленина, стоял «головой выше бездны современных естествоиспытателей-эмпириков и тьмы нынешних философов-идеалистов и полуидеалистов»[3], ясно понимал, что «философия без естествоведения так же невозможна, как естествоведение без философии». Открытия в естествознании,— хотели этого их авторы или не хотели,— вскрывали диалектику природы, подводили к идее о единстве мира, о всеобщей связи со Вселенной,о развитии в природе, о качественном изменении при количественных накоплениях и т. д. и т. п. Философы раньше естествоиспытателей пришли к выводу о наличии всеобщей связи явлений, об отсутствии непереходимых граней между неорганическим миром и органическим, о превращаемости различных «сил»; а именно эти идеи послужили отправным пунктом работ Майера и Гельмгольца.

Немалую стимулирующую роль в открытии закона сохранения и превращения энергии сыграла практика: техника и медицина. «В течение тысячелетий,— писал Майер,— человечество стремилось к разрешению всегда одной и той же задачи: привести в движение покоящуюся массу вспомогательными средствами неорганической природы, ограничившись почти исключительно применением данных механических эффектов. Новому времени выпало на долю к силам старого мира — движущемуся воздуху и падающей воде — присоединить еще

---

[2] Г. Гельмгольц. Популярные речи, ч. II. СПб., 1899, стр. 5.
[3] В. И. Ленин. Собр. соч., т. 18. Изд. 4. 1950, стр. 10.

одну новую силу. Этой новой силой, на действия которой с удивлением смотрят люди нашего столетия, является тепло»[4].

Когда работали только уаттовские малоэкономичные и малочисленные машины, то с ними имел дело сравнительно узкий круг специалистов. Но с появлением пароходов и паровозов положение существенно изменилось,— сотни тысяч людей смотрели с удивлением на эти чудеса тогдашней техники и многие из этих людей, вероятно, задавали себе вопрос: а что же движет эти сооружения? К числу этих людей принадлежал и врач Майер.

Что касается медицины, то как раз размышления о роли физических и химических сил в организме, о существовании или отсутствии таинственной жизненной силы, якобы регулирующей действие этих сил, явились исходным моментом и в работах Майера, и в работах Гельмгольца. Гельмгольц нашел связь между решением вопроса о жизненной силе и принципом невозможности perpetuum mobile, установленным еще механиками XVIII столетия. «К моему удивлению,— вспоминал Гельмгольц,— те авторитеты в физике, с которыми мне пришлось войти в соприкосновение, посмотрели на дело совершенно иначе. Они были склонны отвергать справедливость закона; среди той ревностной борьбы, какую они вели с натурфилософией Гегеля, и моя работа была сочтена за фантастическое умствование»[5].

Гельмгольц нашел поддержку только у молодых физиологов, прежде всего Э. Дюбуа-Реймона, который назвал его введение к сочинению о сохранении силы «историческим документом величайшей научной концепции всех времен»[6]. Непосредственный же учитель в области физики и друг Гельмгольца — Густав Магнус отнесся к работе холодно, хотя и переслал ее, по просьбе Гельмгольца, редактору журнала Annalen der Physik, Поггендорфу для опубликования. Поггендорф отказался опубликовать работу Гельмгольца ввиду ее теоретического характера. «Как я уже много раз делал это в аналогичных случаях,—писал Поггендорф Магнусу,— «Анналы» по необходимости публикуют прежде всего экспериментальные исследования и ты сам хорошо знаешь, как велика их масса на сегодняшний день»[7].

Но сами эмпирики недалеко ушли от метафизики. У них,

---

[4] Роберт Майер. Закон сохранения и превращения энергии. ГТТИ, 1933, стр. 98.

[5] Г. Гельмгольц. Публичные лекции, читанные в Императорском Московском университете в пользу Гельмгольцовского фонда. М., Изд. Моск. ун-та, 1892, стр. XVIII.

[6] Leo Königsberger. Hermann von Helmholtz, Bd I. Braunschweig, 1902, S. 68.

[7] Там же, S. 70.

как справедливо писал Герцен, были «свои маленькие привиденьица: это — силы, отвлеченные от действий, свойства, принятые за самый предмет, и вообще разные кумиры, сотворенные из всякого понятия, которое еще непонятно: exemlpi gratia — жизненная сила, эфир, теплотвор, жизненная материя и проч.»[8] Примером сил, «отвлеченных от всякого действия», явились силы, исходящие от постоянных магнитов, гравитирующих масс, наэлектризованных тел. Магнит мог без всякого видимого изменения создавать силу, притягивающую кусок железа, всякий раз, когда этот кусок попадал в его поле. Здесь сила как бы создавалась всякий раз из неисчерпаемого источника. Точно так же камень притягивался Землей без всяких видимых изменений своей природы и природы Земли. Обнаруженный Вольта факт возникновения контактной разности потенциалов на границе соприкасающихся разнородных тел казался явлением такой же природы: контакт являлся неисчерпаемым источником сил. Выступления Фарадея в 1840 г. против контактной теории знаменуют открытый переход естествоиспытателей новой формации на позиции сохранения и превращения «сил».

«В самом деле,— писал Фарадей в «Экспериментальных исследованиях»,— контактная теория допускает, что сила, способная преодолеть мощное сопротивление, например сопротивление проводников, хороших или дурных, через которые проходит ток, а также сопротивление электролитического действия, когда последним разлагаются тела,—что эта сила может, будто бы, возникнуть из ничего, что без всякого изменения действующей материи или без расхода какой-либо производящей силы может производиться ток, который будет вечно идти против постоянного сопротивления и может быть остановлен только (как в гальванической ванне) продуктами разрушения, нагромождающимися благодаря его действию на его же собственном пути. Это было бы поистине сотворением *силы*, и это не похоже ни на какую другую силу в природе. Мы имеем много процессов, при которых форма силы может претерпеть такие изменения, что происходит ясное *превращение* ее в другую. Так, мы можем превратить химическую силу в электрический ток или ток в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимную превращаемость теплоты и электричества, а опыты Эрстеда и мои собственные показывают взаимную превращаемость электричества и магнетизма. Но ни в одном случае, даже с электрическим угрем и скатом (1790), нет чистого сотворения силы; нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее»[9].

[8] А. И. Герцен. Соч., т. II. М., ГИХЛ, 1955, стр. 95.

[9] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. Изд-во АН СССР, 1951, стр. 150.

Фарадей ссылается на аналогичное высказывание Роджета в трактате о гальванизме 1829 г. Он приводит цитату из него, смысл которой заключается в том, что контактная теория приводит к вечному двигателю.

«Если бы все было иначе, — заканчивает Фарадей семнадцатую серию своих «Исследований», — чем оно есть на самом деле, и если бы теория контакта была истинна, тогда, как мне представляется, пришлось бы отвергнуть равенство причины и следствия. Тогда вечное движение также стало бы истиной; и было бы совсем нетрудно с помощью первого попавшегося электрического тока, полученного одним контактом, изготовить электромагнитный прибор, который по сути дела давал бы механические эффекты вечно»[10].

Принцип: «причина равна действию» был руководящим и в работах Майера. Его первая работа «О количественном и качественном определении силы» была послана в «Анналы» 16 июня 1841 г. и пролежала в письменном столе Поггендорфа до смерти последнего. Несмотря на незавершенность этой работы и, в частности, на неправильную меру уничтожаемого механического движения (mv), в этой работе видны черты гениальности. Здесь впервые в истории науки процессы перехода рассматриваются не как «уничтожение», а как превращение. Майер исходит из концепции существования некоторой неизменной в количественном отношении «первичной силы», т. е некоторого начального запаса энергии. Эта сила действует в направлении «уничтожения существующих разностей»[11],т. е. уменьшения запаса потенциальной энергии. Однако при выравнивании этих разностей силы не уничтожаются (энергия сохраняется); эти силы как причины изменения отношений снова восстановят существовавшую первоначальную разность. «Таким образом, принцип, согласно которому данные силы количественно неизменны, подобно веществам, логически обеспечивает нам продолжение существования разностей, а значит и материального мира. Мы примем поэтому, что как наука, занимающаяся изучением бытия веществ (химия), так и наука, изучающая вид бытия сил (физика), должна считать количество своих объектов неизменным и только качество их изменяющимся»[12].

Легко критиковать эту формулировку. Майер не различает первого и второго начала термодинамики и метафизически отрывает вещество от энергии («силы»).Но не в этом суть. Мысль

---

[10] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. Изд-во АН СССР, 1951, стр. 151.

[11] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М.—Л., ГТТИ, 1933, стр. 61.

[12] Там же, стр. 62.

о качественной превращаемости форм энергии при ее количественном сохранении здесь уже выражена вполне ясно.

Особенно замечателен пример Майера с соударением тел, приводящим к их остановке, когда происходит «нейтрализация» движения, по терминологии Майера, или «аннигиляция» механического движения, по современной терминологии. Майер понимает, что здесь на самом деле нет никакой «нейтрализации», а происходит преобразование одной формы энергии в другую.

Тогда «нейтрализованное движение О2МС, поскольку движение не происходит действительно в противоположных направлениях (т. е. удар неупругий.— *П. К.*), служит выражением для теплоты. Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, электричество представляют собою явления, которые измеряются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам» [13]. Заметим, что Майер для обозначения процесса «нейтрализации механического движения и превращения его в другие формы» ввел своеобразный операционный символ «О». Само движение он измеряет импульсом МС. Несмотря на ошибочность меры, принцип сохранения и превращения «сил» выражен здесь очень глубоко. Первой публикацией Майера по вопросу сохранения энергии была статья «Замечания о силах неживой природы», напечатанная в Annalen der Chemie und Pharmacie за 1842 г. Здесь мы видим, что Майер стремится более тщательно обосновать идеи сохранения («неизменности») сил, приводя количественные подсчеты. Майер прежде всего пытается внести ясность в понятие силы. Сила, по Майеру, это не свойство вроде силы тяжести или преломляющей силы, а причина, к которой применима аксиома: causa equat effectum (причина равна действию). «Силы суть... неразрушимые, способные к превращениям, невесомые объекты» [14]. Следовательно, у Майера «силы» или формы энергии характеризуются определенными субстанциональными свойствами и противостоят весомой материи как нечто от нее отличное и отдельное.

Несмотря на метафизический характер этого определения, оно, вследствие наличия в нем рациональной идеи сохранения «сил» при их превращениях, оказывается все же полезным, так как позволяет правильно подойти к анализу конкретных примеров. Первый пример, рассматриваемый Майером,— движение падающего груза. Этот пример теперь фигурирует во всех школьных учебниках физики. Майер критикует применение к тяжести термина «сила»: тяжесть это не сила, а свойство, и для падения тела необходимо его предварительное поднятие. Та причина, которая поднимает груз, это — сила. «Ее

[13] Там же, стр. 68 — 69.
[14] Там же, стр. 77.

действие, *поднятый груз*, есть, следовательно, также некоторая сила; выражаясь более обще, это значит: *пространственная разность весомых объектов есть сила;* так как эта сила обусловливает падение тел, то мы ее называем *силой падения*. Сила падения и падение, а еще общее — сила падения и движение, суть силы, которые относятся между собой как причины и действие, которые переходят друг в друга и являются двумя различными формами проявления одного и того же объекта» [15]. В такой форме выражен закон сохранения энергии для падающего тела, потенциальная энергия («сила падения») непрерывно превращается в кинетическую («движение») при сохранении первоначального запаса. В числовом подсчете у Майера ошибка: он кинетическую энергию измеряет через mv^2, а не $mv^2/_2$.

Затем Майер переходит к вопросу о превращении механического движения в теплоту. «Еще никогда не был поставлен серьезно опыт обнаружения действия прекращающегося движения»,— пишет он [16]. Такие опыты вскоре были поставлены Джоулем и привели его к установлению численного значения механического эквивалента теплоты. Вопрос о том, «как велико соответствующее определенному количеству силы падения или движения количество тепла» [17], поднимает и Майер. Он дает приблизительную оценку этого отношения (365 *кГм/кал*) на основании измерения теплоемкостей газов при постоянном давлении и объеме (уравнение, дающее разность этих теплоемкостей, известно теперь как уравнение Майера) и находит, что коэффициент полезного действия современных ему тепловых машин очень мал. Можно было бы «представить себе выгодный путь получения движения иным способом,— пишет Майер,— чем посредством использования химической разности между С и О, а именно — посредством превращения в движение электричества, полученного химическим путем» [18]. Задача непосредственного превращения химической энергии в электричество, минуя «сгорание», как известно, осуществляется в гальванических элементах.

В последующей работе «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845) Майер ставит перед собой грандиозную задачу охватить все известные в его время превращения энергии, раскрыть картину круговорота энергии в природе. Принцип сохранения он считает верховным принципом природы. «Ex nihilo nil. Nil fit ad nihilum». «*Количественная* неизменность данного есть верховный закон природы, распространяющийся

[15] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М.—Л. ГТТИ, 1933, стр. 78—79.
[16] Там же, стр. 81.
[17] Там же, стр. 85.
[18] Там же, стр. 86.

равным образом как на силу, так и на материю»[19],— пишет Майер, и его формулировка поразительно напоминает «всеобщий закон» Ломоносова. Задача исследования — конкретизировать этот закон. Майер дает меру кинетической энергии, потенциальной энергии поднятого груза, вычисляет механический эквивалент тепла, правильно оценивает электростатическую энергию заряженных тел и объясняет с энергетической точки зрения действие электрофора, намечает путь объяснения химической энергии («химических разностей»). Он дает следующую таблицу известных в его время форм энергии:

I	Сила падения	Механические силы, Механический эффект
II	Движение	
	А. Простое	
	Б. Волнообразное, вибрирующее	
III	Невесомые imponderabilia: Тепло	
	Магнетизм	
	Электричество	
IV	Гальванический ток	
V	Химическая разобщенность некоторых веществ	Химические силы
	Химическая связанность некоторых других веществ	

Обзор превращений сил, входящих в эту таблицу, Майер заключает общим выводом: «*при всех химических и физических процессах данная сила остается постоянной величиной*»[20]. При этом «невесомые» Майера перестают быть флюидами XVIII в. «Защищая alto voce для движения его право на бытие, его субстанциальность, мы безусловно должны отрицать вещественность теплоты и электричества», — пишет Майер [21]. Далее он переходит к круговороту земных энергетических превращений: «Солнце по человеческим понятиям является неисчерпаемым источником физической силы. Поток этой силы, проливающийся и на нашу землю, есть та непрестанно заводящаяся пружина, которая поддерживает в состоянии движения механизм всех происходящих на земле деятельностей»[22]. Аккумулятором солнечной энергии на земле являются *растения*. «Мир растений образует резервуар, в котором закрепляются

[19] Там же, стр. 92—93.
[20] Там же, стр. 127.
[21] Там же, стр. 130.
[22] Там же, стр. 131.

и накопляются в целях их использования быстро летящие солнечные лучи — источник экономических благ, с которыми неразрывно связано физическое существование человеческого рода и который вызывает инстинктивное восхищение в глазах каждого, созерцающего его богатство»[23].

«Растения поглощают одну силу — свет и порождают другую силу — химическую разность» [24] — так впервые в истории науки формулируется энергетика фотосинтеза. Решительно устраняя всякую «жизненную силу», Майер утверждает далее, *«что в жизненном процессе происходит лишь превращение вещества и силы, а отнюдь не их создание»*[25]. Энергетике живого организма и критике концепции «жизненной силы» Майер посвящает значительную часть своего сочинения. Эта часть является первой в истории науки попыткой рассмотреть физиологические процессы с энергетической точки зрения.

Майер не ограничился всеобъемлющим рассмотрением энергетики земных процессов. В сочинении «Динамика неба» он поставил вопрос об источнике энергии Солнца. В XIX в. этот вопрос не мог быть решен. Майер тем не менее высказал ряд замечательных идей. Это, во-первых, идея о силах приливного трения, тормозящих вращение Земли и, во-вторых, идея об уменьшении массы Солнца при излучении. Эта последняя идея нужна была Майеру для того, чтобы спасти свою гипотезу восполнения энергии Солнца за счет ударов метеоритов. Исторической заслугой Майера является то, что он впервые выдвинул трудную и важную проблему изучения процессов *превращения* энергии. Эта сторона деятельности Майера была высоко оценена Энгельсом, усматривавшим в *превращении* энергии положительное содержание закона сохранения энергии, тогда как количественное сохранение энергии является негативной стороной закона (не может уничтожаться, не может создаваться), оставляющей открытым вопрос: а что же может происходить?

Мейер выставил в качестве исходного принципа тезис древней материалистической философии: «из ничего ничего не бывает»; Гельмгольц же исходил из принципа неизменной причинности, действующей в природе. «Всякое изменение в природе должно иметь достаточное основание» [26]. Этот лозунг естествоиспытателей и философов XVIII в. Гельмгольц считает основным законом. «Ближайшие причины, которым мы подчиняем естественные явления, могут быть в свою очередь или неизменными или изменяющимися. В последнем случае тот же

[23] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М.—Л., ГТТИ, 1933, стр. 131—132.

[24] Там же, стр. 133.

[25] Там же, стр. 134.

[26] Г. Гельмгольц. О сохранении силы. ГИЗ, 1922, стр. 6.

закон (достаточного основания.— *П. К.*) принуждает нас искать другие причины этого изменения, и так далее до тех пор, пока мы не доходим до последних причин, которые, следовательно, в каждое время при одинаковых условиях вызывают одно и то же действие. Конечной целью теоретического естествознания и является, таким образом, разыскание последних неизменных причин в природе» [27].

В своих позднейших выступлениях Гельмгольц объяснил это положение в своей работе влиянием Канта. Но мы усматриваем здесь прямую и логическую связь с воззрениями философов и естествоиспытателей XVIII в., в особенности с воззрениями Эйлера и Ломоносова. Последний особенно отчетливо и последовательно проводил в своей научной системе идею отыскания последних «неизменных причин», в качестве которых прежде всего выступают законы сохранения. Без этих законов немыслима была бы никакая научная система, в хаосе непрерывных изменений невозможно было бы отыскать никакой точки опоры. Как бы презрительно ни относились эмпирики к «метафизическим» соображениям, несомненно, что без признания объективных постоянных законов, действующих в природе, и прежде всего законов сохранения, никакая физика не была бы возможна. Именно это и утверждает Гельмгольц, говоря:

«Здесь не место решать, могут ли в настоящее время в действительности все процессы быть сведены к таковым причинам, и может ли, таким образом, природа быть понята вполне или же в ней имеются изменения, которые исключаются из действия закона необходимой причинности, которые, следовательно, попадают в область произвола, свободы; *во всяком случае ясно, что наука, задача которой состоит в понимании природы, должна исходить из предположения возможности этого понимания*» [28] (курсив мой.— *П. К.*).

Сочинение Гельмгольца, однако, отличается от работ Майера специфически механическим подходом к закону сохранения. «Материя как таковая,— пишет Гельмгольц,— не может испытывать никаких иных изменений, кроме пространственных, то есть кроме движения» [29]. В этом отношении Гельмгольц действительно возвращается назад к естествоиспытателям XVIII в. Вместе с тем, также в отличие от Майера, Гельмгольц признает, что материя без сил не может существовать. «Ясно, что понятия материи и силы в применении к природе никогда не могут быть отделены друг от друга». По мнению Гельмгольца, материя и сила «являются скорее отвлечениями

[27] Там же, стр. 6.
[28] Там же.
[29] Там же.

от действительности, образованными совершенно одинаковым образом; мы можем воспринимать материю только благодаря действию силы, а не материю в себе самой» [30].

Эта концепция Гельмгольца имеет важное значение для всей его теории. Он утверждает, что «явления природы должны быть сведены к движениям материи с неизменными движущими силами, зависящими в своем действии только от пространственных взаимоотношений» [31]. Но тогда закон сохранения энергии следует сам собой, как интеграл уравнений механики, в которые входят силы, определяемые только пространственной конфигурацией точек системы.

Для этих консервативных сил Гельмгольц выводит интеграл живых сил, выражающий сохранение кинетической энергии и потенциальной (у Гельмгольца — «живых сил» и «напряженных сил»). «*Всегда сумма существующих в системе напряженных сил и живых сил постоянна.* В этой наиболее общей форме мы можем наш закон назвать *принципом сохранения сил*»,— пишет Гельмгольц. Разумеется, эта формулировка не является наиболее общей, и заслуга Гельмгольца заключается не в этой формулировке, известной в той или иной форме механикам XVIII столетия, и даже Галилею и Гюйгенсу, а в понимании им универсальности этого закона и в рассмотрении им многочисленных примеров из области учения о колебаниях и волнах, теплоте, электрохимии, электродинамики. Особенно важно теоретическое предсказание Гельмгольца о колебательном характере разряда конденсатора, подтвержденное экспериментально и теоретически уже во второй половине XIX в. (Феддерсен, В. Томсон).

Деятельность знаменитой «триады» — Майер, Гельмгольц, Джоуль — не могла обеспечить сразу признания нового закона. Потребовалась напряженная работа экспериментаторов и теоретиков, чтобы принцип получил надлежащее развитие и всеобщее признание. Немало затруднений представляла двусмысленность термина «сила», пока, по примеру Ранкина, не вошел во всеобщее употребление термин «энергия».

---

[30] Г. Гельмгольц. О сохранении силы. ГИЗ. 1922, стр. 7.

[31] Там же.

П. С. Кудрявцев

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И АТОМИСТИКИ

Открытие закона сохранения и превращения энергии имело для физики неисчислимые последствия. Гельмгольц, указывая, что цель его сочинения «О сохранении силы» заключалась в том, чтобы «представить физикам в возможной полноте теоретическое, практическое и эвристическое значения этого закона»,т. е. закона сохранения энергии, справедливо полагал, что полное подтверждение этого закона «должно быть рассматриваемо, как одна из главных задач ближайшего будущего». Но эта задача, помимо подтверждения закона сохранения энергии, приводила к развитию этого закона и его обогащению новым и новым содержанием. Физика обогащалась познанием новых форм энергии и новыми методами научного исследования.

Исторически прежде всего предметом изучения стала теплота как форма движения. Возможность сведения тепловой меры (калория) к механической (килограммометр) рассматривалась как доказательство механической природы теплоты, и поэтому та часть физики, в которой тепловое явление рассматривалось с точки зрения закона сохранения энергии получила название механической теории теплоты, а сам закон сохранения энергии в применении к теплоте стал называться первым началом механической теории тепла. Систематическую разработку механической теории тепла начал немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822—1888) статьей «О движущей силе теплоты», опубликованной в 1850 г.

Результатом этой работы явилось понимание того, что в математической теории процессов, связанных с выделением тепла и затратой работы, существенную роль играет некоторая функция, которую Клаузиус назвал «эргалом», а мы называем внутренней энергией. Функция эта обладает тем свойством, что в любой замкнутой системе алгебраическая сумма работы, совершённой системой, и выделенной теплоты не зависит от способа

перехода из начального состояния в конечное, а определяется разностью значений этой функции в начальном и конечном состояниях системы. Как совёршенная или поглощенная системой работа, так и выделенная или поглощенная ею теплота будут зависеть от способа перехода; алгебраическая же сумма их не зависит от такого способа. Сумма бесконечно малых приращений работы и тепла, полученных системой, является полным дифференциалом внутренней энергии. Этот факт открывает широкие возможности для получения конкретных выводов относительно связей, существующих между величинами, характеризующими термические и механические свойства системы. Отсюда берет начало термодинамический метод исследования физических связей и процессов.

Однако механическая теория тепла не могла быть построена только на первом начале. Первое начало не налагает никаких ограничений на возможность перехода тепла в работу и обратно. Теплота и работа, согласно первому началу, вполне эквивалентны друг другу: 1 *ккал* эквивалентна 427 *кГм* работы. Но, как мы уже говорили, превращение теплоты в работу подвержено ограничениям, что находит свое яркое выражение в низком коэффициенте полезного действия тепловых машин. Этот факт привлек внимание Сади Карно (1796—1832), изучавшего условия превращения тепла в работу и показавшего, что непременным условием такого превращения является разность температур; доля же превращенного в работу тепла будет тем больше, чем больше разность температур. Исследования Карно в то время не привлекли внимания; только в 1834 г. Клапейрон (1799—1864)разработал теорию обратимого кругового процесса Карно, а спустя почти 20 лет после Клапейрона к принципу Карно обратились в 1850 г. Клаузиус и в 1849—1851 гг. В. Томсон, показавшие, что этот принцип является не следствием первого начала, а самостоятельным законом природы, получившим название второго начала механической теории тепла, или, по современной терминологии,— второго начала термодинамики.

Этим началом устанавливается направленность процессов, происходящих в замкнутой системе. Все процессы могут быть разделены на два класса: обратимые, протекающие при полном обращении условий по тому же пути, по которому шел процесс в прямом направлении, но с обратным знаком,и необратимые, для которых такое обращение невозможно. Уравнения механики допускают полную обратимость механических процессов, однако в действительности процессы сопровождаются необратимыми изменениями, прежде всего необратимым процессом перехода работы в тепло. Клаузиус (1859) придал этому началу математическую формулировку, введя вторую функцию состоя-

ния — *энтропию*. Дифференциал этой функции равен отношению бесконечно малого количества тепла, полученного системой при обратимом процессе, к абсолютной температуре, при которой происходило сообщение теплоты. Функция эта обладает тем свойством, что во всякой замкнутой системе изменения состояния происходят таким образом, что энтропия системы либо не меняется (в случае обратимых процессов), либо возрастает (при необратимых процессах). Система приходит в состояние *термодинамического равновесия*, когда энтропия достигает максимума. Используя первое и второе начала термодинамики, можно получать разнообразные соотношения, определяющие термодинамическое равновесие системы, а также связи между различными величинами, характеризующими термодинамические свойства системы. Получение таких соотношений и составляет задачу *термодинамики*, метод которой отличается необычайной общностью и мощностью.

В трудах Гельмгольца, Дюэма и особенно Гиббса (1839—1903) термодинамика получила широкое развитие. Были введены новые термодинамические функции — свободная энергия, энтальпия, термодинамический потенциал,— в результате введения которых термодинамический метод обогатился и нашел применение в обширном круге физических и химических явлений. Следует особо отметить заслуги Джошуа Вилларда Гиббса, применившего термодинамику к рассмотрению равновесных состояний термодинамических систем с произвольным числом компонент и фаз (1878—1879). Существенное расширение термодинамики было сделано Л. Больцманом (1844—1906) и Б. Б. Голицыным (1862—1916), применившими ее к тепловому излучению.

После этих работ первоначальное название термодинамики: «механическая теория тепла» утратило всякий смысл. Но пока она именовалась так, естественно, возникал вопрос об истолковании теплоты как формы механического движения. Физика в этом вопросе пошла по пути, гениально предугаданном Ломоносовым еще в XVIII в. В XIX в. к этому вопросу вернулся один из основоположников закона сохранения энергии Дж. Джоуль. В 1848 г. на собрании членов Манчестерского философского общества он сделал доклад, опубликованный в 1851 г. в мемуарах общества под заглавием «Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей». Отправляясь от своих первых опытов по превращению работы тока в теплоту, Джоуль пришел к выводу, который он назвал «совершенно ясным», «что теплота и механическая сила обратимы одна в другую, и, следовательно, стало очевидным, что теплота является либо vis viva (живой силой) весомых частиц, либо некоторым состоянием притяжения или отталкивания, способным порождать

vis viva (живую силу)» [1]. Далее он говорит о своих опытах по определению механического эквивалента теплоты и изменения температуры при сжатиях и расширениях газов. Эти последние опыты «показывают, что теплота упругих жидкостей представляет собою ту механическую силу, какой они обладают; а если известно, что температура газа определяет упругую силу, то отсюда следует, что упругая сила, или давление, должна представлять эффект движения частиц, из которых составлен всякий газ» [2].

Переходя к конкретной модели этого движения, Джоуль упоминает о гипотезе Дэви, согласно которой упругость газов обусловлена вращением их частиц. «Я лично попытался показать, что вращательное движение, аналогичное описанному сэром Дэви, способно объяснить закон Бойля — Мариотта, а также и другие явления, представляемые упругими жидкостями»,— пишет Джоуль [3]. Джоуль не знал, что он шел по пути Ломоносова, который за сто лет до него показал, что закон Бойля — Мариотта объясняется гипотезой вращательного движения частиц. В данной работе, однако, Джоуль воспользовался более простой гипотезой Джона Герапата о поступательном движении частиц, высказанной последним в 1821 г.

В 1856 г., т. е. через пять лет после работ Джоуля, появилась статья Крёнига «Очерки теории газов». Это побудило Клаузиуса выступить с работой «О природе движения, которое мы называем теплотой», опубликованной в «Annalen der Physik und Chemie» и «Philosophical Magazine» в 1857 г. Здесь Клаузиус сослался на Джоуля и высказал пожелание, чтобы его статья была напечатана в более распространенном органе, чем «Мемуары Манчестерского общества». Статья Джоуля была перепечатана в «Philosophical Magazine» в том же году. С этого времени кинетическая теория газов начинает развиваться полным ходом. Появился интерес к истории вопроса. В более поздней публикации, в своей классической книге «Исследования по механической теории тепла» Клаузиус делает историческое примечание, в котором указывает истоки кинетической теории у Лукреция, Гассенди, Парана, Германа, Д. Бернулли и Лессажа. Однако он ничего не говорит о Ломоносове, хотя работы последнего по теплоте и упругости газа были опубликованы в одном из ведущих научных журналов XVIII в.

В работе Клаузиуса был дан молекулярно-кинетический вывод законов идеального газа, была установлена связь средней квадратичной скорости движения молекул с температурой. Клаузиус не только подтвердил и уточнил выводы своих пред-

[1] Сб. «Основатели кинетической теории материи». ОНТИ, 1937, стр. 34.
[2] Там же, стр. 35.
[3] Там же, стр. 36.

шественников, но и ввел новую важную характеристику молекулярного мира — длину свободного пробега. В 1859 г. на заседании Британской ассоциации в Абердине с докладом о динамической теории газов выступил Дж. Максвелл (1831—1879). Максвелл понял, что кинетическая теория газов является полем приложения нового подхода к физическим явлениям, и дал в своей работе первые образцы такого метода. Метод этот основан на сочетании принципов механики с законами теории вероятности. Для пояснения сущности такого метода Максвелл разработал модель, согласно которой газ состоит из неопределенного количества малых твердых и совершенно упругих шаров, действующих друг на друга только во время столкновения. «Если окажется,— говорит Максвелл,— что качества подобной системы тел соответствуют свойствам газов, то этим будет создана важная физическая аналогия, которая может привести к более правильному пониманию свойств материи» [4].

Максвелл установил, что в результате взаимных столкновений в системе устанавливается некоторое стационарное распределение скоростей частиц — максвелловское распределение, не изменяемое последующими столкновениями. Хотя вывод Максвелла и не безупречен, полученный им результат имел огромное значение, показав, что состояние равновесия системы получается в результате большого числа беспорядочных взаимодействий между частицами. Кроме этого, Максвелл рассмотрел механизм внутреннего трения и диффузии газов. Следуя примеру Максвелла, Больцман (1844—1906), а затем Гиббс разработали основы *статистической механики*.

Возникновение статистической механики помогло разрешить трудность, с которой столкнулась механическая теория теплоты при попытке механического истолкования второго начала. Уравнения механики обратимы, тогда как во втором начале термодинамики постулируется односторонний характер процессов в замкнутой системе, идущих в направлении возрастания энтропии. Для обратимых процессов второй принцип может быть сформулирован в виде некоторого математического постулата, а именно: существует интегрирующий делитель для бесконечно малого приращения теплоты. Венгерский физик Чили, а за ним Клаузиус в течение 1871—1876 гг. опубликовали работы, в которых сделали попытку связать второе начало с принципом наименьшего действия. С помощью гипотезы квазипериодического движения они получили уравнение, в котором роль интегрирующего делителя играет среднее значение кинетической энергии. Из соображений кинетической теории газов следует, что средняя кинетическая энергия молекул пропорциональна абсолютной температуре, и, таким образом,

[4] Сб. «Основатели кинетической теории материи». ОНТИ, 1937, стр. 187.

уравнение Чили — Клаузиуса совпадает с формулировкой второго начала.

Обстоятельные исследования применимости принципа наименьшего действия к термодинамическим и другим физическим процессам провел Гельмгольц. Он обратил внимание на аналогию так называемых циклических систем с термодинамическими системами. Термодинамическая система может быть охарактеризована двумя родами координат: скрытыми неконтролируемыми координатами, характеризующими состояние молекул системы, и явными, контролируемыми. Изменение координат первого вида происходит непрерывно и, вообще говоря, не вызывает изменения состояния тела как целого. Если телу сообщается энергия, идущая на изменение этих скрытых неконтролируемых координат, то она будет теплотой; энергия же, идущая на изменение контролируемых координат, является работой.

Гельмгольц называет систему моноциклической или полициклической, если в ней содержится одно или несколько замкнутых движений соответственно одной или нескольким циклическим координатам, которые не входят в выражение энергии. В дальнейшем предполагается, что между отдельными такими системами действуют только консервативные силы и изменение состояния системы происходит с бесконечно малой скоростью. «Главный интерес таких исследований,— писал Гельмгольц в своей первой статье, посвященной статике моноциклической системы,—состоит в том, что тепловые движения, по крайней мере в их наблюдаемых внешних действиях, также обнаруживают существенные особенности моноциклической системы и что именно ограниченная способность превращения эквивалентной работы, которая переходит в форму теплоты, имеет место при определенных условиях также для моноциклической системы»[5]. И действительно, Гельмгольц получил из уравнений Лагранжа для моноциклической системы как формулировку второго начала, так и выражение для свободной энергии.

Больцман получил те же результаты, что Клаузиус и Гельмгольц, идя своим путем, путем широкого применения атомистики. Уже в 1866 г. 22-летний Больцман пробует свои силы в трудной задаче механического истолкования второго начала термодинамики. Он начинает с уточнения понятий температуры и определяет ее как величину, пропорциональную средней кинетической энергии движения молекул. Постулируя, что движение молекул в конце концов замыкается, так что спустя определенный промежуток времени молекула оказывается вновь в исходном состоянии, он приходит к формулировке второго начала термодинамики, аналогичной более поздней

[5] H. Helmholtz. Wissenschaftliche Abhandlungen, III, 1895, стр. 119—120.

формулировке Чили — Клаузиуса, на что он сам указывает в своей статье в 1871 г. С этого года Больцман упорно и напряженно разрабатывает проблемы кинетической теории газов и статистического истолкования проблемы теплового равновесия. Вершиной этих работ явилось открытие знаменитой H-теоремы. Метод Больцмана заключается в том, что наряду с данным состоянием системы он рассматривает возможные ее состояния, так сказать, копии действительной системы, называемые эргоденами, и рассматривает одновременно множество этих систем — эргоденное множество. Задача заключается в том, чтобы найти закон распределения состояний в эргоденном множестве и найти наивероятнейшее состояние. Этот закон задается некоторой функцией H, обладающей тем свойством, что она уменьшается в результате столкновений между молекулами газа и принимает стационарное значение для состояния теплового равновесия молекул, распределенных по закону Максвелла — Больцмана. Это свойство функции H меняться односторонним образом при неупорядоченном движении молекул сближает ее с энтропией.

Заслуга Больцмана состоит в том, что он, связав функцию H с энтропией, впервые дал трактовку второго начала как вероятностного, статистического закона, «который оправдывается в явлениях только постольку, поскольку все тела состоят из чудовищно большого числа молекул» (Лоренц). Интерпретация второго закона оказалась статистической: тем самым, как правильно подчеркивал Лоренц, Больцман «вышел за пределы классической термодинамики. Последняя может определить энтропию только для систем, находящихся в неизменном состоянии, а также для систем, состоящих из различных фаз, каждая из которых, рассматриваемая отдельно, находится в стационарном состоянии, хотя они могут и не находиться в равновесии друг с другом. Если же определить величину — H как энтропию, то со словом энтропия будет соединяться ясное понятие и тогда, когда внутреннее состояние газа нестационарно. Здесь снова обнаруживается превосходство атомистики над феноменологической теорией, как можно назвать термодинамику»[6]. Больцман был также одним из пионеров приложения термодинамики к излучению. Об этом будет сказано ниже, после изложения электромагнитной теории света. Работами Больцмана по теории излучения, Б. Б. Голицына — по теории диэлектриков и излучения, Гельмгольца — по термодинамике гальванического элемента, Гиббса — по фазовым превращениям, Планка — по теории растворов было положено начало превращению термодинамики из механической теории тепла в универсальную теорию.

[6] H. A. Lorentz. Collected Papers, v. IX. 1939, p. 382.

П. С. Кудрявцев

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Начало XIX столетия ознаменовалось тремя открытиями, сыгравшими важную роль в эволюции физических воззрений: первое — это открытие вольтова столба, второе — открытие принципа интерференции в оптике и третье — открытие электромагнетизма.

В истории концепции поля исключительное место занимает развитие волновой оптики. Усвоение физиками волновых представлений означало достижение ими уровня зрелости физического мышления. Трудно, даже невозможно вообразить себе современную физику без этих представлений. Физика обязана внедрением их знаменитому английскому ученому Томасу Юнгу (1773—1829) и гениальному Френелю (1788—1827).

Юнг восстанавливает идеи Эйлера и Ломоносова о свете как процессе в эфире. Любопытно, что аргументы в пользу существования эфира он берет не из оптики, а из электрических явлений [1], и, подобно Ломоносову, думает о влиянии электрического поля на показатель преломления. «До сих пор,— пишет Юнг,— я, однако, не был в состоянии наблюдать, что преломляющая сила жидкости претерпевает какие-либо изменения под действием электричества» [2].

Но ни Ломоносов, ни Эйлер не рассматривали собственно волновых явлений и прежде всего интерференции. Заслуга введения принципа интерференции в оптику принадлежит Юнгу. Принцип интерференции — это принцип суперпозиции волновых движений, высказанный еще Эйлером. Но в отличие от

[1] См. Л. С. Полак. Из истории волновой теории света. Вопросы истории естествознания и техники, вып. 2, 1956, стр. 77

[2] Там же, стр. 77.

Эйлера, Юнг принимает во внимание *фазовые соотношения*, и результат суперпозиции определяется этими последними. Юнг первый оценил важность понятия длины волны в оптике и впервые определил эту величину не только для видимых лучей, но и для ультрафиолетовых лучей, открытых незадолго до этого Риттером. Юнг понял и значение когерентности, указав, что интерферирующие лучи должны исходить из одной и той же точки и идти до точки встречи различными путями. В таком случае результат интерференции определяется разностью хода лучей (в половинах длин волн).

Смелая идея Юнга, приводившая, как казалось, к парадоксальному результату, что светом можно погасить свет, поразила современников. Однако ее успеху препятствовала не только эта парадоксальность. Юнг не сомневался в близкой аналогии эфира и газа, света и звука. Но в 1808 г. Малюс открыл поляризацию света при отражении. Вслед за этим последовали открытия хроматической поляризации и вращения плоскости поляризации, открытие двухосных кристаллов, открытия, создававшие непреодолимые затруднения для теории продольных волн. Лаплас предложил математическую теорию распространения света в анизотропных средах, исходя из корпускулярных представлений; волновая же теория ничего равноценного дать не могла. Ее участь казалась решенной; предполагалось, что в ближайшем будущем корпускулярная теория справится с задачей объяснения дифракции и тогда ее триумф будет полным. Но объяснение дифракции принесло триумф волновой теории.

Начиная с 15 октября 1815 г. О. Френель представляет Парижской Академии наук свои оптические мемуары, совокупность которых образует экспериментальную и теоретическую основу классической волновой оптики. Френель использует для теоретического объяснения фактов геометрической и волновой оптики принцип Гюйгенса. Однако он делает существенное дополнение к первоначальной формулировке Гюйгенса, а именно — допущение об интерференции пучков, посылаемых отдельными участками волнового фронта. Законы отражения и преломления геометрической оптики получаются для *полированных* отражающих и преломляющих поверхностей как результат этой интерференции; вторичные волны погашают друг друга всюду, кроме направлений, определяемых законами геометрической оптики.

Для расчета действия волновой поверхности Френель применяет метод зон, который дает ему возможность объяснить прямолинейное распространение света и отступления от этого прямолинейного распространения при наличии препятствий (дифракцию). Метод Френеля представляет собой первое приближение точной теории дифракции, хотя и дает неправильную фазу

распространяющейся свободно волны и не объясняет отсутствия обратной волны. Эти недостатки метода были позже исправлены Кирхгофом, давшим математический прием замены действия волновых источников действием по поверхности, окружающей эти источники; при этом для однозначности этого действия (т. е. отсутствия обратной волны) необходимо было знать не только значения волновой функции на этой поверхности, но и значения скорости ее изменения, как это было показано еще Эйлером для одномерной задачи.

Несмотря на несовершенство своего метода, Френелю удалось с необычайной прозрачностью объяснить ряд дифракционных и интерференционных явлений. Но перед волновой теорией сейчас же встала задача — объяснить явления поляризации, и в частности интерференционные явления в поляризованных лучах (хроматическую поляризацию). Френель решил эту задачу с гениальной смелостью: он ввел гипотезу о *поперечности* световых волн.

Эта идея Френеля по ее революционному характеру может быть сравнима только с гипотезой Планка о квантовании излучения. Она сразу поставила физику эфира перед массой запутанных и противоречивых проблем, на решение которых потратили немало усилий и остроумия крупнейшие физики XIX столетия. Необходимо было, во-первых, совместить гипотезу поперечных волн с механически допустимыми свойствами эфира. Как показало развитие оптики, эта задача оказалась неразрешимой. Необходимо было далее решить вопрос, в какой же плоскости совершаются световые колебания линейно поляризованной волны: в плоскости поляризации или перпендикулярной к ней. Френель с присущей ему гениальной интуицией решил этот вопрос в пользу второй гипотезы. Надо было затем решить вопрос о взаимоотношении эфира и вещества, и решить его так, чтобы получились правильные соотношения для отраженной и преломленной волн, а также для движущихся тел. И, наконец, надо было построить теорию распространения света в движущихся средах.

Френель блестяще справился со всеми трудностями. В основе его теории поперечных волн лежал опытный факт: лучи света, поляризованные во взаимно-перпендикулярных направлениях, не интерферируют. Далее он ввел гипотезу, что в веществе плотность эфира изменяется (эфир сгущается), а Стокс и Рэлей показали, что гипотеза Френеля — единственная физически допустимая гипотеза в рамках упругой теории эфира.

Предположив затем, что на поверхности раздела живая сила падающего света равна сумме живых сил отраженной и преломленной волны и что на той же поверхности существует непрерывность движения, Френель получил соотношения между

амплитудами преломленной и падающей волны, отраженной и падающей волны как для колебаний, перпендикулярных плотности падения, так и для колебаний, параллельных этой плотности. Эти соотношения вошли в науку под названием формул Френеля. Из этих формул он вывел теорию полного внутреннего отражения, причем впервые в истории физики для описания физических процессов Френель ввел *комплексные числа* и показал их полезность для описания фазовых соотношений.

Наконец, гипотеза неизменной упругости и изменяемой плотности эфира в соединении с принципом сохранения его массы привела Френеля к замечательному следствию о частичном увлечении эфира движущимися телами и к формуле для коэффициента этого увлечения, формуле, блестяще подтвердившейся в последующих опытах Эри, Физо и Майкельсона. Этот вывод Френеля сыграл важную историческую роль в электродинамике движущихся сред, усугубив ту коллизию, которая была разрешена принципом относительности Эйнштейна.

Не менее важные результаты были получены Френелем в теории распространения света в анизотропных средах. Правда, здесь ему пришлось поступиться принципом неизменной упругости и ввести чисто интуитивным путем представление о тензорном характере упругих свойств, описываемых эллипсоидом упругости. Построенная Френелем волновая поверхность в двухосных кристаллах дала возможность Гамильтону сделать одно из замечательнейших в истории теоретической физики предсказаний, а именно предсказание явления конической дифракции, найденного по расчетам Гамильтона Ллойдом. Это была блестящая победа волновой теории света. Несмотря на эти успехи,— а может быть, благодаря им,— волновая теория света, базирующаяся на представлении об упругом эфире, вступила после работ Френеля в трудную фазу. Теории и модели эфира сменяли друг друга и сходили со сцены, не сумев до конца разрешить проблемы, связанные с непротиворечивым механическим описанием волновых процессов в эфире. Однако они сыграли свою историческую роль, подготовив почву для электромагнитной теории света Максвелла.

Непосредственным и ближайшим источником этой теории явились открытия и воззрения М. Фарадея (1791—1867), а они в свою очередь сложились в обстановке, созданной открытием вольтова столба и последующим открытием электромагнетизма (Эрстед, 1820). Уже Эрстед понял вихревой характер магнитного поля вокруг тока, а Фарадей прямым экспериментом обнаружил «электромагнитные вращения». Но несмотря на то, что магнитное поле тока резко отличалось по своему характеру от полей, создаваемых источниками и изучаемых в теориях тяготения, электростатики и магнитостатики, основатели

математической теории электромагнетизма Лаплас, Био, Савар и особенно Ампер стали искать пути применения аппарата, созданного для теории центральных сил, к электромагнетизму. У Ампера основанием для этого явилась найденная им эквивалентность кругового тока магнитному листку, впоследствии использованная и Максвеллом при построении им своей теории. Но эквивалентность эта не полная. Магнитное поле листка выводится из однозначного потенциала, испытывающего скачок на поверхности листка. Потенциальная функция поля кругового тока многозначная, а пространство, окружающее такой ток, двухсвязное: имеется две группы контуров, несводимых друг к другу; для одних циркуляция магнитных сил равна нулю, а для других эта циркуляция не равна нулю. Ампер в своей теории отказался от представления о магнитных полюсах и, следовательно, от магнитных листков; он начал разрабатывать динамику токов. В основу этой динамики он положил найденный им путем некоторой математической экстраполяции действительных и воображаемых опытов с замкнутыми токами закон взаимодействия *элементов тока*. Само собой разумеется, что этот закон был в духе тогдашних концепций дальнодействующих сил, законом *мгновенного* дальнодействия. Ампер стал, по выражению Максвелла, «Ньютоном электричества».

И все же электродинамические силы не были ньютоновскими силами. Они не удовлетворяли третьему закону Ньютона, который выполняется только для равнодействующей этих сил, для замкнутых токов, равно как и для взаимодействия таких токов с магнитами. Это противоречие электродинамики основным принципам механики Ньютона, как оказалось, не было случайностью. Законы электродинамики не сводились к законам механики. Вероятно, раньше всего это понял Фарадей. Он увидел в электромагнитных взаимодействиях образы *поля*, образы сложных связей, не исчерпывающихся механическими представлениями дальнодействующих сил. Поиски доказательства двустороннего характера связи электричества и магнетизма, предпринятые Фарадеем еще в 1821 г., увенчались успехом в 1831 г. Им была открыта электромагнитная индукция. Замечательно, что сделав это открытие, Фарадей сразу же смог сформулировать физическим языком содержание первых двух уравнений, которые были написаны Максвеллом тридцать с лишним лет спустя и получили название максвелловых уравнений.

Приводим эту формулировку Фарадея, написанную им в первой серии его «Экспериментальных исследований по электричеству». После объяснения эффекта Араго Фарадей пишет: «118. Все эти результаты доказывают, что способность индуцировать токи проявляется по окружности вокруг магнитной

равнодействующей или силовой оси точно так, как расположенный по окружности магнетизм возникает вокруг электрического тока и им обнаруживается» [3].

На математическом языке это означает, что «способность индуцировать токи», или индукционная э. д. с. $\mathscr{E}$ выражается интегралом по контуру, охватывающему магнитный поток Ф. В соответствии с результатами, полученными впоследствии Ленцем и Нейманом, она может быть выражена уравнением

$$\mathscr{E} = \oint E_l \, dl = -k \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Точно так же «расположенной по окружности магнетизм» представляет собой циркуляцию магнитного поля или «магнитодвижущую силу» M, которая на основе экспериментальных результатов Био и Савара может быть выражена формулой

$$M = \oint H_l \, dl = k' I \, ,$$

где I — сила тока.

Установив еще в 1831 г. характер связи, выражаемой этими основными уравнениями теории электромагнитного поля, Фарадей делает отсюда вывод о *конечной скорости* распространения электромагнитных взаимодействий. Он настолько хорошо сознавал важность этой идеи, что решил закрепить за собой приоритет в случае ее экспериментального доказательства, для чего он передал свои сообщения в запечатанном конверте на хранение в архивы Королевского общества [4]. Позже, в 1846 г., в статье «Мысли о лучевых вибрациях», написанной в форме письма Ричарду Филиппсу, Фарадей вновь возвращается к вопросу о конечной скорости распространения электромагнитных действий, пользуясь при этом уже созданной им картиной силовых линий. «Мнение, которое я имею смелость высказать,— пишет Фарадей,— рассматривает... излучение как некий высший тип колебания в линиях силы, которые, как известно, связывают частицы, а также массы материи воедино. Это мнение пытается устранить эфир, а не колебания» [5].

Фарадей поясняет, что явления поляризации света несовместимы с гипотезой о жидком или газообразном эфире. «Мне кажется, что совокупность двух или более линий силы находится в подходящих условиях для действия, которое может считаться эквивалентным *поперечному* колебанию, в то время как

---

[3] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 57.

[4] П. С. Кудрявцев. История физики, т. II. М., Учпедгиз, 1956, стр. 152.

[5] Сб. «Из предистории радио». Изд-во АН СССР, 1948, стр. 56.

однородная среда, подобная эфиру, не кажется для этого подходящей или более подходящей, чем воздух или вода» [6].

«Появление изменения в одном конце силы заставляет предполагать последующее изменение на другом. Распространение света, а поэтому вероятно и всех лучистых действий, требует *времени*, и чтобы такое колебание силы могло объяснить явление излучения, необходимо, чтобы такое колебание также занимало время» [7]. Максвелл прямо указывал, что эти идеи Фарадея легли в основу его электромагнитной теории света, что теория Фарадея по существу то же самое, что он развивал в своей «Динамической теории поля». Чрезвычайно существенно, что Фарадей откликается здесь на трудности теории поперечных волн в эфире, предлагая перейти к «некоему высшему типу колебания», к электромагнитному колебанию. Это «электромагнитное колебание» получается из приведенных выше уравнений, выражающих общий закон электромагнитной связи, если под электромагнитным током в диэлектрике понимать ток смещения. Математическое доказательство этого было дано Максвеллом; но возникает вопрос: известно ли было Фарадею понятие тока смещения? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к весьма важной серии «Исследований» Фарадея — одиннадцатой, посвященной индукции. В этой серии мы находим очень важное место, дающее, на наш взгляд, ключ к пониманию хода мыслей Фарадея. Процитируем это место полностью.

«1162. Среди различного рода действий, по которым принято подразделять учение об электричестве, нет, я полагаю, ни одного, которое превосходило бы или хотя бы было сравнимо с тем, которое было названо *индукцией*. Индукция играет самую общую роль во всех электрических явлениях, участвуя, по-видимому, в каждом из них, и носит в действительности черты первейшего существенного и основного начала. Ее понимание является настолько важным, что без более глубокого понимания ее природы нельзя, мне кажется, значительно продвинуться вперед в исследовании законов электричества; каким иным путем можно надеяться понять ту гармонию или даже единство действия, которое несомненно, управляет возбуждением электричества посредством трения, химических реакций, тепла, магнитного влияния, испарения и даже в живом организме» [8].

Рассматривая далее обычную электростатическую индукцию, Фарадей приходит к выводу, «что обыкновенная индукция сама представляет собой во всех случаях *действие смежных*

---

[6] Сб. «Из предистории радио». Изд-во АН СССР, 1948, стр. 56.
[7] Там же.
[8] М. Фарадей. Экспериментальные исследования, т. 1. Изд-во АН СССР, 1947, стр. 478.

частиц [9] и что электрическое действие на расстоянии (т. е. обыкновенное индуктивное действие) происходит не иначе, как через посредство промежуточного вещества» [10].

В связи с этим пунктом Фарадей полемизирует с теориями Эпинуса, Кэвендиша, Пуассона, допускающими индукционное действие на расстоянии. «В настоящее время, я полагаю,— пишет Фарадей,— что обычная индукция во всех случаях представляет собою действие смежных частиц, заключающееся в некоторого рода полярности, а не является действием частиц или масс на значительные расстояния» [11].

Рассуждения и опыты этой серии, а также последующих серий не оставляют сомнения в том, что Фарадей мыслил процесс индукции, как *смещение* электрических полярных «сил» или зарядов, происходящее в каждой частице подвергающейся индукции среды. «Индукция состоит, по-видимому, в некотором поляризованном состоянии частиц, в которое их приводит наэлектризованное тело, поддерживающее это действие, причем у частиц появляются положительные и отрицательные точки или участки, расположенные симметрично по отношению друг к другу и к индуцирующим поверхностям или частицам» [12]. В дальнейшем Фарадей прямым опытом с цилиндром (формой для мороженого) доказал, что на внешней поверхности цилиндра всегда индуцируется заряд, равный по величине заряду (или зарядом), внесенным внутрь цилиндра, где бы этот заряд (или заряды) ни находился внутри цилиндра. Чрезвычайно существенно, что Фарадей сближает понятия индукции и проводимости; «по своей природе и действию *индукция и проводимость*, по-видимому, одинаковы», а эта идея является руководящей для Максвелла, когда он вводит понятие тока смещения.

Попробуем теперь придать математическую форму мыслям Фарадея. Поскольку, по Фарадею, в каждом участке индуцируемого пространства происходит смещение или поляризация электрических зарядов, естественно попытаться измерить индукцию количеством электрического заряда, смещенного через единицу площадки, ориентированной соответствующим образом в определенном, принятом нами за положительное, направлении. Отсюда мы получаем известное из курсов теории электричества определение вектора индукций

$$D_n = \frac{de}{dS}.$$

---

[9] Здесь Фарадей прибавил позже характерное примечание о неудовлетворительности термина «смежный», поскольку частицы вещества не касаются друг друга; смежные — это ближайшие частицы.

[10] М. Фарадей. Цит. соч., стр. 480.

[11] Там же, стр. 480—481.

[12] Там же, стр. 540.

Теорема, экспериментально доказанная Фарадеем, гласит, что поток индукции через поверхность цилиндра равен суммарному заряду, содержащемуся внутри цилиндра:

$$\oint D_n dS = e.$$

Это положение может быть обобщено (что и было сделано Максвеллом) на любую замкнутую поверхность и является одним из основных законов электродинамики. Индукция, как было показано Фарадеем, зависит от свойств среды и величины индуцирующего поля.

Выбирая определенную систему единиц, мы можем представить эту зависимость для изотропного диэлектрика в виде равенства.

$$\mathbf{D} = \frac{\varepsilon}{4\pi}\mathbf{E}.$$

Развивая далее мысли Фарадея, мы можем получить выражение энергии для электрического поля. Представим себе такой мысленный эксперимент. В данную область электрического поля вносится проводящий цилиндр таких размеров, что на всем протяжении этого цилиндра поле можно считать однородным и равным E. Пусть ось цилиндра параллельна направлению этого поля. Тогда вследствие процесса индукции начинается смещение зарядов вдоль оси цилиндра, так что в результате этого смещения происходит уничтожение электрического поля в проводнике и одновременно необратимое превращение энергии этого поля в тепло. В какой-либо момент процесса, когда напряженность поля примет значение E' $(0 \leqslant E' \leqslant E)$, а индуцированный заряд на торцах цилиндра e' $(e \geqslant e' \geqslant 0)$ при перемещении очередной порции электрического заряда de силы поля совершают работу $de'\,E'\Delta l$ (Δl — длина цилиндра). Но согласно определению вектора индукции (смещения)

$$de' = dD' \cdot \Delta S = \frac{\varepsilon}{4\pi} dE' \cdot \Delta S,$$

где ΔS — площадь основания цилиндра. Полная работа, совершаемая силами электрического поля при уничтожении поля, равна

$$\Delta Q = \int_E^0 de' E' \cdot \Delta l = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_E^0 E'\, dE' \cdot \Delta S \cdot \Delta l = -\frac{\varepsilon}{8\pi} E^2 \cdot \Delta v.$$

По закону сохранения энергии эта работа совершается за счет уменьшения энергии какого-то источника. Естественно пред-

положение, что этим источником энергии является энергия исчезнувшего электрического поля

$$-\Delta W = \Delta Q,$$

откуда

$$\Delta W = \frac{\varepsilon}{8\pi} E^2 \cdot \Delta v.$$

Таким образом, электрическое поле содержит энергию, объемная плотность которой

$$u = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi}.$$

Энергия эта существовала в поле независимо от способа обнаружения ее путем произведенного эксперимента. Если вместе с Фарадеем и Максвеллом предположить, что при установлении поля в диэлектрике происходит процесс индукции во всем объеме диэлектрика, то в качестве вывода из описанного мысленного эксперимента следует, что энергия, запасающаяся во всем объеме диэлектрика, равна

$$W = \int_V \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} \cdot dv.$$

Отметим еще одну важную идею Фарадея. Изучая различные способы уничтожения поля (электрический разряд, одной из форм которого является описанный выше опыт с индукцией в проводнике), Фарадей приходит к заключению: «Независимо от того, как разряд осуществляется: путем проводимости через провод с бесконечной скоростью, путем электролиза с соответствующим присущим последнему чрезвычайно медленным движением, или путем искры, или, возможно, даже с помощью конвекции,— создаваемое им поперечное магнитное действие всегда одинаково по характеру и направлению»[13]. Но это означает, что «разряд в диэлектрике», т. е. ток смещения, также должен сопровождаться возникновением магнитного поля.

Со всей ясностью гипотеза о существовании магнитного поля тока смещения была сформулирована Максвеллом, и несомненно, что она ведет свое прямое происхождение от идей Фарадея.

Переходя к магнитной индукции, Фарадей первоначально не обнаружил никакого влияния среды (кроме железа) на магнитные индукционные действия (позже он обнаружил диамагнитный и парамагнитный эффекты). Тем не менее он не согласился с концепцией для магнитной индукции. «1729. Мне поэтому представляется возможным, и даже вероятным, что магнитное действие может передаваться на расстояние при посредстве промежуточных частиц, наподобие того, как передают-

[13] М. Фарадей. Цит. соч., стр. 693.

ся на расстояние индуктивные силы статического электричества, причем промежуточные частицы на время в большей или меньшей степени воспринимают особое состояние, которое (хотя я имел о нем очень неопределенное представление) я неоднократно называл термином *электротоническое состояние*»[14].

Электротоническое состояние — это нечто отличное от индукционного, поляризационного состояния. Фарадей делает в связи с вопросом о различии состояний важное замечание: «я не подразумеваю под этим, что эти силы независимы друг от друга и могут действовать раздельно; наоборот, они, вероятно, существенно связаны, но отсюда никоим образом не следует, что они обладают одинаковой природой. В обыкновенной статической индукции, в проводимости и в электролизе силы у противоположных концов частиц, совпадающие с линиями действия и обычно обозначаемые термином электрические, являются полярными, и в случае смежных частиц действуют только на неощутимо малых расстояниях; в то же время силы, которые перпендикулярны к направлению этих линий и называются магнитными, являются круговыми, действуют на расстоянии и, если это осуществляется не через посредство промежуточных частиц, то отношение магнитных сил к обычному веществу совершенно непохоже на отношение к нему электрических сил, с которыми они связаны» [15].

Для научной объективности Фарадея характерна эта последняя фраза; Фарадей еще не нашел влияния среды на магнитные действия и считает необходимым отметить это различие, хотя оно и противоречит всей его концепции. Важно отметить подчеркивание Фарадеем связи электрических и магнитных полей. К этому пункту мы еще вернемся, а пока остановимся на вопросе о различии электростатической и электромагнитной индукции. Это различие, как указывает Фарадей, состоит в том, что линии электрической индукции имеют начало и конец в полярно противоположных зарядах, тогда как линии магнитной индукции — замкнутые («круговое действие» по Фарадею). Если для измерения электрической индукции можно воспользоваться проводящей пластинкой и измерять индуцированный на ее сторонах заряд, то метод измерения магнитной индукции должен быть иным. Этот метод основан на уравнении

$$\mathcal{E} = \oint E_l \, dl = -k \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

и носит название метода «пробной катушки»[16]. Измеряя количество электричества, индуцированное в катушке, внесенной в

[14] Там же, стр. 720—721.

[15] Там же, стр. 722.

[16] См. M. Abraham. Theorie der Elektrizität, Bd I. Leipzig — Berlin, 1923, S. 185.

исследуемую область магнитного поля, мы определяем нормальную составляющую вектора магнитной индукции из соотношения

$$-B_n = c\frac{Rl}{S},$$

где R — сопротивление катушки, S — площадь ее витка, c — константа, зависящая от выбора единиц. Для произвольного замкнутого проводника:

$$-\int B_n\, dS = cRl,$$

отсюда

$$\oint B_n\, dS = 0,$$

т. е. вектор магнитной индукции соленоидальный, т. е. не имеет источников; линии индукции не имеют ни начала, ни конца, как это и было высказано Фарадеем.

Метод «пробной катушки» дает возможность измерить энергию магнитного поля. Предположим, что катушка представляет собой проводящую трубку длиной Δl и сечением ΔS (полый цилиндр), причем размеры трубки настолько малы, что исследуемое поле во всем охватываемом ею объеме можно считать однородным. В магнитном поле такая катушка охватывает магнитный поток

$$\Phi = B_n\, \Delta S$$

(ось катушки параллельна силовым линиям).

Если (как это имеет место, например, в пермеаметре Гопкинсона) катушка быстро извлекается из поля, то, измеряя индуцированный электрический ток, мы можем измерить поток. Если этот поток исчезает, то вследствие электромагнитной индукции создается э. д. с. индукции

$$\mathscr{E} = -\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt}$$

(в электромагнитных абсолютных единицах). За время dt эта э. д. с. индукции совершает работу

$$\mathscr{E} I dt = dA,$$

где I — сила индукционного тока в момент времени t. Последняя связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$\oint H_l\, dl = \frac{4\pi}{c} I;$$

пренебрегая рассеянием магнитных линий вне трубки, имеем

$$\oint H_l\, dl \approx H\Delta l.$$

Таким образом,

$$dA = -\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt}\frac{c}{4\pi} H\Delta l = -\frac{1}{\pi} HdB\,\Delta S\,\Delta l.$$

Полагая $B = \mu H$ и $\Delta S\,\Delta l = \Delta v$, имеем

$$dA = -\frac{\mu}{4\pi} HdH\Delta v.$$

Полная работа э. д. с. индукции в течение всего процесса измерения индукции

$$A = \int_H^0 \frac{\mu}{4\pi} HdH\,\Delta v = \frac{\mu}{8\pi} H^2 v.$$

Эта величина должна быть равна энергии магнитного поля в объеме, занимаемом катушкой,

$$\Delta W = \frac{\mu H^2}{8\pi}\Delta v.$$

Эта энергия существовала в поле до ее измерения. Она распределяется по объему поля с плотностью

$$u = \frac{\mu H^2}{8\pi}.$$

Итак, последовательное проведение идеи индукции, предложенной Фарадеем, дает возможность установить связи электромагнитного поля в виде четырех уравнений

$$E = -\frac{1}{c}\frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

$$M = \frac{4\pi}{c} I,$$

$$\oint D_n\, dS = 4\pi l,$$

$$\oint B_n\, dS = 0,$$

или, в дифференциальной форме

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0,$$

и написать выражение энергии для электромагнитного поля:

$$W = \int \left(\frac{\varepsilon E^2}{8\pi} + \frac{\mu H^2}{8\pi} \right) dv.$$

Фарадей не написал этих уравнений; но ему были известны свойства электрического и магнитного полей, которые описываются этими уравнениями. Он предчувствовал важность исследования установленной им связи электрического и магнитного полей. Он писал: «1732. Было бы чрезвычайно важно решить вопрос о том, тождественны или различны силы этих двух видов (т. е. электрические и магнитные.— *П. К.*), и установить их истинное взаимоотношение. Этот вопрос, по-видимому, вполне доступен опыту и сулит богатую награду тому, кто попытается его разрешить» [17].

Интуиция не обманула Фарадея. Раскрытие взаимоотношений электрических и магнитных полей привело к открытию электромагнитных волн со всеми неисчислимыми научными и техническими последствиями этого открытия. На долю же самого Фарадея выпало открытие связи между магнетизмом и электричеством в виде «эффекта Фарадея» (магнитное вращение плоскости поляризации, 1846). «Таким образом,— писал Фарадей,— я думаю, впервые установлена истинная непосредственная связь между светом и магнитной и электрическими силами и этим сделано важное добавление к фактам и соображениям, помогающим доказать, что все естественные силы связаны между собой и имеют общее происхождение» [18].

Из сделанного нами обзора видно, какая богатейшая сокровищница идей содержалась в «Экспериментальных исследованиях по электричеству». Эти идеи произвели полную революцию в науке об электричестве, но смысл их оставался не понятым современниками. Только Максвелл сумел прочитать и понять мысли Фарадея и заложить прочные основы теории электромагнитного поля. Первая работа Максвелла «О фарадеевских силовых линиях», выполненная им еще в студенческие годы, представляет собой попытку изложить представления Фарадая математическим языком и рассмотреть с помощью метода силовых трубок Фарадея электрические и магнитные взаимодействия.

[17] М. Фарадей. Цит. соч., стр. 722.
[18] Сб. «Из предистории радио». Изд-во АН СССР, 1948, стр. 50.

В связи с этим Максвелл вводит гидродинамическую модель некоторого стационарного потока жидкости, движущейся с некоторым сопротивлением, но без инерции в среде. Этой моделью Максвелл интерпретирует и изученные Фарадеем электрические и магнитные свойства среды. Коэффициенты сопротивления представляют либо диэлектрические свойства, либо магнитные свойства, либо электропроводность вещества. Однако введенное Фарадеем понятие об электротоническом состоянии, характеризующем инерционные свойства магнитного поля, Максвеллу не удалось представить с помощью этой модели, и он представляет его с помощью векторной функции «электротонической напряженности», которая есть не что иное, как вектор-потенциал электромагнитного поля.

В последующих работах Максвелла, в особенности в «Динамической теории поля», эта величина интерпретируется им как электромагнитное количество движения (электромагнитный момент) в данной точке. Правда, Максвелл рассматривает это электромагнитное количество движения только как формальную аналогию количества движения в механике и приписывает реально полю только энергию, а не количество движения. Выражение для энергии поля, постулированное Максвеллом, имеет решающее значение для всей его концепции и, как было показано выше, выводится из тех обобщений фактов электростатики и электродинамики, которые были сделаны Фарадеем. Эти обобщения, как было сказано, касаются процесса индукции. Если в электрическое поле внести проводник, то в этом проводнике начинается процесс смещения электрических зарядов, результатом которого будет появление индуцированных на поверхности проводника зарядов. Этот процесс Максвелл обобщает и на случай чистого эфира, вводя для его характеристики векторную величину — *смещение*,— измеряемую количеством электричества, смещаемым через единицу площади, перпендикулярной силовым линиям поля. Изменение этой величины со временем Максвелл рассматривал как ток, который, так же как и ток проводимости, производит магнитные действия. В теории Максвелла все токи оказываются замкнутыми. Так, разрядный ток в проводнике, соединяющем обкладки конденсатора, замыкается в диэлектрике током смещения.

Максвелл обобщил и закон электромагнитной индукции. В домаксвелловской электродинамике рассматривались индукционные процессы только в проводниках. Максвелл интерпретировал процесс индукции как возникновение замкнутых линий электрического поля вокруг переменного магнитного потока. Эти линии возникают и в диэлектрике, и даже в чистом эфире. Переменное магнитное поле порождает вихревое

электрическое поле — таково обобщение закона электромагнитной индукции, сделанное Максвеллом.

Эти обобщения математически выражаются системой уравнений, носящих ныне имя Максвелла. Из уравнений Максвелла вытекает важное следствие, предугадывавшееся еще Фарадеем: переменное электромагнитное поле распространяется с конечной скоростью, равной в вакууме скорости света. Таким образом, из теории Максвелла вытекало существование электромагнитных волн. Эти волны распространяются в бесконечной диэлектрической среде с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, они поперечны, т. е. колебания электрических и магнитных сил перпендикулярны направлению распространения волны, и в каждый момент энергии электрического и магнитного поля в данном объеме диэлектрика оказываются равными.

Отсюда Максвелл сделал два важных вывода. Первый — это тот, что свет представляет собой электромагнитные волны; второй же состоит в том, что оптические свойства среды связаны с ее электромагнитными свойствами. В немагнитном диэлектрике квадрат показателя преломления равен диэлектрической проницаемости среды. Максвелл, однако, предупредил, что при экспериментальной проверке возможны расхождения, ибо электрические и магнитные коэффициенты измеряются в статических или медленно меняющихся полях, тогда как оптические коэффициенты измеряются в таких быстро переменных полях, какими являются световые колебания. Электромагнитная оптика Максвелла — это оптика бесконечно длинных (по сравнению с длиной световой волны) волн.

Поскольку в электростатике и магнитостатике фарадеевско-максвелловской теории взаимодействия обусловлены взаимодействием силовых трубок, оказывающих давление друг на друга, Максвелл заключил, что электромагнитная волна должна давить на проводящую поверхность. Этот вывод Максвелла подвергся критике; однако позднее Бартоли, а затем Больцман (1884) вывели из термодинамических соображений существование светового давления, а Лебедев в 1899 г. измерил это давление экспериментально и показал, что оно совпадает с теоретическим значением Максвелла. Опыты Лебедева рассматривались как триумф теории Максвелла; но в первоначальной концепции все же не было места для светового давления, ибо Максвелл не приписывал электромагнитному полю никаких механических характеристик, кроме энергии. Понятие импульса поля было введено позже (Дж. Дж. Томсон, Абрагам, Пуанкаре).

Хотя Максвелл и подходил к своим уравнениям исходя из механической аналогии и при помощи механических моделей,

хотя он был первым, применившим аппарат механики Лагранжа к электромагнитным процессам, он ясно понимал, что его уравнения являются законами новой области физических процессов, не сводимых к механике. Внутренние взаимосвязи этой области, по признанию самого Максвелла, «значительно более многочисленны и сложны, чем любой до сих пор разработанной научной дисциплины». Электромагнитные процессы внешним образом связаны и с химией, что, по мнению Максвелла, указывает на особую важность науки об электричестве, «как науки, помогающей объяснить природу». «Исходя из этого мне представляется,— пишет Максвелл,— что изучение электромагнетизма во всех его проявлениях как средства движения науки вперед сейчас приобрело первостепенную важность» [19].

Но для изучения электромагнетизма надо было отрешиться от мысли о его механическом объяснении, в частности надо было «оставить сослуживший такую хорошую службу эфир и поставить на его место среду, свойства которой не были похожи ни на одно из известных тел» [20]. Шустер, написавший эти строки, указывает, что многие физики противились этому. «На стороне старых воззрений был даже сам лорд Кельвин со всем весом своего громадного авторитета» [21].

«В основе теории Максвелла и развившегося из нее электромагнитного миропонимания,— писал О.Д. Хвольсон в 1924 г.,— лежит *непонятная гипотеза, первый пример того духа, который характерен для новой физики и которого не было в физике старой*» [22].

Положение осложнялось еще тем, что основные посылки и выводы теории не были в достаточной мере подтверждены экспериментально. Вывод теории, что электродинамическая постоянная (отношение электростатических и электромагнитных единиц) совпадает со скоростью света в вакууме, не опровергался экспериментальными данными, но и не мог считаться подтвержденным с достаточной точностью. Еще хуже обстояло дело с соотношением $\varepsilon\mu = n^2$. Единственные данные, которыми располагал Максвелл, были измерения диэлектрической постоянной парафина, проведенные Гибсоном и Барклаем, и измерения Гладстоном показателя преломления того же парафина, давшие неутешительный для теории результат, который, однако, не обескуражил Максвелла. Он, как и впоследствии Эйнштейн, был глубоко убежден в справедливости теории, и

---

[19] Дж. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. ГТТИ, 1952, стр. 346.

[20] А. Шустер. Прогресс физики. 1915, стр. 48.

[21] Там же, стр. 48.

[22] О. Д. Хвольсон. Характеристика развития физики за последние пятьдесят лет. ГИЗ, 1924, стр. 208.

эта убежденность передалась и его ученикам, которые не постарались проверить экспериментально важнейшие выводы теории. Эта проверка выпала на долю русских и немецких ученых.

Здесь прежде всего необходимо отметить классические измерения Больцмана определившего диэлектрические проницаемости ряда твердых тел и в особенности газов. Эти измерения подтвердили в основных чертах выводы теории. Затем следует указать на работы Н. Н. Шиллера, измерившего диэлектрические проницаемости твердых тел в переменных полях, и на измерения П. А. Зилова, разработавшего оригинальный метод для определения диэлектрических проницаемостей жидкостей. Результаты Больцмана, Шиллера и Зилова приводил Максвелл в своей книге «Электричество в элементарном изложении», изданной посмертно в незаконченном виде. Хотя эти измерения и подтверждали в основном выводы теории, они указывали и на необходимость ее дополнения. Особенно существенное расхождение было найдено в 1888 г. Коном и Аронсом для воды и С. Я. Терешиным в 1889 г. для этилового спирта и воды. Эти авторы работали по методу Зилова. Что касается измерений c, то они проводились с 1879 г. почти ежегодно учеными разных стран и подтверждали вывод теории. Окончательный триумф теории Максвелла принесли опыты Герца (1857—1894).

Герц по совету своего учителя Гельмгольца занялся экспериментами, позволяющими сделать выбор между различными теориями электродинамики, в частности между собственной теорией Гельмгольца и теорией Максвелла. Гельмгольц обратил внимание молодого Герца на конкретную задачу о связи между электродинамическими силами и диэлектрической поляризацией. Первоначальные попытки Герца найти такую связь не дали результатов.

Только спустя почти десять лет ему удалось найти способ генерирования и детектирования весьма быстрых электрических колебаний, что позволило решить поставленную задачу в пользу теории Максвелла, получить свободные электромагнитные волны, измерить их длину, продемонстрировать их отражение, преломление, дифракцию и интерференцию. В ходе решения проблемы Герц развил дальше теорию Максвелла, написал ее уравнения в измененной, ныне общепринятой форме, исследовал частное решение этих уравнений для случая так называемого осциллятора Герца. В этом случае поле может быть разбито на три области: ближнюю, промежуточную и волновую. В ближней области поле совпадает с квазистатическим полем: электрическое поле — с полем диполя, убывающим обратно пропорционально третьей степени расстояния от центра вибратора, магнитное — с полем элемента тока (определяемым

согласно закону Био-Савара), напряженность которого убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра элемента.

Большой неожиданностью для Герца было открытие волнового поля, отпочковывавшегося от диполя, напряженность которого убывает пропорционально первой степени расстояния от центра диполя.

За пять лет до опытов Герца появилась работа Пойнтинга о переносе энергии электромагнитным полем, которая, в свою очередь, была частным случаем общей теории о движении энергии, разработанной Умовым в 1873 г. Герц применил вектор Умова — Пойтинга к вычислению потока энергии, излучаемой диполем в окружающее пространство, и показал, что количество энергии, передаваемой вибратором в окружающее пространство, не зависит от расстояния и будет прямо пропорционально квадрату длины диполя и обратно пропорционально кубу длины волны генерируемой диполем. Этот результат явился отправным пунктом в теории антенн. Теоретические основы радиотехники были заложены Герцем. Сам Герц сформулировал результаты своих опытов следующим образом:

«Целью этих опытов была проверка основных гипотез Фарадея — Максвелла, а результат опытов есть подтверждение основных гипотез этой теории»[23].

Герц открыл для физиков новый объект — свободное электромагнитное поле. Задача состояла в том, чтобы научиться генерировать это поле, обнаруживать его и управлять им. В год смерти Герца (1894) его опыты были воспроизведены на IX съезде русских естествоиспытателей П. Н. Лебедевым (1866—1912), который, построив миниатюрные вибратор и резонатор, получил не превзойденные никем короткие электромагнитные волны длиной 6 *мм*. С этими волнами Лебедев не только повторил все опыты по отражению, преломлению, дифракции и интерференции, но и доказал двойное преломление этих волн в кристаллической сере и продемонстрировал поляризационные явления. Синтез электромагнетизма и оптики был продемонстрирован с величайшей наглядностью.

Теперь, естественно, возникла мысль об использовании этих волн для целей телеграфии. Сам Герц скептически относился к такой возможности, размышляя о размерах зеркал, которые понадобились бы для такого телеграфа, «действующего по принципу оптического». Здесь его «подвела» аналогия с оптикой. Практика пошла по специфическому пути радио, вернувшись к оптической аналогии только в наши дни. Была изобретена антенна (Тесла, Попов), построен достаточно чувствитель-

[23] Сб. «Из предистории радио». Изд-во АН СССР, 1948, стр. 124.

ный детектор-когерер (Бранли, Лодж) и, наконец, Попов сконструировал практически пригодный приемник радиосигналов (грозоотметчик, 7 мая 1895 г.), а в 1896 г. осуществил первую передачу и прием радиограммы из одного здания в другое.

В том же году начал эксперименты по беспроволочной телеграфии Маркони, которому удалось довести дело до практического применения. Родилась радиотехника, а вместе с ней теория Максвелла получила подтверждение практикой — высшим критерием истин.

Возникновение новых идей в физике. Победа максвелловской электродинамики оценивалась современниками как победа физики эфира, физики континуума. Наряду с термодинамикой, теория Максвелла, казалось, благоприятствовала утверждению так называемого феноменологического направления, для которого, по характеристике Больцмана, «казалось единственной целью физики написанное для процессов уравнение, без всяких гипотез, или наглядного представления, или механического объяснения»[24]. Герц был первым, кто отказался от попыток наглядной механической интерпретации или «вывода» уравнений Максвелла, выразив это словами: «Теория Максвелла — это уравнения Максвелла».

Однако теория Максвелла не была просто уравнениями. Это обнаружилось из попыток исследовать взаимоотношения поля и вещества, в которых выявились совершенно новые точки зрения и гипотезы, не предусмотренные никакой «феноменологией». Хотя Фарадей и не был склонен следовать образам атомистики, однако именно ему выпало на долю открыть законы, укрепившие атомную теорию вещества и включившие атомистику в теорию электричества. Речь идет о законах электролиза и о введенном Фарадеем понятии иона. Открытый Фарадеем факт, что каждый одновалентный ион несет одно и то же количество электричества, ясно указывал на атомную структуру электрического заряда. Это хорошо понял Максвелл, предложивший назвать заряд одновалентного иона «молекулой электричества». Но Максвелл считал, что это представление связано с непреодолимыми трудностями и не сохранится в будущей теории электричества.

После Максвелла к концепции атома электричества вернулись независимо друг от друга Стоней и Гельмгольц в известной Фарадеевской речи. Стоней дал и приблизительную оценку величины элементарного заряда. Положительный ион водорода оказался, таким образом, наименьшей заряженной частицей, с определенной массой и зарядом. Для оценки той

[24] L. Boltzmann. Populäre Schriften. Leipzig, 1905, S. 226.

и другой величины необходимо было знать число Фарадея и число Авогадро. Число Фарадея определялось легко; для определения числа Авогадро существовали некоторые косвенные способы, позволившие оценить порядок величины массы и заряда водородного иона, т. е., как выяснилось впоследствии, элементарной частицы материи (протона). В то время мысль о такой особой роли этой частицы не возникла, хотя в начале века Праут высказал гипотезу о составлении всех атомов из атомов водорода. Мысль эта была оставлена в связи с точными определениями атомных весов, не находившихся в простом кратном отношении к весу атома водорода. Как бы там ни было, уже с конца 70-х годов начала укрепляться идея, «что во всех телах находятся мелкие электрически заряженные частички и что все электрические процессы вызваны расположением и движением этих «ионов» (Лоренц). Следуя этой идее, Г. А. Лоренц уже с 1878 г. начал разрабатывать электронную теорию вещества, объединяя теорию Максвелла с атомными представлениями. Это, в частности, позволило получить ему существенные результаты в теории дисперсии.

Совершенно своеобразным путем вводит атомистические представления в электродинамику Дж. Дж. Томсон. В 1893 г. он предпринимает попытку вывести уравнения Максвелла методом фарадеевских трубок. Он связывает с каждой единицей электричества трубку, называемую единичной. При этом он указывает, что существует естественная единица электричества, определяемая явлениями электролиза. «Мы будем предполагать,— пишет Томсон,— что во всех электрических процессах, а не только в электролизе, не существует подразделения этой единицы». И именно Томсону удалось доказать существование такой единицы «в чистом виде», не связанной с обычным атомом. Открытие Томсона и было открытием первой элементарной частицы — электрона.

Открытие электрона было связано с изучением газового разряда, на важность исследования которого указал еще Фарадей. В 1869 г. Гитторф открыл при давлении ниже 1 *мм* рт. ст. катодные лучи. Через десять лет Крукс высказал гипотезу, что в этих лучах мы имеем дело с новым, четвертым состоянием материи — лучистым состоянием. Наряду с этой гипотезой была высказана гипотеза о волновой природе катодных лучей. Этой гипотезы, между прочим, придерживался и Герц, ассистент которого Ленард в 1893 г. вывел катодные лучи через тонкое алюминиевое окошечко. Плохой вакуум не давал возможности получить согласованных результатов по наблюдению действия электрического поля на катодные лучи, и только в 1895 г. Перрену удалось доказать, что катодные лучи несут электрический заряд. Через два года Дж. Дж. Томсон уста-

новил, что катодные лучи представляют собой заряженные частицы с массой примерно в 1000 раз меньшей массы атома водорода. Этот ошеломляющий вывод не сразу был принят физиками, и только спустя два года, когда Томсон показал, что подобные «атомные» частицы встречаются и в явлениях фотоэффекта, исследованных А. Г. Столетовым в 1888—1889 гг. в явлениях термионной эмиссии, существование электронов было признано. Вскоре выяснилось, что электроны входят в состав радиоактивных лучей, открытых Беккерелем в 1896 г., а в начале XX века В. Кауфман показал, что масса быстродвижущихся электронов радиоактивного излучения зависит от скорости; он полагал, что этим доказана электромагнитная природа массы электрона. Идея электромагнитной массы была введена тем же Томсоном в 1881 г.

Эта идея была у Томсона связана с его воззрением на природу электромагнитного поля, к которому он впервые применил понятие механического импульса, не в смысле аналогии, как у Максвелла, а как реально измеряемой физической величины. Импульс поля, подобно энергии, распределен по всему объему поля. Его объемная плотность пропорциональна вектору Умова — Пойнтинга. Тем самым по существу предрешался вопрос о существовании светового давления, которое в теории Максвелла являлось следствием незаконной экстраполяции выводов, полученных из рассмотрения статических сил взаимодействия на процессы излучения. Бартоли показал, однако, что если не применять к тепловому электромагнитному излучению понятия механического давления, то можно представить себе мысленный эксперимент, в котором теплота, вопреки второму закону термодинамики, переносилась бы без компенсации от холодного тела к нагретому.

Больцман в 1884 г. показал, что равновесное изотропное черное излучение оказывает, подобно газу, всестороннее давление, равное одной трети объемной плотности энергии излучения. Он смело применил к излучению законы термодинамики и вывел теоретический закон, найденный ранее из экспериментальных данных Стефаном, о пропорциональности энергии излучения четвертой степени абсолютной температуры излучающего тела. В выводе Больцмана излучение, как термодинамическая система, характеризовалось объемом, давлением, внутренней энергией. Температура, входящая в термодинамические соотношения, была температурой черного излучающего тела, находящегося в термодинамическом равновесии с рассматриваемым излучением.

Б. Б. Голицын в 1893 г. предложил применить понятие температуры к самому излучению, которое, таким образом, могло рассматриваться как своеобразный газ, находящийся в опре-

деленном объеме при определенной температуре и оказывающий соответствующее давление на стенки сосуда. Состояние этого газа определялось электромагнитными векторами, подчиняющимися уравнениям Максвелла, из которых могли быть вычислены его энергия, давление и температура.

Идеи Голицына встретили возражения ряда физиков, в том числе А. Г. Столетова. Он совершенно справедливо указывал, что температура является характеристикой нестройных, неупорядоченных движений. «Мы не знаем,— писал он вместе с А. П. Соколовым в отзыве на работу Голицына,— могут ли быть в свободном эфире нестройные движения, и потому уже не можем говорить о температуре эфира. Мы не знаем в точности, что такое световая волна, но несомненно, что это движение либо вполне стройное, либо, во всяком случае, не вполне нестройное, а следовательно, мы не имели бы права зачислить всю энергию в состав «температура», даже если бы захотели распространить это понятие на эфир». Следовательно, по Столетову, нестройность хаотического движения, ассоциирующегося с понятием температуры, несовместима со стройностью максвелловых уравнений, характеризующих волновой процесс в эфире.

Аналогичные сомнения возникали у многих физиков и позже Столетова, в том числе у Планка. Еще в 1909 г. в своих лекциях по теоретической физике в Колумбийском университете он говорил о «живом протесте», который вызывает во многих физических кругах идея применения атомистики к лучистой теплоте, и говорил, что «нет никакой необходимости, по крайней мере по моему мнению, представлять себе с атомистической точки зрения лучистые явления в абсолютной пустоте, но достаточно использовать атомистику в источнике лучеиспускания, т. е. в тех явлениях, которые происходят в центрах испускания и поглощения лучей. Тогда электродинамические дифференциальные уравнения Максвелла для пустоты сохраняют свою силу, и рассеяние элемента лучистой теплоты переносится в без того очень загадочную область, где еще остается много места для различного рода гипотез» [25]. Согласно этой концепции, Планк говорит о температуре осцилляторов, поглощающих и испускающих лучистую теплоту и, следовательно, по существу становится на точку зрения Столетова, писавшего в цитировавшемся уже отзыве, «что лучистая энергия эфира и только тогда станет *теплотою* в настоящем смысле слова и только тогда будет иметь *температуру*, когда эта энергия будет *поглощена некоторым телом*».

Весьма замечательно, однако, что ученик Столетова В. А. Ми-

[25] М. Планк. Теоретическая физика. 1911, стр. 59.

хельсон в 1887 г. смело применил статистику к электромагнитным колебаниям, а именно, к вопросу о распределении энергии в непрерывном спектре, и это начинание встретило полную поддержку Столетова. Через 14 лет после этой работы Михельсон в своем докладе на Петербургском съезде естествоиспытателей говорил:

«Итак, принцип возрастания энтропии сводится к возрастанию «вероятности физического состояния тела» или, что то же, к возрастанию общей меры нестройности всех молекулярных движений системы. Но при этом незачем замыкаться в рамки одной лишь кинетической гипотезы. Очевидно, что мы можем распространить понятие о стройности и нестройности (т. е. беспорядочности распределения) не только на координаты и скорости частиц, но и на ускорения и силы и вообще на всякие числовые или векториальные величины, характеризующие состояние отдельных точек или мельчайших частей системы»[26]. Таким образом, понятие нестройности может быть распространено и на электродинамику. Что же касается его противоречия с уравнениями Максвелла, то Михельсон справедливо спрашивает:

«Однако сам собою напрашивается вопрос: каким образом возможно нестройное распределение электромагнитных возмущений, если каждое из них вполне определяется соседним по известным дифференциальным уравнениям Максвелла или Герца, и эти уравнения по существу предполагают непрерывность в свойствах среды, служащей носителем электромагнитных сил? Этому вопросу, конечно, с полным правом можно противопоставить другой: а каким образом возможно нестройное движение частиц весомых тел, если несомненно, что каждая из них при своем движении подчиняется дифференциальным уравнениям Лагранжа, в которых координаты скорости и силы также дифференцируются, т. е. представляются изменяющимися непрерывно» [27].

В этом же докладе Михельсон совершенно определенно говорит о температуре излучения. «Мы привыкли, — пишет он, — говорить о температуре тел, и притом всегда приписывали определенную температуру самому телу, а не *тепловой энергии*, в нем заключающейся. Теперь же мы будем приписывать известную температуру и известную энтропию самой *нестройной радиации*, и притом будем считать их свойствами лучистой энергии, а не того эфира, который в какое-либо мгновение является ее носителем» [28].

---

[26] В. А. Михельсон. Собр. соч., стр. 242.
[27] Там же.
[28] Там же, стр. 249.

Таким образом, идея применения понятия температуры к излучению к 1901 г. укрепилась. Классические эксперименты П. Н. Лебедева, как отмечал в том же докладе Михельсон, неопровержимо доказали действительное существование светового давления. «Поэтому,— отмечает Михельсон, — все дальнейшие термодинамические выводы, основанные на допущении существования светового давления, теперь уже могут считать покоящимися на опытной, а не на чисто гипотетической почве»[29].

Михельсон был первым, приступившим к решению главной проблемы теории излучения: раскрытию вида универсальной функции длины волны и температуры, которая, согласно закону Кирхгофа, характеризует распределение энергии в спектре излучающего черного тела при данной температуре. Основная идея Михельсона заключается в том, что этот закон распределения устанавливается вследствие непрерывного обмена энергией между колебаниями различных периодов, подобно тому как распределение молекул по скоростям, согласно закону Максвелла, устанавливается вследствие обмена энергией между молекулами при столкновениях. Найденная Михельсоном функция распределения имела максимум для определенной длины волны, причем положение этого максимума зависело от температуры согласно закону $\lambda_m^2 T = \text{const}$. Через шесть лет после Михельсона В. Вин нашел другое соотношение $\lambda_m T = \text{const}$, подтвержденное опытными данными. Самый вид функции ему удалось найти несколько позже, на основе определенных предположений о механизме излучения.

Формула, найденная Вином, хорошо совпадала с наблюдениями в области коротких волн, но оказывалась несостоятельной для длинноволнового излучения. Позже Рэлей, исходя из теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы, нашел закон, дающий совпадение с опытными данными в области длинных волн, но совершенно несостоятельный в области коротких волн. Более того, этот закон приводит к парадоксальному выводу о неограниченном возрастании излучаемой энергии с уменьшением длины волны.

Планк попытался решить задачу в общем виде. Его попытки увенчались успехом, однако физическая интерпретация полученной им формулы требовала, чтобы энергия осцилляторов состояла из конечных неделимых порций энергии — «квантов», пропорциональных частоте излучаемой энергии. «Это, как мне кажется,— писал Михельсон в 1901 г., одно из наиболее любопытных заключений теории Планка». И действительно, здесь

---

[29] В. А. Михельсон. Собр. соч., т. I. М., 1930, стр. 246.

впервые физика столкнулась с квантовыми представлениями, изменившими впоследствии ее лицо.

Чужеродный характер этих представлений в классической физике был ясен самому автору гипотезы, и он рассчитывал, что в последующем удастся истолковать ее в классических образах; однако этого не случилось. Квантовые представления были применены Эйнштейном к теории фотоэффекта, Дебаем и Эйнштейном — к теории теплоемкостей и, наконец, Бором — к истолкованию спектральных серий, к механике атома. Физика вступила в новый мир, мир микропроцессов, в котором, как оказалось, действуют иные законы, отличные от законов классической макрофизики, хотя и находящиеся в определенном соответствии с ними.

Открытие электрона, радиоактивности, квант далеко не исчерпывает всего того, что подготовило революционные преобразования в физике. Новые идеи возникали и в самой классической физике, а именно — в области электродинамики движущихся тел. Попытки примирить факты электродинамики и оптики движущихся тел с классическими представлениями о пространстве, времени и эфире потерпели крах, и непротиворечивая теория была создана ценой отказа от этих представлений. Хотя история развития этой области физики относится к XIX в., создавшаяся ситуация разъяснилась только в XX в., в связи с чем уместно изложить это в очерках, посвященных истории физики XX в.

Но не только возникновением новых идей характеризуется переход от классической физики к современной. В процессе развития физики XIX в. произошло постепенное преобразование ее духа в целом. Из собрания эмпирических фактов и математических упражнений на физические темы физика превращается в научную систему, она все более и более пронизывается теорией, подчиняется некоторым общим принципам. Принцип сохранения и превращения энергии породил стремление к объединению физики на базе законов механики, механического миропонимания. Гельмгольц, Больцман, Герц, Столетов, Умов, В. Томсон, Дж. Дж. Томсон и другие выдающиеся физики второй половины XIX в. были убежденными механистами, считавшими, что задача физики сводится к объяснению явлений природы на основе принципов механики. В самом начале XX в., в 1901 г. Н. А. Умов так определял предмет и задачу физики: «Предмет физики есть изучение движений вещества. Задача физики — представление явлений помощью простейших механических моделей».

Крушение попыток механического объяснения природы расценивалось как кризис в физике, как крушение материалистического истолкования физики вообще, как «исчезновение

материи». На самом деле, как это было разъяснено В. И. Лениным, это означало более глубокое проникновение в природу материи, замену механического миропонимания электромагнитным, которое в свою очередь также оказалось недостаточным, неполным, приблизительным. Физические теории становятся все более глубокими, сложными и все же не всеобъемлющими, не абсолютными. В противоречии между стремлением абсолютировать теорию и ее фактическим относительным характером усматривается неиссякаемый источник бесконечного развития физической науки. Науке XX в. чужда самоуспокоенность физики второй половины XIX в., нашедшая свое выражение в известном вопросе Кирхгофа: «Разве осталось что-либо еще открывать?»



Б. Г. Кузнецов

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Возникновение теории относительности ставит перед историком ряд вопросов. Прежде всего, каковы причины, обусловившие появление этой теории в определенное время? Ведь само содержание теории относительности отражает исторически неизменные объективные закономерности. Почему же они стали известны человечеству именно в 900-е годы?

На этот вопрос можно ответить ссылкой на развитие классической электродинамики. Специальная теория относительности не могла появиться раньше, чем развилась электродинамика движущихся сред, раньше чем были сделаны и многократно повторены эксперименты Майкельсона (1881), показывающие независимость скорости света в некоторой системе от инерционного движения этой системы в эфире. Значит, исторические причины, вызвавшие к жизни специальную теорию относительности,— это причины, обусловившие развитие электродинамики в 90-е—900-е годы. Самый же переход от электродинамики Лоренца к специальной теории относительности не требует поисков собственно исторических причин; дело объясняется «свободным пробегом» теории и эксперимента, получивших импульс со стороны производства.

Ссылка на электродинамику указывает на исторические связи между теорией относительности и квантовой теорией в 900-е годы. Квантовая теория выросла из экспериментов, показавших несовместимость эмпирических законов излучения с классическим представлением о непрерывности энергии. В дальнейшем, начиная с конца 20-х годов, установилось действительное, исторически развивающееся взаимодействие между

теорией относительности и квантовой теорией: релятивистская квантовая теория накопила необъятное число доказательств специальной теории относительности, несопоставимое с макроскопическими доказательствами, имевшимися в первой четверти столетия. Эта весьма солидная связь между двумя теориями будет рассмотрена в другом очерке. Здесь мы отметим только, что в 900-е годы теория относительности и квантовая теория были двумя различными путями проникновения в механику оптических (электродинамических) понятий и констант. Постоянная Планка, первоначально считавшаяся оптической константой, легла впоследствии в основу механики атома. Другая оптическая константа — скорость света, легла в основу макроскопической механики.

Общие исторические причины быстрого развития экспериментальной и теоретической физики в 90-е—900-е годы, причины развития классической электродинамики и ее основные этапы, зарождение и первоначальное развитие электронной теории — все это не будет здесь рассматриваться. Мы должны конкретно показать, как на основе общего подъема физики, развития электродинамики, ряда специальных экспериментов и применения нового математического аппарата зародилась и развивалась в 900-е годы теория относительности.

Как известно, теория относительности придала универсальное значение преобразованиям координат и времени при переходе от одной инерционной системы к другой, которые были найдены Лоренцом и которые Пуанкаре назвал «преобразованиями Лоренца». В 1887 г. Форт очень близко подошел к этим преобразованиям. В статье о принципе Допплера [1] он рассматривал колебания упругой несжимаемой среды, которые он отождествлял со светом. Таким образом, он рассматривал оптические проблемы с домаксвелловских позиций. Фогт исходит из уравнения колебаний упругой среды

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c^2 \Delta u, \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= c^2 \Delta v, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= c^2 \Delta w, \end{aligned} \tag{1}$$

а также из условия расходимости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

где u, v и w — компоненты вектора смещения, c — скорость распространения плоских волн.

[1] Voigt. Göttingen Nachrichten, 1887, S. 41.

Какие преобразования координат и времени,— спрашивает Фогт,— превращают решения волнового уравнения (1) снова в решение того же уравнения. Пользуясь современным языком, можно сказать, что Фогт ставит вопрос о ковариантности волнового уравнения. Он находит преобразования, удовлетворяющие этому требованию, выразив x, y, z и t через величины ξ, η, ζ, τ:

$$\xi = xm_1 + yn_1 + zp_1 - \alpha t,$$
$$\eta = xm_2 + yn_2 + zp_2 - \beta t,$$
$$\zeta = xm_3 + yn_3 + zp_3 - \gamma t,$$
$$\tau = t - (ax + by + cz).$$

Фогт определил коэффициенты этого преобразования; они совпадают с коэффициентами преобразований Лоренца для x, y и z, тогда как коэффициент для t отличается от преобразования Лоренца и равен у Фогта единице.

Далее Фогт рассматривает сферические волновые поверхности, которые «в точке x, y, z будут иметь такой вид, как будто светящаяся точка пребывала в точке, достигнутой в момент $t - r/c$». Покоящийся наблюдатель зафиксирует источник света в точке, где она находилась на r/c секунд раньше.

Заметка Фогта о принципе Допплера не была началом теории относительности. Домаксвелловская оптика допускала постановку вопроса о ковариантности волнового уравнения, позволяла найти преобразования координат и времени, относительно которых волновое уравнение ковариантно. Но не в этом заключается суть теории относительности, исторические предпосылки которой мы должны указать. Теория относительности — это физическая теория, придающая определенный физический смысл преобразованиям и математическим величинам. Но это было невозможно но основе теории упругого эфира. Развитие классической электродинамики от Максвелла до Лоренца было необходимой логической и исторической предпосылкой теории относительности. Именно поэтому домаксвелловские позиции Фогта исключали возможность релятивистской физической интерпретации. В последнем счете именно поэтому физики 80-х годов, в том числе и сам Фогт, не придали значение идеи ковариантности волнового уравнения. Тогда же, в 1887 г. Фогт написал большую работу о теории света для движущейся среды [2]. В ней говорится об эфире, не увлекаемом телами, но способном (в отличие от лоренцова эфира) самостоятельно двигаться, обсуждаются результаты опыта Майкельсона, но к проблеме ковариантности волнового уравнения Фогт не возвращается.

[2] Voigt. Göttingen Nachrichten, 8, 1887, S. 177.

Можно привести еще некоторые, пока отрицательные констатации, разъясняющие историческую связь теории относительности с классической электродинамикой. В литературе по истории новой физики часто подчеркивают историческую роль релятивистской критики ньютоновского абсолютного пространства. Но специальная теория относительности не покушалась на ньютоновское абсолютное пространство, и релятивистская критика этого понятия не могла иметь существенное значение для генезиса идей Лоренца, Пуанкаре и Эйнштейна. Это относится и к известным замечаниям Маха о ньютоновском абсолютном пространстве. Впрочем, и общая теория относительности по своему действительному смыслу не находится в идейной связи с релятивистской критикой абсолютного пространства, исходившей от защитников субъективной концепции пространства и времени.

Теперь мы можем перейти к позитивному изложению исторической связи между лоренцовой электродинамикой движущихся сред и теорией относительности. Само развитие классической электродинамики выходит за пределы этой статьи. Необходимо только изложить работы, послужившие переходом от электронной теории к теории относительности.

В 1892—1893 гг. Лоренц выдвинул гипотезу продольного сокращения размеров движущихся тел [3]. Независимо от него к этой же гипотезе пришел Фицджеральд, изложивший ее в своих лекциях. Уже после опубликования своей работы Лоренц узнал об идеях Фицджеральда из статьи Лоджа о проблеме аберрации [4]. Гипотеза называется обычно гипотезой Лоренца—Фицджеральда.

В своей известной книге, излагающей теорию электрических и оптических явлений в движущихся телах [5], Лоренц подверг глубокому анализу результаты Майкельсона. Он объяснил их с помощью гипотезы, высказанной в 1892—1893 гг., и изложил эту гипотезу в сравнительно полной и систематической форме.

Если бы плечо интерферометра, расположенное вдоль движения Земли (т. е. по параллели), укоротилось благодаря движению, это могло бы примирить отсутствие эфирного ветра с существованием неподвижного эфира. В самом деле, возникающее согласно гипотезе неподвижного эфира изменение путей двух лучей за счет движения Земли может компенсироваться соответствующим изменением пути лучей за счет укорачивания плеча интерферометра.

[3] Zittingsverlagen der Acad. V. Wot. te Amsterdam, 74, 1892—93

[4] Lodge. Phil. Trans., 184 A, 727, 1893.

[5] Lorentz G. Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden, 1895.

Возможность подобного изменения размеров тел при их движении относительно эфира вытекает из приравнивания молекулярных сил силам, действующим между заряженными частицами [6].

Лоренц применяет к молекулярным силам закон взаимодействия движущихся зарядов, сформулированный им в параграфе 23 цитированной книги, и получает сокращения, согласующиеся с результатами Майкельсона.

В 1904 г. Лоренц выступил со статьей «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света» [7]. Статья начинается констатацией: оптические и электродинамические явления, зависящие от величин порядка квадрата отношения скорости поступательного движения к скорости света c, не обнаруживают движения тел относительно эфира. К старым результатам Майкельсона, заставившим Фицджеральда и Лоренца выдвинуть гипотезу продольного сокращения, Лоренц присоединяет теперь результаты новых исследований: Рэлея [8], Брэса[9], а также Троутона и Нобла [10]. Эти результаты должны получить рациональное объяснение, и гипотеза сокращения открывает возможность этого.

Лоренц хорошо видит, что гипотеза сокращения, выдвинутая ad hoc только для объяснения новых экспериментальных данных, представится искусственной. Мысль о том, что отрицательные результаты Майкельсона должны быть выведены из общих принципов, была высказана Пуанкаре в его докладе на физическом конгрессе в 1900 г. [11] Присоединяясь в этом вопросе к Пуанкаре, Лоренц хочет лишить гипотезу сокращения ее искусственного характера, вывести продольное сокращение из основных уравнений электронной теории. Он вводит понятие местного времени и приходит к знаменитым преобразованиям координат и времени. Нужно отметить, что полным и строгим образом эта задача была решена Эйнштейном. Позднее, в 1912 г. в примечании к статье 1904 г. Лоренц писал:

«Можно заметить, что в этой статье мне не удалось в полной мере получить преобразования теории относительности Эйнштейна... Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего строго и точно действующего закона» [12].

---

[6] Сб. «Принцип относительности». М.—Л., ОНТИ, 1935, стр. 13.
[7] Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 6, 809, 1904.
[8] Phil. Mag., (6), 4, 678, 1902.
[9] Там же, 7, 317, 1904.
[10] Trans. Roy. Soc., A202, 165, 1903.
[11] Rapp. du Congrès de physique, 1. Paris, 1900, p. 22—23.
[12] Сб. «Принцип относительности». М.—Л., ОНТИ, 1935, стр. 22—23.

Из формул Лоренца можно получить преобразования

$$x \to x',\ y \to y',\ z \to z',\ t \to t'$$

в их современном виде:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Но инвариантность уравнений Максвелла относительно таких преобразований была доказана строгим образом только для пространства, лишенного зарядов. Лоренц не вполне правильно написал преобразования для плотности и скорости зарядов. Поэтому члены, входящие в уравнения Максвелла и содержащие плотность и скорость зарядов, в случае неподвижной системы отсчета несколько отличаются у Лоренца от соответствующих членов в уравнениях, преобразованных к движущейся системе. Лоренц рассматривает поэтому инерциальные системы XYZ и $X'Y'Z'$ как *приближенно* равноправные. Эйнштейн, исправив формулы Лоренца, показал строгую равноправность инерциальных систем — строгую инвариантность уравнений Максвелла при переходе от неподвижной системы к подвижной. Однако теория Лоренца отличается от теории относительности Эйнштейна не столько недостаточно полной и строгой формой преобразований $x \to x'$, $y \to y'$, $z \to z'$, $t \to t'$, сколько физической интерпретацией этих преобразований.

Интерпретация Лоренца говорит о сокращении продольных размеров в некоторой общей системе, единой для движущегося и неподвижного тел. В этой системе, связанной с неподвижным эфиром, размеры движущегося тела сокращаются в продольном направлении. Несмотря на всю смелость и неожиданность гипотезы сокращения, она не посягает на основы классической физики. Сокращение размеров движущихся тел так же мало противоречит последней, как, например, удлинение металлического стержня при нагревании. Подобно такому стержню, тело, движущееся в эфире со скоростью, сопоставимой со скоростью света, меняет свои линейные размеры, и это измене-

ние не зависит от координатной системы. Именно подобная независимость лоренцова сокращения от движущихся систем отсчета и имеется в виду, когда говорят о «действительности» или «реальности» сокращения. Такой характер лоренцова сокращения показывает, что речь здесь не идет о действительной и реальной независимости скорости света от инерционного движения. В теории Лоренца независимость скорости света от выбора инерциальной системы, постоянство скорости света во всех инерциальных системах — это феноменологический результат компенсирующих друг друга эффектов: изменения (возрастания) скорости света при движении относительно источника света и изменения (сокращения) пути, пройденного светом в интерферометре.

Принцип относительности в смысле строгой ковариантности законов электродинамики в отношении преобразований от неподвижной к движущейся инерциальной системе был высказан одновременно и независимо Эйнштейном и Пуанкаре. Статья Пуанкаре «О динамике электрона» [13] поступила в итальянский математический журнал Rendiconti del Circolo matematico di Palermo 23 июля 1905 г. Статья «К электродинамике движущихся тел» [14] была прислана Эйнштейном в Annalen der Physik тремя неделями раньше — 30 июня 1905 г. Судьба этих статей была различной. Впечатление от работы Эйнштейна было таким значительным, что физика — если иметь в виду взгляды ведущих теоретиков — сразу поднялась на новую ступень. Речь идет не только о новых физических идеях относительности, постоянства скорости света и т. д. Переворот произошел в самом стиле научного мышления.

Отсюда колоссальное историческое значение теории относительности Эйнштейна для культуры и науки. Научные теории XX столетия, *логически* не связанные с теорией относительности, связаны с ней *исторически* хотя бы потому, что новый стиль научного мышления, отказавшегося от традиционной наглядности, был необходимой предпосылкой, например, нерелятивистской квантовой механики. Судьба статьи Пуанкаре была иной. Ее почти не заметили, а затем вскоре забыли.

В 1907 г. Минковский в своей известной работе «Die Grundgleichungen für die electromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern» и затем в геттингенском докладе «Das Relativitätsprinzip» (1907) кратко отметил заслуги Пуанкаре в создании принципа относительности. Значительно позже, когда наступила пора подробного и систематического изложения теории относительности, Паули в своем исключительно полном обзо-

[13] Rend. Circolo mat. Palermo, XXI, 129, 1906.
[14] Ann. Physik, 17, 891, 1905.

ре литературы по теории относительности для «Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften» (1921)[15] указал основные пункты, в которых Пуанкаре пошел дальше Лоренца. Наконец, в русском издании сборника классических работ по теории относительности [16] статья Пуанкаре была опубликована с подробными комментариями.

Для истории физики существенный интерес представляет сопоставление судьбы и содержания статьи Пуанкаре с судьбой и содержанием статьи Эйнштейна.

Сравнительно простой вывод следует из тождества идей той и другой работы и совпадения публикаций во времени. Очевидна историческая детерминированность процесса научного развития, несводимость его к последовательности случайных взлетов научного гения. При всей своей очевидности такая точка зрения ставит новые и подчас сложные требования перед историей науки, толкает ее к анализу исторических взаимодействий между теоретической физикой, ее математическим аппаратом, достижениями экспериментального исследования, общим научным мировоззрением, прикладными проблемами, техникой, производством и т. д.

Работы Пуанкаре и Эйнштейна не только совпадают во времени. Они исходят из одной и той же физической проблемы, из одних и тех же экспериментов. Пуанкаре, как и Эйнштейн, исходит из результатов, к которым пришла экспериментальная (Майкельсон и др.) и теоретическая (Лоренц) электродинамика движущихся сред. Статья Пуанкаре называется «О динамике электрона» и начинается следующими строками:

«С первого взгляда кажется, что аберрация света и связанные с нею оптические и электрические явления дают нам средство для определения абсолютного движения Земли или, вернее, ее движения не по отношению к другим небесным телам, а по отношению к эфиру. Уже Френель пытался сделать это, но скоро обнаружил, что движение Земли не изменяет законов отражения и преломления. Аналогичные опыты, как, например, с трубой, наполненной водою, и все прочие, где принимаются в расчет только члены первого порядка относительно величины аберрации, дали лишь отрицательный результат, чему вскоре было найдено объяснение; но и Майкельсон, придумавший опыт, в котором становились уже заметными члены, зависящие от квадрата аберрации, в свою очередь, потерпел неудачу» [17].

Совпадение исходных физических проблем у Паункаре и Эйнштейна позволяет не ограничиваться общим заявлением

[15] В. Паули. Теория относительности. М.—Л., ГТТИ, 1947.
[16] Сб. «Принцип относительности». М.—Л., ОНТИ, 1935.
[17] Там же, стр. 51.

об исторической детерминированности теории относительности, а указать ее историческую основу — классическую электродинамику 90-х—900-х годов.

Более сложные вопросы встают при анализе различий в содержании и судьбе первых работ, утвердивших принцип относительности как строгий и общий принцип физики.

Пуанкаре в своей статье примыкает к воззрениям Лоренца: «результаты, полученные мной,— пишет он,— согласуются во всех наиболее важных пунктах с теми, которые получил Лоренц; я стремился только дополнить и видоизменить их в некоторых деталях...» [18]

Это замечание справедливо только в части собственно физических допущений. В части применяемых математических понятий Пуанкаре делает громадный шаг вперед по сравнению с Лоренцом. Он прежде всего вводит самый термин «преобразования Лоренца» и понятие ковариантности уравнений относительно этих преобразований, играющее такую важную роль в современной физике:

«Идею Лоренца можно резюмировать так: если возможно сообщить общее поступательное движение всей системе, без того, чтобы имели место какие-либо видимые изменения в явлениях, то это значит, что уравнения электромагнитного поля не изменяются в результате некоторых преобразований, которые мы будем называть преобразованиями Лоренца: две системы, одна неподвижная, другая перемещающаяся поступательно, представляют таким образом точное изображение одна другой» [19].

Что же касается гипотезы продольного сокращения, то Пуанкаре делает только одно существенное дополнение к идее Лоренца. Рассмотрев концепцию Ланжевена о неизменности объема электрона при продольном сокращении, Пуанкаре указывает на ее несовместимость с постулатом относительности и пишет:

«Следует поэтому вернуться к теории Лоренца; однако, если мы хотим сохранить ее, избегнув явных противоречий, необходимо допустить существование силы, объясняющей одновременно сжатие одной и постоянство двух других осей. Я пытался определить эту силу и нашел, что она может быть приравнена постоянному внешнему давлению, действующему на деформируемый и сжимаемый электрон, работа которого пропорциональна изменению объема этого электрона» [20].

Далее идет ряд глубоких и изящных построений, предвосхищающих во многом современный математический аппарат

[18] Сб. «Принцип относительности». М.—Л., ОНТИ. 1935, стр. 52.
[19] Там же, стр. 52—53.
[20] Там же, стр. 53.

теории относительности. Пуанкаре показывает, что преобразования Лоренца образуют группу в четырехмерном многообразии, вводит мнимую координату времени, рассматривает преобразования Лоренца как повороты в четырехмерном пространстве, находит инварианты таких преобразований, излагает четырехмерную интерпретацию принципа наименьшего действия, получает точные преобразования плотности тока, плотности заряда, напряженности электрического и магнитного поля. В сущности, Пуанкаре вплотную подходит к тензорному представлению переменных электромагнитного поля. Изложение Пуанкаре носит инвариантно-теоретический характер [21]. Пуанкаре увидел в теории инвариантов преобразований в четырехмерном многообразии наиболее мощный математический аппарат для разработки принципа относительности. Он не столько рассматривает изменения физических величин при переходе от одной инерциальной системы к другой и условия регистрации таких изменений (как это делает Эйнштейн), сколько устанавливает инварианты преобразований. Мы вернемся несколько позже к этой характерной и важной для историка особенности работы Пуанкаре.

Перейдем к названной выше статье Эйнштейна. Эйнштейн начинает ее обобщением большого числа экспериментов, относящихся к электромагнитным явлениям в движущихся средах. Он сразу же дополняет принцип относительности другим, собственно физическим принципом. Эйнштейн формулирует принцип относительности как электромагнитный и оптический принцип:

«...для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, имеют место те же самые электродинамические и оптические законы...» [22]. К высказанному принципу присоединяется собственно физическое допущение о постоянстве скорости света. «Эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречия электродинамику движущихся тел» [23].

Введя допущение о постоянстве скорости света, отнюдь не сводящейся к феноменологическому результату экспериментов, Эйнштейн может обойтись без эфира. У Лоренца и Пуанкаре феноменологический характер принципа относительности позволил сохранить одну привилегированную координатную систему, относительно которой движущееся тело обладало определенной скоростью, или, что то же самое, каждая

[21] Сб. «Принцип относительности». М.—Л., ОНТИ, 1935, стр. 367.
[22] Там же, стр. 134.
[23] Там же.

точка которой обладала скоростью относительно тела или волнового фронта. У Эйнштейна из *субстанциальной* физической посылки неизменной скорости света, не зависящей от движения источника света, вытекает субстанциальный характер самого принципа относительности. В природе нет скорости относительно эфира потому, что нет самого эфира. «Введение светоносного эфира,— пишет Эйнштейн,— окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится ни «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в которой протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости»[24].

Именно из этой субстанциальной относительности (в отличие от феноменологической невозможности определить эфирный ветер вследствие компенсирующих друг друга эффектов движения тела относительно эфира) вытекает неизбежный выход принципа относительности за пределы электродинамики. Если скорость света одна и та же в различных инерциальных системах *субстанциально* (а не так, как у Лоренца, т. е. не только при опытах, в которых абсолютное изменение скорости компенсируется абсолютным изменением длины плеча интерферометра), то, очевидно, варьируются, меняются, преобразуются при переходе от одной системы к другой пространственные и временные масштабы. Это заставляет пересмотреть основы механики и физики в целом. Таким образом, представление о субстанциальной относительности и было пунктом перехода к новой физической картине мира.

Прежде всего оно потребовало нового представления об одновременности. В первом параграфе своей статьи Эйнштейн анализирует понятие одновременности и вводит понятие «времени покоящейся системы», т. е. собственного времени. Далее, во втором параграфе, Эйнштейн рассматривает изменение пространственных и временных масштабов при движении системы. Третий параграф называется: «Теория преобразования координат и времени от покоящейся системы к системе, находящейся в равномерном поступательном движении относительно первой». Здесь вводятся соотношения, за которыми в физике закрепилось название, данное им Пуанкаре, т. е. «преобразования Лоренца».

Вторая часть статьи Эйнштейна посвящена электродинамике. Ниже мы изложим выводы Эйнштейна, касающиеся механики и электродинамики в более систематической форме. Сейчас перейдем к работам Минковского.

---

[24] Сб. «Принцип относительности». М—Л., ОНТИ, 1935, стр. 134.

Герман Минковский в 1907—1908 гг.[25] придал теории относительности Эйнштейна чрезвычайно стройную и изящную форму. Минковский исходит из следующих существенных констатаций. Прежде всего, если заменить время t мнимой величиной $u = ict$, то в преобразованиях Лоренца координаты времени и пространственные координаты окажутся формально симметричными. Поэтому во всех законах природы, которые не меняются при преобразованиях Лоренца, время и пространство будут вести себя одинаковым образом. В самом деле, инвариант группы Лоренца $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ переходит в $x^2 + y^2 + z^2 + u^2$. Таким образом, u эквивалентно другим пространственным координатам, и все их можно обозначить общим символом x_ν, где $\nu = 1, 2, 3, 4$.

Минковский предлагает приписывать реальность лишь четырехмерному пространственно-временному миру. Он называет это четырехмерное многообразие «абсолютным миром» или просто «миром», события именует «мировыми точками», а четырехмерные кривые, представляющие изменения временных и пространственных координат,— «мировыми линиями».

Инвариант преобразований Лоренца — квадратичная форма координат. Поэтому его можно по аналогии с трехмерной геометрией называть квадратом четырехмерного расстояния мировой точки от начала координат. Таким образом, в четырехмерное многообразие вводится мероопределение, аналогичное эвклидовой геометрии. Преобразования Лоренца можно рассматривать как ортогональные линейные преобразования мировых координат и как мнимые вращения этих координат в плоскостях x_1x_4, x_2x_4 или x_3x_4.

В сущности, указанные обстоятельства, замеченные Минковским, открывают дорогу к применению в теории относительности четырехмерного векторного и тензорного исчисления. Обычная теория векторов и тензоров является теорией инвариантов линейного ортогонального преобразования трехмерных координат. Соответственно теория инвариантов преобразований Лоренца может быть выражена в виде четырехмерного векторного и тензорного исчисления. Эта идея четырехмерного обобщения векторного и тензорного исчисления, содержавшаяся в работе Минковского, получила развитие в работе Зоммерфельда, опубликованной в 1910 г.[26]

---

[25] H. Minkowski. Das Relativitätsprinzip (доклад, прочитанный в Гетингене в 1907 г.). Ann. d. Phys., 47, 927, 1915; Die Grundleichungen für die Elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. Gött. Nachrichten, S. 53, 1908; Raum und Zeit (доклад, прочитанный в Кельне в 1908 г.). Phys. Zeitschr., 10, 104, 1909. Перевод см. в сб. «Принцип относительности», М.—Л., ОНТИ, 1935, стр. 181—203.

[26] Ann. d. Phys., 32, 749, 1910; 33, 649, 1910.

Мы видим, что физический и философский смысл ковариантности уравнений относительно координатных преобразований состоит в независимости объективных закономерностей мира от методов их изучения, независимости физических объектов от способов их измерения. Поэтому для последовательного выявления объективности научных закономерностей поиски новых инвариантов и новых, более общих групп преобразований представляют собой основной объект изучения. В этом отношении история теории относительности представляет существенный методологический интерес для истории физики в целом. Нахождение новых, более точных преобразований, в отношении которых физические законы должны быть ковариантными, всегда являлось началом нового периода в развитии физической теории. Далее, в пределах начавшегося периода, требование ковариантности относительно найденных преобразований становится основным эвристическим требованием. После того как Эйнштейн объявил лоренц-ковариантность основным эвристическим требованием к физическим уравнениям, теоретическая физика в продолжение долгого времени развивалась по пути соответствующей переформулировки своих исходных уравнений. Таким образом была создана релятивистская механика точечных масс и сплошных сред и релятивистская электродинамика. Они содержались уже в в статье 1905 г., но более современную форму приняли в позднейших работах.

В 1921 г. Эйнштейн изложил специальную и общую теорию относительности в лекциях, прочитанных в Принстонском университете. Лекции были изданы в 1922 г. и затем несколько раз издавались под названием «Meaning of Relativity» [27], причем к каждому новому изданию Эйнштейн присоединял очерки, содержавшие новые идеи, развивавшие первоначальную теорию. Впрочем, приложения к книге и вообще упомянутые новые концепции относились к общей теории относительности. Специальная теория относительности в принстонских лекциях была изложена в сравнительно законченной форме, если не считать применения ее к различным областям науки, непрерывно развивающегося до настоящего времени.

В работе «Сущность теории относительности» Эйнштейн пользуется новыми, по сравнению со статьей 1905 года, понятиями, введенными Минковским и отчасти Зоммерфельдом. Эйнштейн говорит о реальности четырехмерного континуума и об абстрактном характере пространства и времени, взятых порознь.

---

[27] См. русский перевод с изд. А. А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, М. 1955.

«Физической реальностью обладают не точка пространства и не момент времени, когда что-либо произошло, а только само событие. Нет абсолютного (независимого от пространства отсчета) соотношения в пространстве и нет абсолютного соотношения во времени, но есть абсолютное (независимое от пространства отсчета) соотношение в пространстве и времени» [28].

Однако из неразделимости пространства и времени не следует их эквивалентность. Эйнштейн напоминает об этом, ссылаясь на различную роль пространственных и временных координат в основных физических уравнениях теории относительности. Уравнение распространения света

$$r = c\Delta t,$$

где r — расстояние между движущимися точками, если его возвести в квадрат и выразить r^2 через разности координат Δx_ν, дает

$$\sum_{\nu=1}^{4} (\Delta x_\nu)^2 - c^2 \Delta t = 0.$$

Ковариантность этого уравнения соответствует инвариантности скорости света при лоренцовых преобразованиях — переходах от одной инерциальной системы к другой. В написанное выражение время входит со знаком минус и с множителем c, а пространство — со знаком плюс. Если ввести новые единицы времени, заменить время t величиной $l = ct$, то ковариантное уравнение примет вид

$$\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 - \Delta l^2 = 0.$$

Далее, как это предложил Минковский, вместо вещественной координаты $l = ct$ вводится мнимая координата $x_4 = il = ict$. Тогда уравнение распространения света приобретает вид

$$\sum_{\nu=1}^{4} \Delta x_\nu^2 \equiv \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2 = 0.$$

Условием ковариантности этого уравнения является инвариантность величины

$$S^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2$$

[28] А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, 1955, стр. 30.

относительно преобразований Лоренца. Чтобы это условие выполнялось, преобразования Лоренца должны быть линейными преобразованиями:

$$x'_\mu = a_\mu + \sum_{\alpha=1}^{4} b_{\mu\alpha} x_\alpha.$$

Отсюда видно, что преобразования Лоренца представляют собой четырехмерный аналог сдвигов и вращения в обычном евклидовом пространстве. Различие — в условиях вещественности, поскольку x_4 представляет собой мнимую координату.

Эйнштейн рассматривает сначала преобразование Лоренца для индексов $\nu = 1$ и $\nu = 2$, т. е. случай преобразования только двух координат x_1 и x_2. Это — пространственное вращение координат вокруг оси x_3. Преобразование Лоренца для индексов $\nu = 1$ и $\nu = 4$, так называемое частное преобразование Лоренца, представляет собой вращение четырехмерной координатной системы на мнимый угол.

В поисках физического содержания этого преобразования Эйнштейн приходит к лоренцову сокращению масштабов и замедлению хода часов в движущихся системах. Затем он доказывает релятивистскую теорему сложения скоростей. Комбинация двух частных преобразований Лоренца со скоростями v_1 и v_2, т. е. двух поворотов системы на мнимые углы ϕ_1 и ϕ_2, дает результирующее преобразование

$$v_{12} = i \operatorname{tg}(\phi_1 + \phi_2) = i \frac{\operatorname{tg}\phi_1 + \operatorname{tg}\phi_2}{1 - \operatorname{tg}\phi_1 \operatorname{tg}\phi_2}.$$

После этого Эйнштейн излагает идею пространственноподобных и времениподобных интервалов и светового конуса. Основа теории инвариантов специальной теории относительности — это инвариант

$$S^2 = \sum \Delta x_n = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2,$$

который рассматривается как четырехмерное «расстояние» между двумя событиями — «мировыми точками». Если $S^2 = 0$, это не значит еще, что мировые точки совпадают. Они лежат на четырехмерном конусе $S^2 = 0$. Если опустить одно пространственное измерение — ось x_3, то такой конус можно представить приведенным чертежом (рис. 3). В верхней половине конуса находятся мировые точки, в которые может быть послан сигнал из P, в нижней — мировые точки, из которых он может быть послан в P. Внутри конической поверхности $S^2 = 0$ — мировые точки, соединенные интервалом, квадрат которого

отрицателен $S^2<0$. Такой интервал называется времениподобным, он разделяет положения точки, движущейся со скоростью меньшей, чем скорость света. Точки, лежащие вне светового конуса, соответствуют разобщенным в этом смысле событиям; можно найти систему отсчета, в которой эти события одновременны. Интервал между ними называется пространственноподобным. Его квадрат положителен: $S^2>0$.

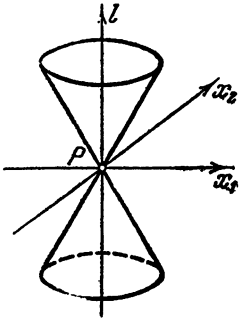


Рис. 3

Напомнив читателю эти понятия, Эйнштейн переходит к тензорному представлению физических величин. Здесь для комментатора-историка обязательна оговорка. Тензорное исчисление, созданное Риччи и Леви-Чивитта на рубеже XIX и XX в. и получившее свое современное название в работе Эйнштейна по общей теории относительности, не связано со специальной теорией относительности непосредственно, как это было в случае четырехмерной псевдоевклидовой геометрии. Историческая связь здесь весьма опосредствованная. Специальная теория относительности дала толчок четырехмерному представлению физических процессов. Тем самым специальная теория относительности вплотную подошла к тензорному представлению: «Введя мнимую временную координату $x_4 = il$, Минковский сделал теорию инвариантов для четырехмерного континуума физических явлений полностью подобной теории инвариантов для трехмерного континуума эвклидова пространства. Исчисление четырехмерных тензоров специальной теории относительности отличается от тензорного исчисления в трехмерном пространстве только числом измерений и условиями вещественности» [29].

С другой стороны, обобщение специальной теории относительности вызвало к жизни современную форму тензорной алгебры и особенно — тензорного анализа. После этого специальная теория относительности излагалась в современной форме.

Эйнштейн вводит понятие четырехмерного вектора («4-вектора») — физической величины, которая в произвольной инерциальной системе отсчета $X_1X_2X_3X_4$ задана четырьмя числами A_μ, причем эти числа — компоненты 4-вектора по соотношениям вещественности и законам преобразований соответствуют величинам Δx_ν. Очевидно, 4-вектор может быть времениподоб-

[29] А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, 1955, стр. 37.

ным и пространственноподобным. Далее вводится понятие четырехмерного тензора второго, третьего и четвертого рангов. Четырехмерный тензор второго ранга определяется как шестнадцать величин $A_{\mu\nu}$, преобразующихся по закону

$$A'_{\mu\nu} = b_{\mu\alpha}\, b_{\nu\beta}\, A_{\alpha\beta},$$

т. е. как произведения компонент двух 4-векторов. Алгебра четырехмерных тензоров аналогична алгебре трехмерных тензоров.

Эйнштейн рассматривает антисимметричный тензор в четырехмерном пространственно-временном континууме. В таком антисимметричном тензоре — только шесть независимых компонент. Именно столько независимых величин в максвелловских уравнениях. Если электромагнитное поле описывать антисимметричным тензором, то уравнения Максвелла приобретают вид тензорных уравнений; они поэтому ковариантны относительно лоренцовых преобразований. В результате этого классическая электродинамика приобретает более стройный вид, не меняясь по существу (в этом нет ничего удивительного: теория относительности, примененная к электродинамике, возвращает ей то, что от нее же получила). «Прогресс в методе, которым электродинамика обязана специальной теории относительности, заключается главным образом в уменьшении числа независимых гипотез» [30].

Разумеется, четырехмерная запись классической электродинамики имеет существенное историческое значение. Она раскрыла новые, ранее неизвестные соотношения и была предпосылкой дальнейшего развития электродинамики.

В релятивистской электродинамике раздельное существование электрического и магнитного полей становится относительным. Если в одной системе данное поле является только электрическим, то в другой системе оно обладает магнитными компонентами. Наоборот, если в системе K поле представляется только магнитным, то в системе K' существует и электрическое поле. Оно действует на заряд, покоящийся относительно K'. Такое действие в системе K будет силой Био — Савара или лоренцовой электродвижущей силой. Она объединена в релятивистской электродинамике с напряженностью электрического поля. Подобное объединение выражается существованием четырехмерного вектора k_μ, три компоненты которого — составляющие пондеромоторной силы, действующей на единичный объем, а четвертая компонента — работа, производимая полем в единичном объеме.

[30] А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, 1955, стр. 39.

Из существования 4-вектора K_μ следуют фундаментальные выводы, относящиеся к понятиям массы и энергии. Эйнштейн вводит понятие четырехмерного вектора энергии — импульса и далее с его помощью выводит знаменитое уравнение

$$E_0 = mc^2$$

и изменение массы с изменением энергии тела. Экспериментальным подтверждением этого вывода явились, как известно, наиболее крупные достижения физики атомного ядра.

Четырехмерная трактовка законов сохранения импульса и энергии для электромагнитного поля привела Эйнштейна к чрезвычайно важному понятию тензора энергии $T_{\mu\nu}$.

Эйнштейн показал применительно к электромагнитному полю, что энергия единицы объема имеет тензорный характер. Затем он приписал указанному факту универсальное значение. В этой части специальная теория относительности подошла к некоторым и поныне не решенным вопросам. Уравнения Максвелла указывают переменные электромагнитного поля при данном распределении зарядов и токов и из них нельзя вывести само распределение зарядов, иными словами, найти причины, от которых зависит корпускулярное распределение электричества в природе, существование элементарных частиц с определенными размерами и зарядами. Заметим, что Эйнштейн относился скептически к попыткам решить указанную задачу на основе представления о заряженных частицах как сингулярностях. «На мой взгляд, однако,— пишет он,— это означает отказ от действительного выяснения строения вещества. Мне кажется, что куда лучше сознаться в нашей нынешней несостоятельности, чем удовлетворяться кажущимся решением» [31].

Распределение электричества в пространстве, зависящее, вообще говоря, от неизвестных пока законов, задается тензором энергии $T_{\mu\nu}$, полное выражение которого известно нам во всем пространстве, за вычетом пространства, занятого заряженными частицами. В этих областях

$$\frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0.$$

Эйнштейн предполагает, что не только в случае электромагнитного поля, но и во всех случаях распределение энергии в пространстве задается симметричным тензором $T_{\mu\nu}$. Из такого предположения выводится новое выражение для

[31] А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, 1955, стр. 47.

законов сохранения импульса и энергии. Эйнштейн иллюстрирует найденные им соотношения, рассматривая уравнения гидродинамики.

Таково, в самом беглом изложении, содержание позднейшей работы Эйнштейна, систематически раскрывающей смысл специальной теории относительности. Оно, разумеется, известно читателю, и мы напомнили его только для того, чтобы сделать более явственной одну характерную особенность развития теории. Перед нами теория, оперирующая тензорными уравнениями, использующая понятия четырехмерных векторов и тензоров и представляющая собой теорию инвариантов некоторой группы преобразований.

Теория разработана в чисто эрлангенском духе: Эйнштейн определяет некоторую физическую теорию инвариантными физическими величинами (среди них исходным инвариантом служит четырехмерное расстояние ds), подобно тому как Клейн в своей эрлангенской речи определил характер каждой геометрии ее инвариантами. При подобном четырехмерно-тензорном и теоретико-инвариантном построении теории у нас не появляется впечатления формальности и сомнения в физической содержательности теории. Все дело в том, что теория исторически выросла на базе чисто физического утверждения о субстанциальной неизменности скорости света.

На этом следует остановиться подробно.

Исторический анализ генезиса специальной теории относительности тесно связан с логическим анализом этой теории и ее физическим истолкованием. Теория относительности Эйнштейна отличается от предшествовавшей ей гипотезы продольного сокращения более общим характером исходных постулатов. Это несомненное обстоятельство дает повод для неправильной, на наш взгляд, априорно-логической трактовки теории относительности Эйнштейна. Когда оптические и электродинамические эксперименты показали, что прямолинейное и равномерное движение системы не оказывает влияния на скорость распространяющегося в ней света, Лоренц выдвинул гипотезу продольного сокращения масштабов тел, движущихся относительно эфира. Такая гипотеза вместе с введенным Лоренцом понятием местного времени позволила объяснить экспериментальные данные, не отказываясь от классического эфира — заполняющей все пространство неподвижной среды. Логическим недостатком гипотезы была ее искусственность, она была выдвинута *ad hoc* и не вытекала из более общих соображений. Эйнштейн представил лоренцово сокращение как результат относительного движения двух равноправных систем, отказавшись от понятия эфира. Впоследствии Минковский вывел теорию относительности из некоторых соображений

о четырехмерном мире пространственно-временных событий. Теория относительности приобрела стройный вид, она связывает лоренцово сокращение с более общими принципами и представлениями.

Значит ли это, что теория относительности Эйнштейна была логическим выводом из априорной идеи относительности пространства — времени? Нет, она была результатом определенных, исторически детерминированных экспериментальных открытий, она появилась и развивалась под влиянием определенных эмпирических данных, заставлявших конкретизировать, пересматривать, обобщать старые представления. Теоретическая физика связана со своими экспериментальными истоками нелинейным образом: получив некоторый импульс со стороны экспериментальной практики, теория обладает «свободным пробегом», она развивается дальше, опираясь на чисто теоретический, в особенности математический, анализ, позволяющий увидеть первоначально скрытые соотношения и связи. В существовании такого «свободного пробега», иначе говоря, в существовании внутренних закономерностей развития теоретической физики нет ни малейшего намека на внеопытное априорное познание мира: общность и мощность математического аппарата и абстрактных понятий теоретической физики — результат всей практики и всей экспериментальной науки в целом.

При несомненном наличии «свободного пробега» действительными ступенями исторического развития теоретической физики служат конкретные задачи, поставленные экспериментом. Как бы ни были важны новые, все более общие, изящные и строгие математические понятия и методы, с помощью которых излагается и обосновывается новая физическая теория, началом ее служат новые, *собственно физические* понятия, введенные в науку. Как же следует понимать этот термин?

Сравним теорию относительности в той форме, в какой она была высказана Эйнштейном, с теорией относительности, сформулированной Минковским. Минковский исходил из реальности четырехмерного пространственно-временного мира, из евклидова характера четырехмерной геометрии, описывающей этот мир, и без такой интерпретации специальная теория относительности не могла бы стать мостом к еще более широким обобщениям. Но идеи Эйнштейна и идеи Минковского *физически эквивалентны.* Необходимо отличать друг от друга подобные физически эквивалентные, физически совместимые математические «формализмы» и собственно физические концепции, объясняющие тот или иной результат эксперимента.

Чтобы яснее определить эти понятия, можно воспользоваться аналогией с некоторыми понятиями самой теории относительности. Физический объект, независимый от того или иного метода измерения, от выбора той или иной координатной системы, характеризуется некоторыми *инвариантными* скалярными величинами. Вместе с тем мы можем получить различные в зависимости от выбора системы отсчета координатные представления этого объекта. Переход от одного координатного представления к другому оставляет инвариантными некоторые величины, характеризующие объект, и это демонстрирует независимость физического объекта от его познания. Теория относительности утверждает, что четырехмерный интервал ds — инвариантная величина, связанная с меняющимися координатами x_μ соотношением

$$ds^2 = \sum g_{\mu\nu}\, dx_\mu\, dx_\nu,$$

где $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$, $g_{44} = 1$ и $g_{\mu\nu} = 0$ при $\mu \neq \nu$ в случае специальной теории относительности, и соотношением

$$ds^2 = \sum g_{\mu\nu}\, dx_\mu\, dx_\nu,$$

где $g_{\mu\nu}$ — функция координат в случае общей теории относительности.

Перейдем от самой теории относительности к связанным с ней историко-логическим вопросам. Мы можем представить некоторую физическую теорию различным образом с помощью различных «формализмов». При переходе от одного «формализма» к другому, например при переходе от «наблюдателей» Эйнштейна к четырехмерным геометрическим построениям Минковского, остаются инвариантными некоторые утверждения теории.

Вехами исторического развития физики должны быть не переходы к новым «формализмам» (формальные преобразования), а более общие исторические преобразования в физике, изменяющие само физическое содержание теории, содержание, независимое от «формализмов».

Каждому собственно физическому (т. е. независимому от «формализмов») утверждению соответствует особое деление физических величин на абсолютные и относительные, т. е. какой-то определенный принцип относительности. В классической механике абсолютными понятиями служат пространственные размеры жесткой системы и интервалы времени. Соответственные величины оказываются инвариантами координатных преобразований — переходов от одной координатной

системы к другой. Относительными здесь являются скорости. В теории Лоренца инвариантно время распространения света в инерциальных системах (изменения скорости компенсируются изменениями продольных размеров). В специальной теории относительности Эйнштейна абсолютный характер приписывается скорости света. В этом выражается новое собственно физическое содержание теории Эйнштейна по сравнению с теорией Лоренца. Указанную сторону дела и нужно принимать в расчет, когда речь идет о *генезисе* специальной теории относительности.

Эйнштейн был создателем новой физической теории потому, что он установил инвариантность некоторой физической величины (скорости света), считавшейся до того зависимой от выбора координат, и относительность, зависимость от координатной системы других величин, считавшихся до того инвариантами координатных преобразований.

При этом Эйнштейн установил, как мы видели, субстанциальную инвариантность скорости света, ее действительное, независимое от опыта (например, от компенсирующего изменение скорости изменения длины продольного плеча интерферометра) постоянство. Такое физическое открытие привело к *новому делению физических величин на абсолютные и относительные, т. е. к новому принципу относительности.*

Феноменологический релятивизм Лоренца не может быть в этом смысле *новым* релятивизмом по сравнению с классическим. Оптический принцип относительности Лоренца оперирует феноменологическими понятиями. Под наблюдаемой относительностью, т. е. независимостью скорости света от движения его источника, таится скрытое компенсацией противоположных эффектов абсолютное движение. Конечно, у Лоренца отсутствует кинетически непредставимое абсолютное движение, не требующее никаких тел отсчета, речь идет о кинетически представимом движении относительно эфира, понятии, которое не является априорно порочным и может быть опровергнуто лишь экспериментом. Но так или иначе, у Лоренца фигурировали: феноменологическая оптическая (электродинамическая) относительность и субстанциальная механическая относительность (принцип относительности Галилея — Ньютона). Они не противоречили друг другу. Поэтому теория Лоренца и не требовала радикального отказа от основ классической механики. У Эйнштейна субстанциальная, не ограничивающаяся оптическими эффектами инвариантность скорости света противоречила принципу относительности Галилея — Ньютона. На первый взгляд, теория Эйнштейна была переносом *общего* принципа относительности на новый ряд явлений. В действительности такой перенос означал пересмотр старого *конкрет-*

ного принципа относительности — классического принципа относительности Галилея — Ньютона.

Взглянем с этой точки зрения на работы Пуанкаре, и тогда, может быть, станет ясной историческая причина незначительности влияния, которое оказала эта гениальная работа на физику непосредственно после своего появления, и незначительной роли релятивистских идей в последующем научном творчестве Пуанкаре. Формализм четырехмерных преобразований, изложенный в статье Пуанкаре, опередил *математические* построения Эйнштейна и даже Минковского. Но в первую очередь он опередил *физические* построения самого Пуанкаре. В этом все дело. Пуанкаре стоит на классических позициях в своих физических воззрениях, для него невозможность зарегистрировать эфирный ветер — результат условий эксперимента и наблюдений, а не субстанциального отсутствия такого ветра. Поэтому «постулат относительности» Пуанкаре не противоречит принципу относительности Галилея — Ньютона и преобразования Лоренца не противоречат преобразованиям Галилея. У Пуанкаре нет убеждения в том, что в общем случае преобразования Лоренца являются более точным представлением движения, чем преобразования Галилея. Раз так, то вся генильно стройная теория инвариантов лоренцовых преобразований остается формальной.

Эйнштейн в 1905 г. не исходил из четырехмерных инвариантов преобразований Лоренца как первого звена физических рассуждений. Он рассматривал, как изменяются различные величины и какие физические понятия соответствуют этим величинам. В конце концов он приходит к инвариантным выражениям. Логически можно было начать разработку теории относительности с любого пункта, но исторически именно такое начало могло дать наиболее сильный толчок теоретической мысли в физике. Только *после* того как мысль Эйнштейна о субстанциально постоянной скорости света вошла в науку, после того как на этой основе в работах Минковского идея четырехмерной псевдоевклидовой геометрии приобрела определенную физическую интерпретацию,— только после этого выдвинутая Пуанкаре концепция инвариантов преобразований Лоренца могла быть разработана как собственно физическая теория.

Приведем одну историческую параллель. На заре квантовой механики, в 1925—1926 гг. в работах Гейзенберга и Шредингера рассматривались (это стало ясно впоследствии) различные — по терминологии Дирака — «представления» неклассического объекта, связанные с качественно различными сериями экспериментов. Шредингер рассматривал, как изменяются при переходе от одного «представления» к другому

состояния квантовой системы. Гейзенберг рассматривал, как при этом изменяются *динамические переменные*. Оба они исходили из изменений физических величин [32].

В противоположность им, Дирак и Иордан исходили из теории инвариантов преобразований от одного «представления» к другому. Но стройная математическая теория Иордана и Дирака могла получить в сравнительно короткий срок физическую интерпретацию потому, что ей предшествовали глубоко физические, отнюдь не формальные построения де-Бройля, Шредингера, Гейзенберга, Борна, Дирака, Фока и других.

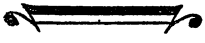
Когда Пуанкаре создал теорию инвариантов преобразований группы Лоренца, еще не была известна собственно физическая теория субстанциального постоянства скорости света (она содержалась в рукописи, присланной молодым инженером цирюхского бюро патентов в «Annalen der Physik»). Была известна феноменологическая теория неизменности скорости света, и Пуанкаре разделял основную мысль этой теории. Она не могла быть физическим эквивалентом теории инвариантов преобразований Лоренца. В существенном разрыве между опередившим Эйнштейна и Минковского математическим аппаратом и отставшим от них физическим содержанием работы Пуанкаре и состояла действительная причина судьбы этой работы.

Из всего сказанного о генезисе специальной теории относительности вытекают некоторые замечания о ее дальнейшем развитии. Со стороны математической формы генезис специальной теории относительности состоял в открытии преобразований Лоренца и инвариантов этих преобразований. Дальнейшее развитие должно было состоять, во-первых, в последовательных поисках новых инвариантов преобразований Лоренца, т. е. в применении эвристического принципа специальной теории относительности, во-вторых, в открытии более общей группы преобразований, относительно которых ковариантны физические законы, т. е. в отыскании нового эвристического принципа теоретической физики. Вторая задача была решена в 1916 г. созданием общей теории относительности. Решение первой задачи и представляет собой развитие специальной теории относительности. История физики в течение всей первой половины нашего столетия показывает, что это развитие отнюдь не было простым результатом математических операций, что современное содержание специальной

---

[32] См. П. Дирак. Предисловие к первому английскому изданию «Основ квантовой механики»; русский перевод: Основы квантовой механики. Л.—М., ОНТИ, 1937, стр. 8.

теории относительности не могло быть выведено логически и математически из первоначальных идей. Если в первой четверти века теория относительности опиралась на ранее сделанные эксперименты, то во второй четверти века положение изменилось. Сейчас релятивистская квантовая механика и теория квантованных полей являются основным полем применения, подтверждения и развития специальной теории относительности, она базируется на открытиях в области микромира, в области атомов, атомных ядер и особенно — элементарных частиц. Физический, неформальный характер развития специальной теории относительности находится в полном соответствии с ее генезисом, в котором решающая роль принадлежала физической констатации субстанциальной инвариантности скорости света.



Д. Д. Иваненко

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Общая теория относительности, созданная в 1916 г., давно уже является необходимой главой современной физики, посвященной пониманию важнейших явлений, и представляет собой закономерную часть научного мировоззрения. Однако развитие ее во многих отношениях еще нельзя считать законченным. Вследствие этого она принадлежит не только истории науки, но и физике наших дней, в противоположность, например, специальной теории относительности, дальнейшая разработка которой связана уже с применением к новым областям науки. Сама же специальная теория относительности является законченной. В частности, рассматриваемая нами сейчас общая теория относительности во многих отношениях представляет собой обобщение специальной теории.

Как постепенно выяснилось, общая теория относительности явилась синтезом релятивистски обобщенной ньютоновой теории тяготения, теории искривленного четырехмерного пространства — времени и, наконец, обобщения принципа относительности равномерных движений на движения ускоренные. Очевидно, что подобный грандиозный синтез не мог быть реализован на базе существовавших ранее представлений о пространстве, времени и движении, но должен был потребовать коренной ломки многих понятий, а вместе с тем привлечения добавочных математических средств.

К предыстории общей теории относительности следует отнести отдельные попытки обобщения ньютоновой теории тяготения, сделанные в XVIII и XIX вв., замечания о тяготении, высказанные Пуанкаре в его классических работах по специальной теории относительности (1905) и, наконец, забытое указание Зольднера об искривлении лучей света в поле тяготения звезд благодаря притяжению, например,

к Солнцу. Фундаментом общей теории относительности является специальная теория относительности, в особенности в том виде, какой придан ей в четырехмерной интерпретации Минковского (в развитие замечаний Пуанкаре), и вместе с тем геометрические работы Лобачевского, Бóяи, Римана и других математиков XIX в. В особенности следует подчеркнуть смелые идеи Лобачевского, который, не удовлетворившись созданием первой неевклидовой геометрии для пространства, обладающего постоянной отрицательной кривизной, пытался астрономическим путем обнаружить наличие искривления у реального физического пространства. Попытки эти не могли еще в то время привести к успеху. Новым вспомогательным формализмом общей теории относительности явился тензорный анализ, развитый Риманом, Кристоффелем и другими и кодифицированный в 1900 г. итальянскими математиками Риччи и Леви-Чивита под названием (ныне оставленным) «абсолютного дифференциального исчисления». Персонально же общая теория относительности явилась созданием одного Эйнштейна, который лишь в некоторых случаях обращался за содействием к Фоккеру и М. Гроссману. Это — факт необычный для науки XX в., столь богатой примерами коллективной разработки проблем. Его можно объяснить тем, что перед физикой того времени (1905—1916) стояли в первую очередь крайне актуальные проблемы построения квантовой теории атома, тогда как не сулившие никаких реальных результатов вопросы тяготения и обобщения специального принципа относительности, к тому же явно требовавшие овладения новым сложным математическим аппаратом, не привлекали почти ничьего внимания, если не считать отдельных работ Абрагама, Нордстрема и немногих других авторов. После же установления общей теории относительности (1916) и первого фундаментального подтверждения ее предсказаний в 1919 г., в анализе основных понятий теории, в отыскании решений, в разнообразной астрономической проверке, обобщении на космологические вопросы, в попытках построения геометризованной единой теории поля и в построении квантовой теории гравитации участвовали и участвуют большое число ученых разных стран.

В этом отношении история создания общей теории относительности значительно отличается от установления специальной теории относительности. Как известно, во второй половине XIX в. и в 900-х годах разработкой электродинамики движущихся тел, являвшейся одной из важнейших проблем, находившихся на главной линии развития науки, занимались многие ученые (Максвелл, Герц, Кон, Лармор и другие). Среди них первенствующее положение постепенно заняли Лоренц

и Пуанкаре, которые фактически и заложили основы новой теории. Наконец, Эйнштейн сформулировал ее наиболее ясно, не будучи, подобно Лоренцу, отягощен старыми гипотезами об эфире или философскими сомнениями Пуанкаре, который, согласно духу своей кондиционалистской, идеалистической методологии, представил новый «постулат относительности» только как возможную рабочую гипотезу.

Следует с самого начала подчеркнуть одно характерное и на первый взгляд удивительное обстоятельство. Общая теория относительности, знаменуя коренной, можно сказать эпохальный, переворот в наших взглядах на пространство — время — тяготение, вместе с тем не имеет до сих пор никакого, даже самого малейшего технического значения; ее выводы ничего не меняют также в картине элементарных частиц, атомных ядер, атомов, молекул, твердых тел и т. д. Она никак не связана с явлениями обыденной жизни. Поправки, которые она вносит в закон тяготения Ньютона, совершенно ничтожны, и до сих пор общая теория относительности могла быть проверена лишь астрономическим путем и притом только в трех случаях. Во-первых, она объясняет незначительное вращение перигелия или осей орбиты Меркурия на 43″ за столетие, ранее бывшее непонятным в теории планет, основанной на ньютоновских законах движения и тяготения. Во-вторых, общая теория относительности предсказывает небольшой сдвиг к красному концу спектральных линий, испускаемых в условиях интенсивного поля тяготения, например в звездах, что и было подтверждено в 20-х гг. наблюдениями спектра сверхплотного спутника Сириуса. В-третьих, общая теория относительности предсказывает отклонение лучей света, распространяющихся в поле тяготения; в частности, в случае прохождения света от звезд вблизи поверхности Солнца это отклонение равняется 1″75. Иначе говоря, положение звезды, наблюдаемой во время полного солнечного затмения, представляется сдвинутым на указанную небольшую величину. Обнаружение этого, весьма незначительного «эффекта Эйнштейна» во время наблюдения солнечного затмения 1919 г. английской экспедицией на о-ве Принчипе (у Зап. Африки), организованной Эддингтоном, вызвало подлинную сенсацию не только в научном мире, но и в самых широких кругах и было справедливо воспринято, как фундаментальное подтверждение новых взглядов на пространство — время — тяготение.

Поистине человечество проявило доброе чутье, как и в некоторые другие моменты истории своей культуры, с волнением отнесясь к практически ничтожному признаку коренного перелома в научных воззрениях на самые фундаментальные понятия. В несколько преувеличенной форме Лауэ заметил

по данному поводу, что ничто так не волнует людей, как понятия пространства и времени. По-видимому, именно этим объясняется огромная популярность нашего современника Эйнштейна, несомненно, напоминающая известность таких гигантских фигур прошлого, как Галилей и Ньютон. С другой стороны, этому в известной мере способствовали частые общественно-политические выступления Эйнштейна и его поездки с лекциями в разные страны. Эйнштейн, будучи по стилю работы в основном ученым-одиночкой, по определению Оствальда — «классиком», а не романтиком, чуждым коллективной работе, дискуссиям на семинарах и т. д., вместе с тем являлся своеобразной общественной фигурой.

В этом отношении Эйнштейн не походил на подавляющее большинство ученых XIX в. Его политические и общественные выступления далеко не всегда имели четкий прогрессивный характер, и он нередко становился рупором отсталых мелкобуржуазных кругов. В этом отношении Эйнштейна нельзя, конечно, поставить в один ряд с такими современными физиками — передовыми борцами за дело мира, как Ланжевен и Жолио-Кюри. Вместе с тем настойчивые выступления Эйнштейна в последние годы против использования ядерной энергии в военных целях и его протесты против реакционной политики известных кругов в капиталистических странах свидетельствуют об искреннем стремлении идти в рядах представителей демократии и прогресса. Эйнштейн хорошо осознал особую ответственность, которая оказалась возложенной историей на ученых-физиков середины XX в.

Для того чтобы понять ход идей, приведших в конце концов к установлению общей теории относительности, необходимо обрисовать физическую картину мира 1905—1908 гг., в период создания специальной теории относительности. Как известно, последняя, со своей стороны, также явилась мощным синтезом многих областей физики.

В самых общих чертах физическая картина мира, возникшая в результате установления специальной теории относительности в работах Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна, Минковского (1905—1908), может быть резюмирована следующим образом. Прежде всего, как постепенно выяснилось, суть дела заключалась в том, что пространство и время оказалось невозможным рассматривать независимо друг от друга. Напротив, было доказано, что пространство и время тесно связаны и образуют единое четырехмерное многообразие. Все события в мире нужно характеризовать четырьмя координатами:

$$x_1 = x,\ x_2 = y,\ x_3 = z,\ x_4 = ct;$$

можно положить также $x_4 = ict$. Компоненты x_ν образуют

четырехмерный вектор. Вообще все без исключения величины, характеризующие как механическое движение тел (скорость, ускорение, импульс, момент количества движения, энергия и т. д.), так и электромагнитное поле (потенциал, напряженность электрического и магнитного полей и т. д.) следует понимать как скаляры или компоненты векторов, тензоров 2-го и высшего рангов, или введенных в науку позднее спиноров, в четырехмерном мире. С общей точки зрения можно говорить об одних тензорах, считая закономерным образом скаляры тензорами нулевого ранга, векторы — тензорами 1-го ранга и рассматривая спиноры, введенные Картаном и независимо от него Дираком, как тензоры ранга $^1/_2$ и других полуцелых рангов. Тем самым было произведено глубокое объединение разнообразных величин, ранее ошибочно казавшихся не связанными, или, по крайней мере, удалось значительно уточнить связь других величин, объединявшихся недостаточно отчетливо.

Впервые в истории физической науки пространство и время оказались объединенными в четырехмерный мир, в основе геометрии которого лежит следующее выражение интервала или бесконечно малого расстояния между двумя событиями:

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2),$$

вместо прежней совокупности двух раздельных выражений: 1) квадрата трехмерного расстояния $dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ и 2) квадрата промежутка времени dt^2.

Далее, вместо прежнего трехмерного вектора импульса частицы $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ и независимой величины энергии E, мы имеем теперь «4-импульс» с компонентами p_ν (где $\nu = 1, 2, 3, 4$):

$$p_1 = \frac{m_0 v_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad p_2 = \frac{m_0 v_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

$$p_3 = \frac{m_0 v_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad p_4 = \frac{iE}{c},$$

Аналогично постоянству квадрата вектора в трехмерном пространстве при любых координатных преобразованиях постоянство квадрата 4-импульса при преобразованиях Лоренца, иначе говоря вращениях в четырехмерном мире, дает непосредственно фундаментальное соотношение между энергией, импульсом и энергией покоя

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 = \text{const}$$

или

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4,$$

если положить постоянную $\text{const} = -m_0^2 c^4$, где m_0 — масса покоя частицы. Три компоненты векторного потенциала **A** и скалярный потенциал φ объединяются в 4-вектор потенциал; $\varphi_\nu = \mathbf{A}, i\varphi$. Компоненты электрического **E** и магнитного поля **H** объединяются в антисимметричный тензор поля 2-го ранга $F_{\mu\nu} = (\mathbf{E}, \mathbf{H})$, компоненты которого целесообразно записать в виде таблицы-матрицы:

$$F_{\mu\nu} = \begin{vmatrix} 0 & +H_z & -H_y & -iE_x \\ -H_z & 0 & +H_x & -iE_y \\ +H_y & -H_x & 0 & -iE_z \\ +iE_x & +iE_y & +iE_y & 0 \end{vmatrix}.$$

Смысл подобного объединения ярко проявляется при переходе от одной системы координат к другой, движущейся равномерно относительно первой, т. е. при лоренцовых преобразованиях. Тогда, если в первой системе мы имели лишь одно электрическое поле, например покоящегося заряда, то в движущейся системе будут отличны от нуля также и компоненты магнитного поля. Теория относительности потребовала, чтобы все уравнения электромагнитного поля и других полей, а также уравнения движения частиц имели четырехмерную форму. В большинстве случаев для этой цели пришлось добавить к уравнениям новые члены или поправочные коэффициенты, впоследствии подтвержденные опытом во всех без исключения случаях.

Таким образом, специальная теория относительности явилась, в частности, завершением долгого пути объединения электрических, магнитных и световых явлений, столь сильно продвинутого Максвеллом в 60-х — 70-х годах XIX в.

Мы не будем здесь останавливаться подробно на технических и, тем более, на экономических и социальных предпосылках релятивизма и обратном влиянии на них теории относительности как раздела физической науки начала XX в., а также на ее разнообразных технических приложениях. Сейчас достаточно напомнить, что электродинамика и теория тепла достигли замечательного прогресса в значительной мере благодаря техническим потребностям электротехники и теплотехники.

Вследствие этого электрические и магнитные явления оказались окончательно объединенными в еще большей

степени, чем это предполагалось в максвелл-лоренцовой электродинамике. Открытие Томсоном в 1897 г. электронов — носителей мельчайшей порции отрицательного электричества являлось обнаружением мельчайшей порции вещества. Установление Зееманом влияния магнитного поля на спектральные линии, испускаемые атомами (1900), истолкованное Лоренцом, окончательно показало, что электроны входят в состав атомов и что именно их движение обусловливает испускание света. Благодаря этому максвелловская электромагнитная теория света, доказанная в опытах Герца, Лебедева, Риги и других и развитая далее Лоренцом, получила свой окончательный реальный базис.

Следует подчеркнуть, что теория относительности покончила со световым эфиром как особой субстанцией. Поэтому объединение разделов физики в начале XX в. сопровождалось ликвидацией еще задержавшихся в науке с XIX в. последних «флюидов» (эфир, тепловая жидкость и т. д.). Электронная теория стала успешно применяться в начале XX в. для объяснения электропроводности. Казалось, физика близка к установлению единой электромагнитной картины мира, основанной на признании электрических зарядов и электромагнитного поля как единственного представителя материи. Возникла даже мысль о том, что электроны по своей природе являются своеобразными сгустками электромагнитного поля. Эта гипотеза об электромагнитной полевой природе массы электрона, высказанная Лоренцом и Дж. Дж. Томсоном и развитая Абрагамом, Пуанкаре, Ланжевеном и другими, не была, впрочем, доказана и, несмотря на многие попытки, предпринятые впоследствии уже на базе квантовой теории, остается недоказанной по сей день.

В наиболее резкой форме идею единой электромагнитной картины высказал немецкий физик Густав Ми, который впервые обобщил максвелловы уравнения электромагнитного поля нелинейным образом (1912), полностью опираясь на требования и математический формализм только что возникшей теории относительности. Как выяснилось позднее, обобщение Ми было ошибочным, поскольку он добавил к максвелловым уравнениям члены, явно содержащие потенциалы, т. е. не обладающие требуемой калибровочной инвариантностью, тогда как наблюдаемыми величинами, входящими в уравнения, являются только напряженности поля, т. е. производные от потенциалов. Действительно, непосредственно ясно, что мы можем, например, изменить точку отсчета потенциала, добавив к нему постоянную, ничего не изменяя среди наблюдаемых на опыте величин. Калибровочные (или, как их еще называют, градиентные) преобразования потенциалов и являются

наиболее общими возможными их преобразованиями, не меняющими вида уравнений или характера законов природы. Несмотря на эту ошибку, теория Ми сыграла известную стимулирующую роль, впервые показав возможность выхода за рамки максвелловых уравнений.

Отметим, что гораздо позднее, в 1934—1935 гг. Борн и Инфельд дали, хотя формально безукоризненное, но произвольное нелинейное обобщение максвелловой электродинамики, а современная квантовая теория поля с необходимостью приводит к нелинейному обобщению уравнений как электромагнитного поля, так и уравнений всех других полей.

Возвращаясь к проблеме электромагнитной массы электронов, отметим, что одно время было распространено ошибочное мнение, будто бы опыты Кауфмана и других доказали гипотезу чисто электромагнитной массы, и что последняя вытекает из теории относительности. На самом же деле, хотя исторически специальная теория относительности выросла на базе электродинамики, но все соотношения релятивистской механики относятся не только к электронам, но также и к любым другим частицам и системам (например, к нейтронам) и не имеют поэтому непосредственного отношения к спору о том, обусловлена ли масса электрона полностью или хотя бы частично энергией его электромагнитного поля.

Итак, электродинамика и электронная теория представляли собой в первое десятилетие XX в. один из наиболее успешно развивавшихся разделов физики. Наряду с этим работы начала XX в., в частности теоретические исследования Эйнштейна и Смолуховского и эксперименты Ж. Перрена и других, внесли ценный вклад в понимание тепловых явлений и вместе с тем были восприняты как одно из последних окончательных доказательств существования атомов и справедливости атомной, кинетической интерпретации теплоты. Как известно, производя объединение различных разделов науки, физика XIX в., наряду с объединением электрических, магнитных, световых явлений, свела тепловые явления к механическим, доказав, что тепловая энергия является энергией хаотического, беспорядочного движения атомов и молекул в газе, жидкости, твердом теле. В трудах Кенига, Клаузиуса, Максвелла, Больцмана было восстановлено молекулярно-кинетическое понимание теплоты, высказанное еще в XVIII в. Ломоносовым и др. В дальнейшем выяснилась, что электроны, например, в твердом теле и все другие частицы также принимают участие в тепловом движении. Более того, хаотический поток электромагнитных волн также обладает тепловой энергией и температурой. Таким образом, физика уже в XIX в. покончила с представлениями о всевозможных видах тепловой жидкости.

Мера беспорядочности в движении, отличающая тепловое движение от упорядоченного механического, нашла отражение в новой величине — энтропии, введенной Клаузиусом. При обратимых (идеальных!) процессах энтропия не меняется, при необратимых (например, связанных с трением), т. е. при всех реальных процессах, энтропия замкнутой системы должна расти. Вероятностное понимание энтропии, развитое Больцманом и затем Гиббсом, указывало, что энтропия, будучи связана с вероятностью состояния, может при некоторых условиях даже уменьшаться. Однако при столь замечательном по убедительности и плодотворности результатов объединении различных областей физики, реальность атомов и наличие флуктуаций (отклонений), при которых энтропия уменьшается, не была доказана вплоть до начала XX в., и Больцману, скончавшемуся в 1906 г., так и не пришлось дожить до полного торжества его идей. Лишь теория броуновского движения мельчайших коллоидных частиц, спор растений и тому подобных объектов, происходящего под влиянием толчков молекул, теория диффузии и выяснение роли флуктуаций в работах Смолуховского и Эйнштейна ознаменовали собой окончательное доказательство справедливости атомно-кинетической флуктуационной картины теплоты и толкования энтропии.

Наряду с успехами двух огромных разделов физики — электродинамики и теплоты,— физика начала XX в. характеризовалась еще весьма незначительным по объему работы, но весьма многообещающим развитием двух важнейших, исключительных по значению разделов, к которым с каждым днем все более приковывалось внимание всей науки. Речь идет, с одной стороны, о создании теории относительности, и с другой стороны — об открытии радиоактивности (1896), связанной с самопроизвольным распадом некоторых естественно-радиоактивных элементов (уран, торий, радий, полоний и др.). Удивительные свойства этих элементов были обнаружены Беккерелем, супругами Кюри (Пьером Кюри и Марией Склодовской-Кюри), Резерфордом, Содди и др. Это открытие еще в большей степени, чем рентгеновские лучи (1895 г.), показало ограниченность представления о мире физики XIX в., воочию продемонстрировав сложность атомов и наличие совершенно новых процессов, управляемых в некоторых отношениях существенно вероятностными законами (Резерфорд — Содди). Открытие радиоактивности содействовало также окончательному доказательству существования атомов и одновременно — доказательству сложности их структуры. Как выяснилось позднее, в результате экспериментов супругов Кюри, Резерфорда, Содди и других, наблюдавшиеся ими радиоактивные явления представляли собой ядерные процессы. В 1911 г. опытами

Резерфорда была окончательно доказана неоднократно предлагавшаяся ранее планетарная модель атома.

Интересно отметить, что, сыграв решающую роль в установлении модели атома, исследования естественно радиоактивных явлений отошли на второй план примерно с 1913 г., когда исследование структуры атомов сомкнулось с квантовой теорией. В дальнейшем, вплоть до 1932 г., главное внимание физической науки было привлечено к атому и развитию квантовой теории движения атомных электронов. Позднее приближенная теория Н. Бора (1913—1923), а затем волновая (или квантовая) механика Гейзенберга, Шредингера, Дирака, Борна, Йордана позволили установить не только окончательные нерелятивистские квантовые (1925—1927), но и в значительной мере квантовые релятивистские закономерности движения атомных и свободных электронов (1928). Лишь тогда была показана применимость и плодотворность анализа альфа-распада как квантового туннельного эффекта, и современная физика со всей решительностью, широким фронтом перешла в 1932 г. к исследованию атомных ядер после открытия нейтрона.

История самой квантовой теории начинается с работ Макса Планка по теории равновесного теплового электромагнитного излучения (1900) и работ Эйнштейна, установившего законы фотоэффекта на базе представления о фотонах (1905) и применившего квантовую теорию к истолкованию теплоемкости тел (1907). Как уже указывалось, благодаря работам Н. Бора (1913), обобщившим предварительные результаты де Хааса, Шидлова, Никольсона, Бьеррума, квантовая теория была с огромным успехом применена к теории движения атомных электронов вокруг атомных ядер. Оказалось возможным объяснить основные закономерности спектров, многие магнитные, электрические, химические свойства атомов. Постепенно стали выясняться закономерности периодической системы элементов Менделеева. Позднее, во второй половине 20-х годов, после появления современной квантовой механики, все эти результаты были уточнены, обоснованы и обобщены.

Для краткой характеристики состояния физики второго десятилетия XX в. следует подчеркнуть открытие дифракции рентгеновых лучей в кристаллах (Лауэ в сотрудничестве с Фридрихом и Книпингом, 1911), которое значительно двинуло вперед как понимание рентгеновых лучей, так и рентгеноструктурный анализ кристаллов (Брэгги, Вульф и др.). Что касается объединения квантовой теории и теории относительности, то в рамках теории Бора здесь был сделан лишь первый, правда удачный шаг в виде формулы сверхтонкой структуры Зоммерфельда, который учел влияние релятивистских поправок (типа изменения массы со скоростью) на дви-

жение атомных электронов (1915). Нужно еще отметить, что исследование космических лучей, с бесспорностью открытых при подъемах на воздушных шарах (Гесс, 1909), задержалось из-за начавшейся первой мировой войны.

Приостановив в большой мере нормальный ход научных исследований, созыв международных конгрессов, обмен литературой и т. д., мировая война вместе с тем стимулировала развитие технической физики (радио, электроники, оптики). Мы не будем останавливаться на характеристике физики начала XX в. с точки зрения экономических, социальных и политических влияний на нее; не будем говорить здесь о различных школах в физике того времени. Достаточно отметить, что руководящую роль играли научные школы передовых капиталистических стран Западной Европы — Англии, Германии и Франции. Для американской физики, хотя и давшей ряд первоклассных результатов (Майкельсон, Милликен, Вуд), но далеко еще не достигшей того значения, которое она приобрела позднее, в 30-х — 40-х годах, характерной является сильная техническая база. Высоко стояла физика, хотя и более слабо представленная в количественном отношении, в Швеции, Дании, Голландии, Италии. В России отдельные крупные достижения, главным образом московской школы Лебедева, затем Эйхенвальда, Умова, Вульфа, Аркадьева и ряда петербургских физиков (Иоффе, Рождественского), не могли скрыть несоответствие относительно незначительного количественного масштаба физических исследований огромным экономическим, техническим и культурным потребностям страны.

Преимущественное развитие в конце XIX в. и в начале XX в. электродинамики и электротехники, а также радиофизики представляет собой прекрасный пример плодотворного взаимного влияния науки и техники. Важно отметить, что, в частности, потребности радиофизики толкали вперед исследование электронных явлений и фотоэффекта как основы техники фотоэлементов. Полное же смыкание квантовой физики с техникой, а также связь релятивистской теории с техникой ускорителей и ядерной техникой произошли значительно позднее, в 30-х и 40-х годах.

Таким образом, в первые два десятилетия XX в. совершался переход от созданной классической физикой в основном электромагнитной картины мира к современному, квантово-релятивистскому атомно-ядерному пониманию материи.

Как нетрудно заметить, в стороне оставалась при этом столь важная область явлений, как тяготение. Несмотря на то, что явления тяготения гораздо ранее других — электрических, магнитных, тепловых, световых — еще в конце XVII в. получили чрезвычайно удачную формулировку в виде ньюто-

новского закона, природа их была не расшифрована. Тяготение не затрагивалось при всех объединениях разделов физики в XIX в.; представлялось, что закон Ньютона не нуждается в каких-либо поправках. Таково было положение вещей в годы создания специальной теории относительности.

Первый шаг в области применения релятивистских идей к тяготению сделал Пуанкаре в последнем параграфе своей основополагающей работы, в которой, в развитие идей Лоренца и независимо от одновременной работы Эйнштейна, была установлена специальная теория относительности. Существенный вывод, к которому пришел Пуанкаре, заключался в том, что гравитационное воздействие не может передаваться мгновенно, но должно распространяться со скоростью света. Уже ранее было известно, что вещество любого вида, распределенное в пространстве с плотностью ρ, порождает вокруг себя гравитационное поле, потенциал которого определяется из уравнения типа Лапласа — Пуассона

$$\Delta\varphi = 4\pi\varkappa\rho,$$

где $\varkappa$ — гравитационная постоянная. Отсюда для точечной массы

$$\rho = m\delta(\mathbf{r}),$$

находящейся в начале координат, получаем на расстоянии r потенциал ньютоновой теории:

$$\varphi = \frac{4\pi\varkappa m\delta(r)}{\Delta} = -\frac{\varkappa m}{r}.$$

Следовательно, потенциальная энергия массы M в подобном поле будет равна

$$U = -\frac{\varkappa Mm}{r},$$

откуда получаем ньютонову силу

$$F = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{\varkappa Mm}{r^2}.$$

Так как, согласно основной идее теории относительности, время должно входить во все уравнения на равных началах с координатами, то статическое уравнение следует заменить волновым:

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi} = 4\pi\varkappa\rho,$$

которое означает распространение потенциала гравитации со скоростью света [1].

Вернемся снова к положению, сложившемуся в науке непосредственно в годы после установления специального принципа относительности. Существенный шаг в направлении понимания природы тяготения, а в дальнейшем и объединения его с другими видами физической реальности был сделан Эйнштейном в 1911 г. в работе «О влиянии силы тяжести на распространение света», в которой он развивал идеи, изложенные им в статье 1907 г. Здесь впервые высказывается идея об эквивалентности системы, совершающей равномерно ускоренное движение (скажем, вверх по оси z), и системы, в которой действует ускорение силы тяжести. Подобный «принцип эквивалентности» непосредственно объясняет факт равенства инертной и тяжелой масс. Действительно, в обеих системах материальные тела будут двигаться согласно одним и тем же ньютоновым уравнениям (сейчас мы отвлекаемся от эффектов специальной теории относительности)

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2z}{dt^2} = -\gamma,$$

где γ есть в одной системе ускорение силы тяжести, а в другой — ускорение самой системы, направленное по оси z. Говоря современным языком, гравитационный «заряд» всякого тела пропорционален его массе, поэтому отношение «заряда» к массе есть величина постоянная для всех тел и равная константе тяготения. Одинаковое, в смысле величины ускорения, падение всех тел в гравитационном поле было проверено многократно на опыте, однако до появления общей теории относительности не находило себе объяснения, оставаясь фундаментальным, но изолированным фактом. С точки зрения принципа эквивалентности этот факт представляется очевидным.

Устанавливая принцип эквивалентности, Эйнштейн, следуя своему стилю, использовал удачный мысленный экспери-

[1] Любопытно отметить, что гипотеза о возможности гравитационных волн была ранее высказана Б. Б. Голицыным в середине 90-х годов в неопубликованной переписке с П. Н. Лебедевым (Архив АН СССР). В одном из своих подробных, содержащих много выкладок, писем Б. Б. Голицын развивает общую теорию гравитационных волн в связи с выдвинутой П. Н. Лебедевым гипотезой о возможности «дигравитационной» константы, типа диэлектрической проницаемости. Непосредственно идеи этой переписки не имели отражения в науке, хотя мысли, высказанные здесь, заслуживали всемерного внимания. Действительно, современная теория тяготения приводит в линейном приближении непосредственно к волновым уравнениям для гравитационного поля. С другой стороны, более косвенным образом функцию «дигравитационной» константы отчасти несет само гравитационное поле, поскольку оно подчиняется нелинейным уравнениям.

мент с наблюдателем, находящимся в лифте. Наблюдатель в кабине лифта, производя опыты, не может определить — находится ли лифт, подвешенный на тросе, в поле тяжести или же он испытывает ускорение, направленное вверх. Действительно, в том и другом случае предметы будут одинаковым образом падать на пол лифта. По сведениям биографов (воспоминания Е. Кюри о М. Склодовской-Кюри и частное сообщение Л. Инфельда), пример с лифтом давно, еще с юношеских лет, занимал внимание Эйнштейна.

Принцип эквивалентности во многих отношениях явился для Эйнштейна путеводной звездой при построении общей теории относительности и вместе с тем новой теории тяготения. Его значение сам автор теории неоднократно подчеркивал вплоть до последних лет, по свидетельству своего ученика и сотрудника, польского физика Л. Инфельда. В полемике с Коттлером (1916) Эйнштейн прямо пишет, что «вся теория основана на этом принципе».

Впрочем, впоследствии отчетливее выяснился более ограниченный характер принципа эквивалентности, который, естественно, оказался имеющим локальный смысл, сохраняя свое значение в бесконечно малой области, говоря математическим языком. Благодаря этому мы получаем ключ к пониманию однородного гравитационного поля. В той же важной работе 1911 г. Эйнштейн показывает, что, поскольку согласно специальной теории относительности инертная масса тела возрастает с его энергией по закону

$$m = \frac{E}{c^2}$$

и так как инертная и тяжелая массы оказываются равными, то увеличению содержания энергии должно соответствовать увеличение и тяготеющей массы. Отсюда вытекает замечательный вывод, что скорость света в гравитационном поле уже не будет постоянной, но оказывается равной

$$c = c_0\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right),$$

где Ф — гравитационный потенциал. Таким образом, при распространении в поле тяжести лучи света должны искривляться, например при прохождении вблизи Солнца. Для угла отклонения лучей света от звезд при прохождении вблизи поверхности Солнца Эйнштейн получил здесь сперва ошибочное значение 0,83″, вместо правильной, вдвое большей, величины, выведенной им позднее и подтвержденной в основном наблюдениями. Первоначальный результат получается проще

всего из представления о движении световых «частиц» с эффективной массой

$$m = \frac{E}{c^2},$$

испытывающих притяжение к Солнцу по закону Ньютона. Укажем сразу же, что удвоение первоначального результата обязано эффекту искривления пространства вблизи Солнца, о котором в первых работах Эйнштейна еще не было речи. Как было обнаружено впоследствии, искривление лучей света в поле Солнца было предсказано еще в 90-х годах Зольднером в забытой работе, не обратившей на себя, к сожалению, никакого внимания. Зольднер получил в точности первоначальный эйнштейновский результат:

$$\Delta\varphi = 0{,}83''.$$

Работа Эйнштейна 1911 г., выходившая за рамки релятивистской теории равномерных поступательных движений в сторону анализа ускоренных движений и установления принципа эквивалентности, явилась началом трудного, можно сказать, мучительного пути установления общей теории относительности, на котором ее автору изменил обычный блестящий стиль законченного классического изложения. Специальная теория относительности явилась увенчанием работ целого поколения физиков, развивавших классическую электродинамику движущихся тел, тогда как в общей теории относительности Эйнштейн, как уже указывалось, прокладывал новые пути в одиночестве.

Любопытным эпизодом периода установления общей теории относительности является полемика Эйнштейна с М. Абрагамом, видным теоретиком, успешно разрабатывавшим проблемы теории электрона, но не оценившим сперва правомерности специального принципа относительности. Абрагам построил в 1912 г. теорию тяготения, инвариантную в бесконечно малой области относительно лоренцовых преобразований. Он выделил из всех координатных систем те, в которых гравитационное поле является статическим, и предлагал относить к ним все остальные движения. Абрагам злорадствует по поводу эйнштейновского результата, указывающего на зависимость скорости света от силы тяжести, видя в этом чуть ли не крах специальной теории относительности с ее постулатом постоянства скорости света. Отвечая Абрагаму, Эйнштейн с большой ясностью подчеркнул, что постоянство скорости света имеет место только в областях с постоянным потенциалом тяготения. Неудивительно, что, переходя к случаю общего

поля тяготения, мы сталкиваемся с новыми обстоятельствами, в частности с предсказываемым теорией переменным характером скорости света в гравитационном поле. В ответе Абрагаму Эйнштейн подчеркивает, что принцип эквивалентности, указывающий на физическую тождественность статического поля тяготения и ускорения, пригоден только для бесконечно малых областей. Вместе с тем возникает интереснейшая программа построения теории, охватывающей поле тяготения и являющейся ковариантной по отношению не только к лоренцовым преобразованиям, но и к преобразованиям, связывающим ускоренные и вращающиеся системы. Эйнштейн заканчивает свою статью прямым призывом к теоретикам испробовать свои силы в решении этой важной задачи.

Принципу эквивалентности не удовлетворяли работы другого теоретика, Г. Нордстрема, теория тяготения которого (1912—1913) основывалась на представлении о постоянстве скорости света и скалярном характере гравитационного потенциала (тензор нулевого ранга). Сам Эйнштейн попытался без успеха описывать гравитационное поле четырехмерным вектором (тензор 1-го ранга) и антисимметричным тензором 2-го ранга наподобие электромагнитного поля. Все же теория Нордстрема, допускавшая ясную тензорную формулировку и приводившая к точному равенству тяжелой и инертной массы, была шагом вперед и сыграла роль при построении общей теории относительности. Скалярное уравнение Нордстрема является обобщением уравнения Лапласа — Пуассона.

Если в 1907—1912 гг. Эйнштейном был установлен принцип эквивалентности и получены указания на связь гравитации с теорией относительности, обобщенной на ускоренные движения, то второй подготовительный период теории 1913—1915 гг. характеризуется прежде всего систематическим применением тензорного анализа. Удачно выбранный, адекватный физической сущности математический аппарат, как всегда в подобных случаях, сам, так сказать, ведет исследователя к новым заключениям.

В 1913—1914 гг. вышли в свет две работы Эйнштейна, написанные совместно с М. Гросманом, в которых уравнение Пуассона ньютоновой теории тяготения заменяется соответствующим тензорным выражением. Здесь высказывается также мысль о том, что материя в уравнениях тяготения должна описываться не только своей плотностью распределения ρ, но и тензором энергии $T_{\alpha\beta}$ с 16-ю компонентами, среди которых лишь одна совпадает с ρ, другие же дают плотности импульса и натяжений. Тензорный анализ, со своей стороны, уже ясно подсказывал фундаментальную идею общей ковариантности уравнений поля тяготения. Иначе говоря, уравнения должны

сохранять свой вид при любых точечных преобразованиях координат, а не только при лоренцовых преобразованиях, трехмерных вращениях, переносах и инверсиях системы координат, как это имело место в релятивистской механике и электродинамике при отсутствии поля тяготения. В 1914 г. Эйнштейн уже близко подходит к окончательной форме уравнений, устанавливая соотношение $R = \varkappa T$, связывающее скаляры кривизны R и материи T. Однако Эйнштейн еще колеблется относительно признания требования общей ковариантности и ограничивается сперва лишь инвариантностью относительно линейных преобразований.

В 1915 г. он снова возвращается к идее общей ковариантности и отмечает, что создаваемая теория является истинным триумфом тензорного анализа, основанного Гауссом, Риманом, Кристоффелем, Риччи и Леви-Чивита и существенным образом учитывающего теорию искривленного пространства Лобачевского — Бóяи и четырехмерное объединение пространства — времени Пуанкаре — Минковского. В 1915 г. Эйнштейн впервые получает новые уравнения поля тяготения в окончательной форме, выводит формулу для движения перигелия Меркурия и дает правильное выражение для отклонения луча света в поле тяготения, поправляя прежний (вдвое меньший) свой и Зольднера результат.

В эти же годы общей теорией относительности стали интересоваться многие крупные теоретики. Шварцшильд в 1916 г. дал точное решение новых эйнштейновских уравнений поля тяготения в случае точечного источника и в случае шара из несжимаемой жидкости. Заметный вклад в окончательное развитие теории внес крупнейший математик Гильберт, установивший в 1915 г. общее соотношение для тензора энергии как вариационной производной от лагранжевой функции поля по компонентам метрического тензора $g_{\mu\nu}$. Наконец, в 1916 г. Эйнштейн в фундаментальной работе «Основы общей теории относительности» формулирует новую теорию в ее окончательном современном виде. Этот год и следует считать датой установления общей теории относительности. Первый период ее развития, естественно, завершается подтверждением предсказанного Эйнштейном отклонения луча света в поле тяготения Солнца, полученным в 1919 г. во время наблюдений солнечного затмения. Общая теория относительности тем самым окончательно входит в современную физику в качестве новой важнейшей ее главы.

Перечисляя основные этапы построения общей теории относительности, мы еще не дали разъяснения самой фундаментальной идее Эйнштейна. Если бы речь шла только об уточнении закона тяготения Ньютона даже при помощи обобщен-

ного описания поля тяготения 10-ю компонентами симметричного тензора 2-го ранга $g_{\mu\nu}$ вместо одного единственного ньютоновского потенциала φ и о тензорном обобщении уравнения Пуассона, то вряд ли одни эти обстоятельства способны были вызвать столь пристальное внимание и возбудить подлинную сенсацию. Суть новой, поистине революционной мысли Эйнштейна заключается в том, что наличие гравитационного поля связывается с искривлением пространства — времени. Оказывается, что одни и те же величины $g_{\mu\nu}$, с одной стороны, являются компонентами гравитационного потенциала, а с другой — характеризуют метрику искривленного пространства. Таким образом, поле тяготения, которое, как мы подчеркивали, всегда находилось в стороне от других видов физической реальности, впервые объединяется, правда не с веществом в обычном смысле, т. е. с электромагнитным полем, элементарными частицами и т. д., но с пространством — временем. Если пространство — время не искривлено и является плоским, псевдоевклидовым, т. е. его геометрия совпадает с четырехмерной геометрией Пуанкаре — Минковского,— это означает отсутствие поля тяготения и ведет к инвариантности всех уравнений относительно лоренцовых преобразований, т. е. к принципу относительности в отношении прямолинейных, равномерных движений. Тогда инвариантом является интервал

$$ds_0^2 = g^0_{\mu\nu}\, dx_\mu\, dx'_\nu,$$

где

$$g^0_{\mu\nu} = \begin{cases} 0\ (\mu \neq \nu), \\ +1\ (\mu = \nu = 4), \\ -1\ (\mu = \nu = 1, 2, 3). \end{cases}$$

Если же речь идет о переходе к ускоренной системе, координаты которой связаны с исходными, уже не лоренцовыми, линейными преобразованиями, но произвольными точечными преобразованиями, то инвариантным оказывается ds^2, где $g_{\mu\nu}$ будут уже функциями координат и времени и отнюдь не будут сводиться к своим галилеевым постоянным значениям $g^0_{\mu\nu}$. Но ведь согласно принципу эквивалентности ускорение равноценно в бесконечно малой области тяготению; следовательно, новые $g_{\mu\nu}$, будучи связаны с наличием ускорения, должны иметь также какое-то отношение к тяготению. Оказывается, они просто совпадают с потенциалами тяготения! Теперь тензорный анализ сам подсказывает общековариантную форму уравнений, являющихся обобщением пуассонова уравнения ньютоновой теории

$$\Delta\varphi = 4\pi\varkappa\rho.$$

Резюмируем для ясности соответствие ньютоновых и эйнштейновских величин.

Скалярный ньютонов потенциал φ обобщается в симметричный тензор тяготения $g_{\mu\nu}$ 2-го ранга с 10 компонентами. Вместо плотности материи ρ в уравнении Пуассона, в уравнениях тяготения Эйнштейна имеем 10 компонент тензора энергии — импульса $T_{\mu\nu}$. Оператор Лапласа Δ переходит в уравнениях Эйнштейна в сложное выражение, содержащее вторые и первые производные.

При этом важно отметить обстоятельство, оказавшееся чреватым значительными последствиями: новые уравнения оказались нелинейными в первых производных от $g_{\mu\nu}$.

После этих предварительных пояснений выпишем знаменитые эйнштейновские уравнения поля тяготения, имеющие в общепринятых обозначениях вид:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = -8\pi\kappa T_{\mu\nu}.$$

Не имея возможности пояснять здесь все детали этих сложных уравнений и отсылая читателя за всеми подробностями к обильной учебной, монографической и оригинальной литературе, прежде всего к статье самого Эйнштейна 1916 г. и к его книге «Сущность теории относительности», мы остановимся здесь на значении символов. В правой части уравнений Эйнштейна стоит симметричный тензор энергии, описывающий плотность энергии и импульса любых форм вещества. Напомним, что тензор 2-го ранга представляет собой совокупность 16 компонент, образующих закономерную систему величин, которые при переходе к другой координатной системе (например, путем сдвига, поворота, отражения координат, или перехода к движущейся системе координат от покоящейся) преобразуются как произведения двух векторов. При этом речь везде идет о тензорах и преобразованиях в четырехмерном пространстве — времени, которые лишь в частных случаях вырождаются в чисто пространственные трехмерные преобразования.

Правая часть обобщенных уравнений тяготения с железной необходимостью устанавливается из требований релятивистской ковариантности. Действительно, в уравнениях Лапласа — Пуассона ньютоновой теории тяготения стоит плотность материи ρ; но эта величина в релятивистской теории не может быть взята изолированно: она является лишь одной из компонент тензора $T_{\mu\nu}$. Поэтому в истинной теории тяготения нельзя ограничиваться одним пуассоновым уравнением для ρ, но нужно иметь 10 уравнений с компонентами $T_{\mu\nu}$ в правой части (ввиду симметрии тензора $T_{\mu\nu} = T_{\nu\mu}$ будем иметь лишь 10,

а не $4 \times 4 = 16$ существенно отличных друг от друга компонент).

Напомним, что аналогично этому, например, в электродинамике нельзя ограничиться одним статическим уравнением с плотностью распределения электричества в правой части, определяющей порождение электрического поля

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

поскольку ρ есть лишь одна из компонент четырехмерного вектора плотности заряда тока $j_\nu = (\mathbf{j}, \rho c)$. Следовательно, должны иметь место уравнения с плотностью тока $\mathbf{j}$ в правых частях. Таковыми являются уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - \frac{1}{c}\dot{\mathbf{E}} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}.$$

Вместе с статическим уравнением они объединяются в единое тензорное уравнение с четырехмерным током в правой части в виде

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = \frac{4\pi}{c} j_\mu.$$

Различие с электродинамикой в данном случае состоит прежде всего в том, что плотность вещества является частью не вектора, но тензора 2-го ранга $T_{\mu\nu}$, определяющего сейчас порождение гравитационного поля любыми видами вещества. Кроме того, распределение плотности и энергию вещества, т. е., точнее говоря, сам тензор следует брать уже при учете гравитационного поля.

Продолжим пояснение других символов. В уравнениях Эйнштейна величина $\varkappa$ есть гравитационная постоянная; $g_{\alpha\beta}$ обозначают 10 компонент симметричного тензора гравитационных потенциалов и вместе с тем 10 компонент симметричного метрического тензора, определяющего наличие искривления. Если бы четырехмерное пространство — время было плоским, лишенным искривления, то тогда равнялся бы нулю риманов тензор 4-го ранга

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = 0.$$

Из этого тензора можно образовать эйнштейновский тензор 2-го ранга $R_{\alpha\beta}$ и скаляр R (т. е. инвариант, величину, не изменяющуюся при преобразованиях), которые и входят в основные уравнения поля тяготения. Величины $R_{\alpha\beta}$ и R зависят от

производных $g_{\alpha\beta}$ по координатам и времени, от скобок или символов Кристоффеля, наглядно говоря, играющих роль силы тяготения, т. е. напряженностей гравитационного поля:

$$R_{\alpha\beta} = R^{\sigma}_{\alpha\beta\sigma}, \quad R^{\sigma}_{\alpha\beta\rho} = \frac{\partial \Gamma^{\sigma}_{\alpha\rho}}{\partial x_{\beta}} - \frac{\partial \Gamma^{\sigma}_{\alpha\beta}}{\partial x_{\rho}} +$$

$$+ \Gamma^{\sigma}_{\nu\beta}\Gamma^{\nu}_{\alpha\rho} - \Gamma^{\sigma}_{\nu\rho}\Gamma^{\nu}_{\alpha\beta},$$

где символы Кристоффеля имеют вид:

$$\Gamma^{\rho}_{\alpha\beta} = \left\{ \begin{matrix} \rho \\ \alpha\beta \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{\sigma\rho} \left[\frac{\partial g_{\alpha\sigma}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial g_{\beta\sigma}}{\partial x_{\alpha}} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x_{\sigma}} \right] =$$

$$= \frac{1}{2} g^{\sigma\rho} [g_{\alpha\sigma,\,\beta} + g_{\beta\sigma,\,\alpha} - g_{\alpha\beta,\,\sigma}].$$

Запятая означает дифференцирование, например

$$g_{\alpha\beta,\,\sigma} = \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x_{\sigma}}.$$

Следовательно, уравнения будут содержать вторые производные от потенциалов, подобно максвелловым уравнениям.

Итак, уравнения Эйнштейна определяют порождение, распределение и распространение гравитационного поля под влиянием любого вещества. Нелинейный характер гравитационного поля указывает, что оно порождается и самим гравитационным полем.

Отметим теперь, что в простейшем случае слабого гравитационного поля, когда его можно рассматривать существующим или «погруженным» в плоское пространство, а вещество считать покоящимся, сложные уравнения Эйнштейна переходят в пуассоново уравнение ньютоновой теории тяготения

$$\Delta\varphi = 4\pi\varkappa\rho.$$

При этом ньютонов потенциал φ оказывается малой добавкой к постоянной части потенциала

$$g_{44} = 1 + \frac{\varphi}{c^2}.$$

Таким образом, в обобщенной теории выполнен принцип соответствия, и старая теория тяготения Ньютона отнюдь не ликвидируется, но оказывается закономерным частным

случаем. Внутренняя логика грандиозного построения общей теории относительности была так сильна, что еще до первого астрономического подтверждения 1919 г. уравнения Эйнштейна привлекли внимание крупных исследователей: Гильберта, Клейна и прежде всего неутомимого Лоренца, внесших свою долю в окончательную разработку теории или давших, подобно Шварцшильду и де Ситтеру, первые точные решения новых уравнений.

Ввиду того, что в годы первой мировой войны нормальное научное общение между странами прервалось, установление общей теории относительности явилось сперва событием лишь для немецкой науки и ученых нейтральных стран, например Голландии. Однако весьма быстро после возобновления сколько-нибудь нормального научного общения в разработку новой теории включились английские, американские и советские ученые. Крупнейший английский астрофизик Эддингтон разработал ряд вопросов, связанных с гравитационными волнами, и в дальнейшем принял большое участие в развитии релятивистской космологии и попыток построения единой теории поля. Важнейшая заслуга Эддингтона заключается в организации успешно проведенных наблюдений отклонения луча света в поле тяготения Солнца во время экспедиции 1919 г. Американский теоретик Толмен занимался изучением проблемы теплоты в поле тяготения, разобрав, например, такие сложные вопросы, как термодинамика в расширяющейся Вселенной.

Замечательным фактом истории науки является блестящий вклад в развитие теории относительности, который внесли советская физика и математика, развивавшиеся в стране, только что перенесшей гражданскую войну, блокаду и далеко не восстановившей своего народного хозяйства даже до довоенного уровня. Речь идет о работах ученика Стеклова и Голицына, ленинградского механика и геофизика А. А. Фридмана, в которых были впервые (1922—1923 гг.) найдены решения уравнений Эйнштейна, соответствующие переменной во времени геометрической структуре пространства.

Обрисовав коротко основные этапы установления общей теории относительности, возвратимся к характеристике самой новой теории и ее дальнейшему развитию.

Важное значение приобрели точные решения эйнштейновских уравнений. Для случая слабого поля, когда можно положить в первом приближении

$$g_{\mu\nu} = g^0_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},$$

где $g^0_{\mu\nu}$— постоянные значения (+1, —1 или 0), соответствующие псевдоевклидову плоскому неискривленному простран-

ству, а $h_{\mu\nu}$ — малые добавки. Эйнштейн нашел для $h_{\mu\nu}$ линейные уравнения волнового типа при наличии некоторых допустимых дополнительных условий, типа условий Лоренца для потенциалов в случае электродинамики. Иначе говоря, было показано, что слабое гравитационное поле распространяется в виде волн со скоростью света, как предвидели Голицын и Пуанкаре. Вопрос об излучении гравитационных волн движущимися телами рассматривался позднее Лоренцем, Эддингтоном и в самое последнее время приобрел особый интерес ввиду попыток построения квантовой теории тяготения.

Уравнения слабого гравитационного поля, благодаря своей линейности, могут быть непосредственно проквантованы подобно линейным максвелловским уравнениям электродинамики, или уравнениям, описывающим движение электрона. С точки зрения современной теории поля наиболее существенна тензорная размерность волновой функции поля. Следует прежде всего различать волновые функции тензорного характера, которым соответствуют кванты поля или частицы целого спина (внутреннего момента количества движения), описываемые симметричными волновыми функциями и подчиняющиеся статистике Бозе (так называемые «бозоны»). К ним относятся частицы спина 0, описываемые скалярной (тензор ранга нуль), либо псевдоскалярной волновой функцией.

Скалярная функция является инвариантом, т. е. не изменяется при преобразованиях координат, тогда как псевдоскаляр при инверсиях трех координат (иначе говоря, при изменении знаков координат) меняет знак, а при преобразованиях вращения или лоренцовых преобразованиях остается инвариантным. Скалярные частицы до сих пор неизвестны, псевдоскалярные же функции описывают важнейшие, открытые в 1947—1950 гг. частицы средней массы, так называемые пи-мезоны (пионы), осуществляющие перенос ядерных сил.

Волновая функция, имеющая характер тензора 1-го ранга, иначе говоря, четырехмерного вектора, соответствует частицам спина 1 (в единицах $h/2\pi$). Здесь опять-таки имеются два случая: вектор или псевдовектор. Четыре компоненты электромагнитного потенциала (скалярный и векторный потенциалы) образуют компоненты векторной волновой функции фотона, т. е. кванта электромагнитного поля. Псевдовекторные частицы также еще неизвестны. Далее, кванты или частицы спина 2 (в единицах $h/2\pi$), должны описываться симметричным тензором 2-го ранга. Иначе говоря, уравнения частиц спина 2 при исчезающей массе покоя, как и у фотонов, совпадают с уравнениями слабого гравитационного поля. Квантование слабого гравитационного поля приводит к «гравитонам», обладающим внутренним моментом количества движения $2(h/2\pi)$, подобно тому

как квантование максвелловских уравнений электромагнитного поля приводит к фотонам. Мы видим, что линейные уравнения слабого гравитационного поля с необходимостью были бы введены в физику (задним числом!) на базе общей теории полей независимо от общей теории относительности. Со своей стороны, мы указали на возможность прийти к нелинейным уравнениям частиц спина 2, как и всех других частиц, при помощи современной теории вакуума. Таким образом, эйнштейновские уравнения закономерно включаются в общую систему уравнений новейшей квантовой теории поля. При этом, однако, они не теряют отмеченного выше специфического характера, поскольку лишь в этом единственном случае величины, описывающие некоторое поле, вместе с тем характеризуют геометрические свойства пространства.

Для полноты отметим еще, что, как было показано Дираком в 1928 г., электроны, обладающие полуцелым спином $(^1/_2)(h/2\pi)$, должны описываться волновыми функциями совсем нового, спинорного типа, который можно назвать соответствующим тензору ранга $^1/_2$. Волновые функции ядерных частиц протонов или нейтронов также являются спинорами. Оказалось, что все частицы полуцелого спина: $^1/_2$, $^3/_2$ и т. д., описываются спинорами и подчиняются принципу Паули и статистике Ферми — Дирака («фермионы»).

Подобные исследования, как мы уже указывали, вновь оживили вопрос о существовании излучения гравитационных волн или гравитонов, которые до сих пор ни прямо, ни косвенно обнаружены еще не были. Заметим, что, введя несколько иное определение энергии гравитационного поля и основываясь на обоих известных точных решениях уравнений Эйнштейна в отсутствии обычной материи (цилиндрические волны Эйнштейна-Розена и волны Бонди), недавно Мёллер (в согласии с результатами Инфельда) пришел даже к выводу об отсутствии переноса энергии гравитационными волнами. Впрочем, трудности их обнаружения понятны. Во-первых, поскольку речь идет об излучении волн с моментом количества движения $2(h/2\pi)$, испускание должно иметь не дипольный характер, как в случае обычных фотонов, а так называемый квадрупольный. Если излучение света и всех электромагнитных волн определяется наличием ускорения, т. е. второй производной, и представляет собою весьма частое явление, то излучение гравитационных волн определяется наличием неисчезающей третьей производной (от квадрупольного момента распределения масс). Например, сферически симметричное распределение масс не будет давать излучения. Иначе говоря, распределение масс и их движение должны быть чрезвычайно нерегулярными.

Во-вторых, заметить отдельный гравитон, в противоположность фотону, крайне трудно. Элементарные частицы, атомы, ядра могли бы испускать жесткие гравитоны высокой частоты, но, ввиду малых масс этих частиц, интенсивность подобного излучения была бы очень мала. С другой стороны, звезды способны испускать относительно большие потоки гравитонов, но, вследствие малой частоты, обнаружить их и отличить от практически постоянного поля крайне трудно. Возможно, следует искать сперва косвенные способы обнаружения гравитационных волн и излучения гравитонов, исследуя, например, их возможную роль в стабильности звездных систем или предсказываемые, на наш взгляд, с необходимостью взаимные трансмутации гравитонов в фотоны или электроны — позитроны.

Все эти рассуждения не только рисуют нам этапы развития одной из глав общей теории относительности, но и подводят уже к проблемам современной науки. Наряду с вопросом существования гравитационных волн и их излучения вновь возникает вопрос о природе гравитационного поля. Первоначальная концепция общей теории относительности, казалось бы, полностью оторвала гравитацию от всех видов вещества, придав ей чисто геометрический смысл. Однако если существует, например, излучение гравитационной энергии, и движущиеся тела теряют часть (хотя бы и весьма незначительную) энергии подобным образом, то, очевидно, гравитационное поле должно иметь нечто общее с другими видами вещества. Более того, на наш взгляд квантовая теория с необходимостью приводит к выводу о возможности превращения гравитационного поля в другие поля, например двух гравитонов в два фотона или пару электрон — позитрон, а также указывает на возможность обратных трансмутаций. Обнаружение подобных превращений несомненно означало бы дополнительное объединение всех видов вещества. Отметим, что при этом речь идет о превращении так называемой поперечно-поперечной части гравитационного поля, способной реально излучаться.

Перейдем теперь к интересному и важному циклу работ Эйнштейна, Инфельда и других, посвященных уравнениям движения в общей теории относительности. До сих пор в электродинамике и мезодинамике положение вещей рисовалось следующим образом. С одной стороны, мы имели уравнения полей, порождение, распределение и распространение которых определяется распределением и движением частиц, обладающих электрическим зарядом и магнитным моментом (в электродинамике), и частиц, обладающих мезонными зарядами, например нуклонов (т. е. ядерных частиц), в мезодинамике. С другой стороны, имеются уравнения движения самих частиц под действием

электромагнитного или соответственно мезонного поля. Имея в виду более привычный случай электродинамики, можно сказать, что уравнения Максвелла с правыми частями в виде зарядов и токов, с одной стороны, и уравнения движения частиц (под действием лоренцовой силы), либо соответствующие квантовые уравнения — сейчас степень приближения несущественна — с другой стороны, являются независимыми. Корень независимости лежит в линейности уравнений, хотя движение зарядов и полей на самом деле является самосогласованным.

Иное дело в теории гравитации. Ввиду нелинейности уравнений или, иначе говоря, ввиду возможности взаимодействия гравитационных полей друг с другом, здесь возникает заманчивая возможность оставить в основе теории одни лишь уравнения поля, а уравнения движения частиц в поле тяготения, например (приближенно) под действием ньютоновой силы, попытаться вывести из уравнений поля.

Такая постановка вопроса была дана в работе Эйнштейна и его сотрудника, математика Громмера (впоследствии профессора Минского университета) еще в 1927 г. Однако лишь через 10 лет эта трудная проблема была впервые решена в работе Эйнштейна, Гоффмана и Инфельда. Расчеты оказались крайне громоздкими и не могли быть изложены даже на нескольких десятках страниц публикации дальнейшей статьи Эйнштейна и Инфельда.

Более простым методом к аналогичным результатам несколько позднее пришел В. А. Фок, который выводил уравнения движения не для точки, а для тела, обладающего конечным объемом, и применял удобные дополнительные координатные условия, иначе говоря, так называемые гармонические координаты де Дондера.

Суть дела заключается в следующем. Какое-либо тело движется под влиянием силы тяготения и само порождает поле тяготения, действующее на второе тело, в свою очередь влияющее на первое тело. Если бы уравнения поля были линейными, то сумма решений, т. е. сумма обоих потенциалов, была бы также решением. На самом же деле тела оказывают друг на друга взаимное влияние и движутся в общем поле, что учитывалось раньше независимыми уравнениями движения. Но, ввиду нелинейности уравнений поля, сумма решений уже не есть общее решение, и поправки как раз заменят наличие уравнений движения. Иными словами, уравнение движения оказалось возможным вывести из уравнений поля. Работы эти были успешно продолжены Л. Инфельдом, Шейдеггером и Нинг Ху. При этом вновь возник вопрос о наличии гравитационного излучения, который до сих пор остается открытым.

По-видимому, решение вопроса заключается в том, что система, предоставленная самой себе, не будет давать гравитационного излучения, тогда как под действием внешних сил, нарушающих самосогласованное, «устоявшееся», «взаимноприспособленное» движение тел, будет иметь место излучение гравитационных волн. Ответ, как всегда, должен дать опыт.

Как уже отмечено выше, существенную роль в теории играют точные решения эйнштейновского уравнения поля. К ним лишь отчасти можно отнести решения в виде гравитационных волн, которые получены в линейном приближении. С другой стороны, Шварцшильду удалось в 1916 г. найти сферически-симметричное решение с точечной особенностью, соответствующее, например, полю Солнца или Земли на достаточно больших расстояниях и обобщающее знаменитый, привычный ньютонов закон тяготения. Это решение для четырехмерного интервала имеет вид:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2\varkappa m}{c^2 r}\right) c^2\, dt^2 - r^2(\sin^2\theta d\varphi^2 + d\theta^2) - \frac{dr^2}{1 - 2\frac{\varkappa m}{c^2 r}}\,.$$

Иначе говоря, гравитационные потенциалы, или компоненты метрического тензора, соответственно равны

$$g_{44} = 1 - \frac{2\varkappa m}{c^2 r} \ldots \text{ и т. д.}$$

Отсюда видно, что отношение длины окружности к радиусу будет меньше 2π (искривление пространства!). На конечном расстоянии от масс, порождающих поле, имеет место замедление времени по отношению ко времени на бесконечности, где метрика совпадает с псевдоевклидовой (при $r \to \infty, g_{44} \to 1$).

Это решение играет фундаментальную роль во всей новой теории, так же как закон Ньютона в классической теории тяготения или потенциал Кулона в электростатике. Шварцшильд нашел также решение для потенциалов тяготения внутри жидкого шара. Леви-Чивита и Вейль нашли точное решение с осевой симметрией.

Прежде чем закончить краткое изложение истории установления основ общей теории относительности, следует отметить ряд связанных с нею дискуссий. К ним, во-первых, относятся дискуссии чисто научного характера — по вопросам о природе гравитационного поля, о характере тензора энергии самого гравитационного поля, являющегося тензором только относительно линейных преобразований (Шредингер, Мёллер и др.). В последнее время вновь был поднят вопрос о выборе тех или иных дополнительных условий, накладываемых на координаты

(де Дондер, Ланчос, Папапетроу, Фок, Франкль, Инфельд). В частности, как было показано особенно ясно Ф. И. Франклем и Инфельдом (1953—1954), утверждения о том, что гармонические координаты будто бы выделены из всех остальных и связаны друг с другом лоренцовыми преобразованиями, не могут быть поддержаны. Гармонические координаты, удовлетворяющие условиям

$$g^{\alpha\beta}\Gamma^{\mu}_{\alpha\beta} = 0$$

(где подразумевается суммирование по α и β от 1 до 4), действительно являются весьма естественными, так как в них эйнштейновские уравнения принимают вид, наиболее близкий к волновому, но отнюдь не единственно возможными, и отнюдь не связаны между собой только лоренцовыми преобразованиями. Наряду с этим можно выбрать целый ряд других допустимых координатных условий. Одновременно Франкль доказал разумность постановки «задачи Коши» для эйнштейновских уравнений, имеющих гиперболический характер, т. е. возможность вычислить будущее (прошлое) по заданию настоящего.

Другие дискуссии имели более методологический характер и также были связаны с проблемой метрической трактовки гравитационного поля и далее с возможностью чисто кинематического его понимания. Как подчеркивал Эйнштейн еще в ответе Ф. Котлеру в 1916 г., гравитационное поле ни в коем случае не определяется чисто кинематически; мысль о возможности заменить гравитационное поле специально подобранным состоянием движения, т. е. трансформировать поле путем преобразования координат и перехода к другой системе, является сугубо ошибочной. Это особенно ясно, например, для такого простого и фундаментального случая, как гравитационное поле материальной точки, которое такими преобразованиями нельзя уничтожить во всем пространстве. Поскольку чисто кинематическое понимание гравитации невозможно, отпадает эквивалентность птолемеевской и коперниканской системы, которую ряд авторов пытался установить исходя из кинематической равноценности различных систем координат.

Сложность и глубина общей теории относительности и новой теории тяготения привели к тому, что эта теория продолжает развиваться до сих пор и в особенности в связи с упоминавшимися выше попытками включить ее в рамки современной квантовой теории поля. Отметим теперь, что огромный успех своеобразной геометризации поля тяготения путем введения римановой геометрии искривленного пространства — времени, естественным образом привел к попыткам построения единой теории поля, в которой электродинамика также трактовалась геометрическим путем. Поскольку 10 ком-

понент метрического симметричного тензора $g_{\mu\nu}$, характеризующего метрику в римановой геометрии, уже оказались отождествленными с компонентами гравитационного потенциала, для геометризации электромагнитных потенциалов (4 компоненты A_ν) или напряженностей электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$ (6 компонент: E, H) требовалось выйти за рамки римановой геометрии. На этом, довольно заманчивом на первый взгляд, пути была проделана, начиная с 1918 г., обширная работа. Прежде всего математики Г. Вейль, Картан, Скаутен, затем Эддингтон, сам Эйнштейн и многие другие авторы выдвинули казавшуюся грандиозной программу объединенного описания всех полей и всего вообще вещества на базе геометризованной картины мира.

По обилию опубликованных трудов и серьезности подхода нельзя не поставить эту программу геометризованной единой теории поля в один ряд с другими известными в истории науки попытками единого описания материи. Первой из них следует считать механическую картину мира, выросшую на базе классической ньютоновской механики, под влиянием ее успехов и связанную с убеждением в возможности описать все явления при помощи уравнений механики. Удар по этой концепции, пережившей себя и имевшей хождение вплоть до конца XIX в., был нанесен главным образом открытием электромагнитного поля, т. е. вида вещества, лишенного массы покоя, которое никак нельзя трактовать на базе механики в узком смысле слова, не только классической, но и квантовой релятивистской.

Вторая программа единого описания вещества связана с попыткой свести все вещества к электромагнитному полю и зарядам, и даже эти последние свести к «сгусткам» поля. Эта попытка, возникшая в конце XIX в., была более или менее отчетливо сформулирована в трудах Лоренца, Дж. Дж. Томсона, Абрагама, Умова и несомненно содействовала интерпретации многих явлений на базе электродинамики и электронной теории. Однако открытие мезонов, нейтронов и других частиц, нейтральных или слабо связанных (благодаря своему незначительному магнитному моменту) с электромагнитным полем, а также геометрическая интерпретация гравитационного поля показали невозможность ограничиться электромагнитным полем и электрическими зарядами как основой всего вещества.

Что касается попытки построения геометризованной единой теории поля, то она тоже бесспорно не удалась и, как сейчас понятно, не могла удасться. Прежде всего эта программа игнорировала квантовый характер атомных явлений, и в ее основе никак не был отражен факт существования электрона, протона, нейтрона и других элементарных частиц и, несмотря на все

попытки, не было никакой надежды на возможность вывода существования этих частиц.

Со второй половины 20-х годов нашего века, после создания квантовой механики, объяснившей атомные явления, и с 30-х годов, после проникновения в глубь атомного ядра, внимание физической науки было полностью поглощено построением квантовой теории атома, ядра и релятивистской квантовой теорией поля, а также открытием новых элементарных частиц; геометризованная единая теория поля оказалась в стороне от большой дороги современной науки, и число работ по этому вопросу крайне сократилось. Впрочем, сам Эйнштейн и немногие другие авторы продолжали настойчиво, но совершенно безуспешно искать решения проблем строения и объединения разных форм вещества на путях единой геометризованной теории. Нездоровый характер этой программы явствует уже из того факта, что в рамках ее с 1918 г. по сей день не удалось получить буквально ни одного физического результата, а плодом многих десятков, если не сотен работ явилось лишь дальнейшее развитие высшей геометрии и тензорного анализа, не имеющее непосредственного отношения к физике. В противоположность этому, программа единой электромагнитной картины вещества стимулировала ряд открытий физических фактов.

Не останавливаясь на перечислении всех вариантов единой геометризованной теории поля, отметим здесь лишь те, которые привлекли наибольшее внимание. Первая попытка принадлежала Г. Вейлю, в обобщенной, нериманово геометрии которого изменение какого-либо масштаба при его переносе вдоль замкнутого контура не равно нулю, но определяется электромагнитным полем. В римановой геометрии изменение вектора при параллельном переносе вдоль бесконечно малого замкнутого контура $ds^{\nu\sigma}$ равно

$$\delta A_\mu = \frac{1}{2} R_{\mu\nu\sigma\varepsilon} A^\varepsilon ds^{\nu\sigma},$$

где тензор Римана $R_{\mu\nu\sigma\varepsilon}$ антисимметричен относительно $\mu = \varepsilon$. В теории Вейля подобного условия антисимметрии нет. Любопытно отметить, что Эйнштейн сперва резко возражал против работы Вейля, но впоследствии, как было указано, сам отошел от римановой геометрии. Впоследствии, однако, Вейль отказался от своей теории. В близком варианте Эддингтона в основу кладется не выражение интервала ds^2, но закон параллельного переноса, при котором приращение вектора на пути dx имеет вид

$$dA^\mu = -\Gamma^\mu_{\nu\alpha} A^\alpha dx_\nu.$$

Но в отличие от римановой геометрии коэффициент $\Gamma^{\mu}_{\nu\sigma}$ выражается не через обычные скобки Кристоффеля, т. е. производные от $g_{\mu\nu}$, но еще через некоторые дополнительные величины, связанные с электромагнитными потенциалами. Эддингтон объединяет симметричный метрический тензор $g_{\mu\nu}$ и антисимметричный тензор электромагнитного поля в один тензор и кладет его в основу теории, которой нельзя отказать в математическом изяществе:

$$g'_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}.$$

Отходя от римановой метрики, Картан ввел геометрию четырехмерного мира не только искривленного, но обладающего еще обобщенным кручением. Далее, Калуца пытался в 1921 г. объединить гравитацию и электромагнетизм в довольно изящной схеме, основанной не на четырехмерной, а на пятимерной геометрии. Пятая координата, впрочем, играла вспомогательную роль; ее смысл лучше всего был расшифрован позднее В. И. Родичевым и Ю. В. Румером как действия или собственного времени.

Следует признать, что Калуца сумел придать своей теории убедительную форму, записав совместно максвелловские уравнения электродинамики и эйнштейновские уравнения гравитации в виде, совпадающем с эйнштейновскими уравнениями, но в *пятимерном* пространстве. При этом не возникло никаких добавочных членов, в противоположность практически всем другим вариантам единой теории, вводивших поправочные числа, которые каждый раз оказывались не имеющими физического смысла. Пятимерная метрика была использована О. Клейном в 1926 г. для первого вывода релятивистского квантового волнового уравнения, описывающего, как выяснилось позднее, бесспиновые частицы. Действительно, волновое пятимерное уравнение вида

$$\Delta\varphi' - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi}' + \frac{\partial^2\varphi'}{\partial x_5^2} = 0$$

при условии цикличности

$$\varphi'_r = \varphi(x_1, x_2, x_3, x_4)\, e^{\frac{imcx_5}{h}}$$

переходит в фундаментальное уравнение мезодинамики и всей релятивистской квантовой теории поля, послужившее основой и для вывода знаменитого спинорного дираковского уравнения для электрона, так называемое уравнение Клейна — Гордона:

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi} - \left(\frac{mc}{h}\right)^2\varphi = 0,$$

(Гордон рассмотрел позднее ряд свойств этого уравнения).

Эйнштейн, отдавший дань и пятимерному варианту, отойдя от животрепещущих вопросов современной физики, в последние годы сосредоточил свое внимание на варианте единой теории, связанном с несимметричной метрикой:

$$g'_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + b_{\mu\nu}, \quad (b_{\mu\nu} \neq b_{\nu\mu}),$$

в известном смысле близкой к теории Эддингтона, у которого, однако, в основе теории лежала не метрика, но аффинная связь. Никаких новых результатов и этот последний вариант единой теории поля, как и следовало ожидать, не принес.

Упомянем, наконец, запоздалый, в известном смысле, вариант единой геометризованной теории Шредингера, пытавшегося объединить не только гравитационное и электромагнитное, но также мезонное поле. Ввиду открытия многих видов мезонов, речь могла идти лишь о скалярном или векторном мезонном поле, представители которых как раз еще не найдены.

Фактические неудачи геометризованной единой теории поля показывают, что возможное объединение различных форм вещества и пространства — времени следует искать лишь на путях существенного учета элементарных частиц и их квантовой природы. Программа единой теории вещества середины XX в. может быть только квантовой, атомно-ядерной, релятивистской.

Перейдем теперь к важной и справедливо возбудившей широкое внимание главе физики, выросшей из общей теории относительности и связанной с космологией, т. е. строением мира в целом.

После фундаментальных работ по установлению основных уравнений общей теории относительности, а также рассмотрения ее отдельных вопросов (гравитационные волны, псевдотензор энергии и т. д.) Эйнштейн обратился к космологическим проблемам и в интересной (хотя и оказавшейся впоследствии неприемлемой) работе 1917 г. впервые после ньютоновой теории продвинул вперед этот вопрос. Речь идет о попытках трактовки Вселенной «в целом». Мы намеренно поставили эти слова в кавычках, чтобы подчеркнуть сугубо предварительный характер тех или иных экстраполяций на Вселенную даже самых фундаментальных и бесспорных закономерностей, установленных в исследованном конечном участке Вселенной с линейными размерами порядка 10^{27} *см*, т. е. около 10^{10} световых лет, и относящихся к конечному, хотя и очень большому (примерно 10^{10} световых лет) промежутку времени, в течение которого нами так или иначе исследованы атомные и звездные процессы. Ограничиваясь сперва статическими решениями уравнений тяготения, Эйнштейн пришел в 1917 г. к пространственно-

замкнутой модели однородной и изотропной Вселенной, в которой заключена некоторая масса μ, конечная вследствие конечной средней плотности вещества:

$$\mu = 2\pi^2 R^3 \rho,$$

где R — радиус сферического пространства, ρ — плотность вещества.

При этом Эйнштейн исходил из анализа трудности, отмеченной еще в XIX в. Нейманом и Зеелигером, имеющейся в ньютоновой теории тяготения и связанной с невозможностью равномерного заполнения евклидова пространства материей. Действительно, плотность материи на бесконечности будет равна нулю в случае наличия постоянного предела на бесконечности для гравитационного потенциала. Если бы Вселенная описывалась законом тяготения Ньютона, то при подобных обстоятельствах не только излучение, но и отдельные небесные тела имели бы некоторую вероятность покинуть центральную область и уходить на бесконечность. Ясно, что подобное обеднение вещества, безвозвратно теряющегося в бесконечности, мало правдоподобно. Для устранения аналогичной трудности, имеющейся и в новой теории, Эйнштейн предложил видоизменить уравнения общей теории относительности для гравитационных потенциалов $g_{\mu\nu}$ добавлением «космологического» члена $\lambda g_{\mu\nu}$ аналогично тому, как Нейман изменил добавкой $\Lambda\varphi$ уравнение Пуассона для ньютонова потенциала. Отметим, что космологический член играл бы роль «массы» у гравитационной волны или гравитона. Тогда удается добиться конечности средней плотности вещества и удовлетворить так называемому принципу Маха, казавшемуся Эйнштейну существенным, согласно которому инерция обусловлена исключительно взаимным влиянием тел. Конечно, следует отличать подобную гипотетическую космологическую концепцию исконной кривизны трехмерного пространства от представления, доказанного в общей теории относительности и подтвержденного наблюдением трех эффектов о сравнительно незначительном искривлении пространства — времени различными реальными телами.

Примерно одновременно с Эйнштейном голландский астроном де Ситтер нашел другое статическое решение эйнштейновских уравнений тяготения для всей Вселенной, соответствовавшее средней плотности материи, равной нулю, и искривлению всех четырех измерений.

Довольно произвольное введение дополнительного члена λg, отсутствие опытных подтверждений космологической модели Эйнштейна, ее неустойчивость и крайне неудовлетворительная по общим соображениям концепция замкнутой Вселенной конечного объема, вызвавшая справедливую бурю протестов; требо-

вание исчезающей плотности в де-ситтеровской модели и, наконец, доказанная позднее неустойчивость мира Эйнштейна,— все эти обстоятельства убедительно доказывали, что в работе Эйнштейна был дан лишь толчок к возобновлению космологических дискуссий, но далеко еще не было получено сколько-нибудь правильное ее решение.

Релятивистская космология вступила в новую фазу в 1922—1923 гг., когда А. А. Фридман, профессор Ленинградского университета и директор геофизической обсерватории, наиболее известный своими трудами по гидродинамике, опубликовал две классические работы, в которых была впервые указана возможность нестатических, зависящих от времени пространственно изотропных геометрических структур. Работы эти были продолжены Леметром и вызвали появление огромной литературы. Сам Эйнштейн, отнесшийся к ним сперва резко отрицательно, впоследствии полностью согласился с концепцией расширяющейся геометрической структуры Вселенной и мужественно отказался в печати от своих прежних идей о замкнутой статической Вселенной [1].

Теория Фридмана, как сейчас широко признается в научной литературе, является правдоподобным, и притом единственным выдержавшим натиск всесторонней критики объяснением замечательного явления смещения к красному концу спектральных линий внегалактических туманностей, открытого астрономами Слайфером и Хэббл (1925—1929 гг.), возрастающего по мере удаления объектов от нас и, очевидно, указывающего на какую-то фундаментальную закономерность. Толкуемое как допплер-эффект, подобное красное смещение непосредственно указывает на «разбегание» туманностей. Формула Хэббла для скорости удаления имеет вид:

$$v = \frac{D}{1790},$$

где расстояние D выражено в миллионах парсек; иначе говоря, на каждый миллион парсек (3,259 миллионов световых лет, или $3{,}0 \cdot 10^{24}$ *см*) скорость увеличивается на ~560 *км/сек*. Став на точку зрения расширяющейся геометрической структуры, мы должны затем выяснить, является ли радиус кривизны R положительным или отрицательным, что можно сделать при помощи уравнения, вытекающего из общей теории:

$$\frac{1}{R^2} = -\eta^2 + \frac{8\pi\varkappa}{3c^2}\rho,$$

[1] См. второе и третье издания книги Эйнштейна «The meaning of relativity» 1946 и 1950 гг. См. также перевод с третьего издания: А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. ИЛ, 1955.

где η — хэббловская константа скорости разбегания, равная $5{,}6 \cdot 10^{-26}$ *см.*$^{-1}$, $\varkappa$ — постоянная тяготения, равная $6{,}67 \cdot 10^{-8}$ *см*^{3} *г*$^{-1}$ *сек*$^{-2}$, ρ — плотность вещества.

Если правая часть больше нуля, т. е. средняя плотность ρ достаточно велика: $\rho > 6 \cdot 10^{-28}$ *г·см*$^{-3}$, то кривизна пространства будет положительной; при меньших плотностях получим отрицательную кривизну, т. е. бесконечное пространство. Точность астрономических данных еще недостаточна, чтобы дать определенный ответ на этот вопрос. По-видимому, мы имеем в нашей части Вселенной малую плотность и, следовательно, пространство отрицательной кривизны типа Лобачевского. Заметим, что обсуждавшееся неоднократно в литературе сжатие материи в точку покоится на грубейшем недоразумении, так как при достаточном сжатии и увеличении плотности вещества вступают в силу взаимодействия элементарных частиц, подчиняющихся квантовым законам, и начинают идти разнообразные ядерные реакции, связанные с превращением частиц, которые никак не учитывались в макроскопических уравнениях Эйнштейна — Фридмана. Таким образом, эти уравнения в подобных условиях станут, очевидно, совершенно непригодными. Кроме того, следует еще раз подчеркнуть, что релятивистская нестационарная космология покоится на ряде предположений и является самой предварительной попыткой описания поведения известного участка Вселенной, за границами которой дальнейшие наблюдения могут вскрыть много неожиданностей; например, возникает вопрос о сжимающихся и пульсирующих участках. Подчеркивая предварительный характер релятивистской космологии как надстройки над достаточно прочным фундаментом общей теории относительности с ее интерпретацией пространства — времени — тяготения, не следует, с другой стороны, преуменьшать ее успехи в объяснении хэббловского красного смещения, этого грандиозного явления, с бесспорностью наблюдаемого во Вселенной вплоть до отдаленнейших участков ее исследованной части.

Нельзя не отметить здесь большого числа разнообразных идеалистических интерпретаций и попыток фидеистического толкования возможного расширения Вселенной, которое, по первым прикидкам, должно длиться не менее 10^9—10^{10} лет, что любопытным образом совпадает со средним временем жизни наиболее долгоживущих радиоактивных элементов.

Изложением космологических проблем мы заканчиваем краткий очерк истории установления и развития общей теории относительности, явившейся в истории науки одним из самых грандиозных по своей глубине творений физической мысли.

Л. С. Полак

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

Развитие квантовой физики в первой четверти XX в. отчетливо делится на два почти равных по продолжительности периода. Первый период — от работ Планка 1900 г. до работ Бора 1913 г.; второй период — с 1913 по 1925 г., до разработки квантовой механики. Переломным пунктом было создание Бором квантовой теории атома.

Прогресс, достигнутый в развитии физики за это время, как и за любой другой период, является результатом коллективных усилий ученых всех стран; но основную роль в нем сыграли труды четырех крупнейших ученых: Планка, Эйнштейна, Резерфорда и Бора. Если бы этому периоду в истории физики понадобилось дать название, то, аналогично эпохе Галилея — Ньютона или Фарадея — Максвелла, его следовало назвать эпохой Планка — Эйнштейна — Резерфорда — Бора.

К квантовой теории атома Бора, завершившей первую половину рассматриваемого двадцатипятилетия и открывшей вторую, ведут три проблемы:

1) проблема распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела;

2) проблема строения атома из положительно и отрицательно заряженных электрических частиц;

3) проблема закономерностей в линейчатых и полосатых спектрах.

Рассмотрим их последовательно.

На грани XX в. на горизонте классической физики, как заметил Кельвин, были два темных облака, омрачавших ее чистое небо: опыт Майкельсона и проблема распределения энергии в спектре излучения черного тела.

Проблема распределения энергии в спектре теплового излучения (или, как часто говорят, проблема распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела) была связана с многочисленными проблемами светотехники, вытекавшими из развития искусственного освещения городов и предприятий. Разработка необходимой системы единиц яркости, интенсивности, освещенности и т. п. также требовала строгого научного фундамента. Классическая теория теплового излучения развивалась в непосредственной связи с экспериментальным исследованием. Более того, именно эксперимент взорвал классическую теорию на грани XX в. и заставил теорию для того, чтобы выразить опытные факты, встать на принципиально новый, неклассический путь.

Разработка этих проблем особенно интенсивно шла в конце XIX в. в Германии и, в частности, в Берлине. Это находит свое объяснение как в быстром промышленном развитии этой страны в рассматриваемый период, так и в серьезной экспериментальной работе, которая велась в этой области Берлинской палатой мер и весов, где работали крупнейшие экспериментаторы-оптики.

В Берлине же работал Макс Планк, который уже несколько лет занимался проблемой распределения энергии в спектре теплового излучения и которому предстояло сыграть в ее развитии решающую роль, так как он не только нашел правильный закон распределения энергии, но вместе с тем положил начало новой, квантовой, неклассической физике.

«Таким образом, 1900 год, когда Планк впервые формулировал гипотезу квантов энергии, был не только первым годом нового столетия в календарном летоисчислении, но и началом новой эры в развитии теоретической физики» [1].

Внутренняя логика развития проблемы излучения, выросшей в квантовую физику, привела к тому, что она далеко обогнала весьма скромные потребности техники конца XIX в.— начала XX в. и в последующем обусловила создание новых ее областей: электроники, радиотехники, рентгенотехники и т. п.

Для энергии E_λ в 1 см^3 теплового излучения абсолютно черного тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ классической физикой были даны две формулы: формула Вина

$$E_\lambda = c\lambda^{-5}e^{-\frac{b}{\lambda T}}d\lambda,$$

[1] Э. В. Шпольский. Атомная физика, т. 1. М.—Л., ГТТИ, 1949, стр. 268.

где b, c — постоянные, и формула Рэлея — Джинса:

$$E_\lambda = 8\pi kT\lambda^{-4}\, d\lambda,$$

где k — постоянная Больцмана.

Как показали опыты Луммера и Прингсхейма, формула Вина асимптотически верна в области коротких длин волн ($\lambda T \to 0$) и дает резкие расхождения с опытом в области длинных волн. В отношении же формулы Рэлея — Джинса опыты Рубенса и Курльбаума показали, что она асимптотически верна для длинных волн, но неприменима для коротких длин волн.

Для того чтобы объединить эти две формулы, было предложено много формул вида:

$$E_\lambda = cT^{5-\mu}\lambda^{-\mu}e^{-b/(\lambda T)^\nu},$$

которые при $\mu = 5$, $\nu = 1$ дают формулу Вина и при $\mu = 4$, $\nu = 1$, $b = 0$ — формулу Рэлея.

Продолжая свои исследования в области термодинамики различных процессов, Планк занялся изучением закономерностей излучения. Он исходил из того, что в замкнутой, пустой полости при заданной температуре распределение энергии по длинам волн не зависит от материала, из которого изготовлены стенки полости. В силу этого он мог для этих стенок предположить любое строение, которое удобно для вычислений. Единственным условием является способность стенок данной структуры излучать и поглощать радиацию, т. е. осуществлять обмен энергии между веществом стенки и средой (эфиром).

Естественно, что Планк выбрал простейшее строение, а именно набор вибраторов Герца, каждый из которых имел свою частоту и действовал при поглощении излучения как резонатор.

Вначале Планк произвел подсчет средней плотности излучения E_ν в интервале от ν до $\nu + d\nu$ согласно методам классической электродинамики, не вводя никаких противоречащих или дополняющих ее предположений. Он получил для связи между E_ν и средней энергией вибратора U следующее выражение [2]:

$$E_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U\, d\nu. \qquad (1)$$

Для дальнейших рассуждений Планк использовал второе начало термодинамики, показав, что если энтропия системы резонаторов S есть известная функция энергии колебания резонаторов U, то закон распределения энергии в спектре черного излучения может быть найден.

[2] M. Planck. Ann. d. Phys., 1, 69, 1900.

Как известно, при постоянном объеме

$$dS = \frac{dU}{T}.$$

Если считать, что закон Вина верен, то

$$U = A\nu e^{-\beta\nu/T},$$

где A — постоянная, а

$$\frac{dS}{dU} = -\frac{1}{\beta\nu}\ln\frac{U}{A\nu} \qquad (2)$$

и

$$\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{d^2S}{dU^2} = \frac{c}{U},$$

где c — постоянная.

Планк еще в 1899 г.[3] вывел закон Вина при помощи этого уравнения, полученного им из чисто термодинамических соображений.

Планк считал, что он нашел таким образом обоснование общего закона распределения, удовлетворяющего известным тогда экспериментальным данным, потому что руководствовался определенными методологическими соображениями о характере, который должны иметь общие законы природы. По его мнению, «так как в проблеме, взятой в целом, речь шла об универсальном законе природы и так как я тогда, так же как и сегодня, исходил из воззрения, что закон природы выражается тем проще, чем он является более всеобщим, где во всяком случае лишь вопрос о том, какая формулировка должна рассматриваться как простейшая, не всегда может быть решен без сомнений и удовлетворительно, то продолжительное время я думал, что закон, согласно которому $R\left[=\left(\frac{d^2S}{dU^2}\right)^{-1}\right]$ пропорционально энергии, должен представлять собою фундамент полного закона распределения энергии» [4].

Однако результаты экспериментальных исследований показали, что закон Вина в общем случае не верен. И в поисках нового общего закона Планк также руководствуется идеей отыскания возможно наипростейшего выражения. Но здесь, у входа в новую квантовую физику, критерий простоты делается все более зыбким, ибо что же действительно является наипростейшей формулировкой закона? В своих воспоминаниях Планк писал:

---

[3] M. Planck. Berl. Sitzber. XXV, 440, 1899.

[4] M. Planck. Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie, Vorträge und Erinerungen, Stuttgart, 1949, S. 128.

«На заседании немецкого физического общества 19 октября 1900 г. Курльбаум сообщил результаты проведенных им совместно с Рубенсом измерений энергии, из которых, между прочим, следовало, что с ростом температуры интенсивность излучения черного тела всегда оказывается пропорциональной температуре T, в резком противоречии с законом распределения Вина, согласно которому интенсивность излучения должна оставаться постоянной. Этот результат был мне устно сообщен авторами за несколько дней до заседания; поэтому я имел время еще до заседания рассмотреть вытекающие из него следствия моим методом и использовать его для подсчета энтропии связанных осцилляторов. Если для высоких температур T интенсивность излучения K_ν делается пропорциональной температуре, то и энергия осциллятора пропорциональна ей (согласно $U = \frac{c^3}{8\pi\nu^2 K_\nu}$), следовательно

$$U = cT,$$

и отсюда интегрированием $-\frac{dS}{du} = \frac{1}{T}$ получим

$$S = c \ln U.$$

Следовательно,

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{c}{U^2}.$$

Это соотношение при больших U должно заменить $\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{1}{\beta U}$, имеющее место при малых U. Если теперь искать общее соотношение, которое содержит оба указанные как граничные случаи, то как простейшее получим следующее выражение:

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{1}{U\left(\beta + \frac{U}{c}\right)}.[5]» \qquad (3)$$

Работа Планка, доложенная 19 октября 1900 г., названа им «Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung»[6]. Таким образом речь идет лишь об улучшении классического закона Вина.

Сообщение это начинается ссылкой на экспериментальные

---

[5] M. Planck. Zur Geschichte der Auffindung der physikalischen Wirkungsquantum (Fassung letzter Hand). Vorträge und Erinerungen, Stuttgart, 1949, S. 22—23.

[6] M. Planck. Verhandlungen d. Deutsch. Physikalischen Gesellschaft in Jahre 1900, Leipzig, S. 202—204.

работы Луммера и Прингсхейма, Кульбаума и Рубенса, а также Пашена, которые устанавливают, что «закон распределения энергии Вина не имеет всеобщего значения... а имеет характер предельного закона...» [7].

В работе «Entropie und Temperatur strahlende Wärme» [8] Планк показал, что закон Вина следует из (2) и, наоборот.

Там же Планк показал, что для определения энтропии надо знать не только суммарную энергию всех резонаторов, соответствующих излучению, но и энергию каждого резонатора. «...В результате этого я пришел к тому, чтобы конструировать совершенно произвольное выражение для энтропии, которое, хотя и было бы сложнее выражения Вина, но удовлетворяло бы подобно ему всем требованиям термодинамической и электромагнитной теории» [9]. Между всеми таким образом определяемыми выражениями, которые ближе всего по простоте к закону Вина и хорошо представляют экспериментальные факты, Планку «особенно бросилось в глаза одно» [10], удовлетворяющее этим требованиям и имеющее вид (3).

Планк указывает, что это выражение является простейшим из всех, которые дают S в виде логарифмической функции U, что требуется статистической вероятностной концепцией энтропии, и которые, кроме того, при малых значениях U приводят к закону Вина.

Последнее выражение (3) для $\frac{d^2S}{dU^2}$ увязывается и с законом Рэлея, если положить $\beta = 0$, что соответствует очень большим значениям U.

Из соотношения (3) получим

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \alpha \ln \frac{\beta + U}{U},$$

или

$$U = \frac{\gamma c_1}{e^{c_2/T} - 1}. \qquad (4)$$

Как показал Вин еще в 1893 г. [11], спектральная плотность энергии E_ν должна быть пропорциональна кубу частоты, умноженной на некоторую функцию ν/T:

$$E_\nu = \nu^3 \psi(\nu/T),$$

---

[7] Там же, стр. 203.
[8] M. Planck. Ann. d. Phys., 1, 719, 1900.
[9] M. Planck. Verh. Deutsch. Phys. Ges., Bd. 2, 1900, S. 203.
[10] Там же, стр. 203.
[11] W. Wien. Berlin. Sitzber., 9, II, 55, 1893.

а, следовательно, с помощью найденного Планком соотношения (1), получим

$$U = \nu\psi\left(\frac{\nu}{T}\right).$$

Таким образом,

$$U = \frac{c_1\nu}{e^{c_2\nu/T} - 1}$$

и, согласно (1), получаем

$$E_\nu = \frac{c_1\nu^3}{e^{c_2\nu/T} - 1} = \frac{c_1\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \qquad (5)$$

где c_1, c_2 — постоянные.

Это и есть формула Планка, которая хорошо согласуется с экспериментальными измерениями как в длинноволновой, так и в коротковолновой области. Так скромно появилась формула, которой предстояло быть началом новой эпохи развития физики.

Что произошло дальше? Вот что пишет Планк в своих воспоминаниях: «На следующий день утром меня отыскал коллега Рубенс и рассказал мне, что он после конца заседания, глубокой ночью сравнил мою формулу и данные своих измерений и нашел повсюду радующее согласие. Точно так же Луммер и Прингсхейм, которые первоначально думали, что они установили отклонения, скоро сняли свои возражения, потому что, как сообщил мне устно Прингсхейм, найденные отклонения были вызваны ошибкой в расчетах. В более поздних измерениях [12] формула (3) была вновь подтверждена и притом тем точнее, чем тоньше были применяемые экспериментальные методы» [13].

Во многих книгах по физике и даже в исторических обзорах часто пишут, что Планк первоначально получил свой закон, интерполируя между законом Вина и законом Рэлея—Джинса. На самом деле исторически дело обстояло совсем не так, потому что Рэлей вывел свой закон в том же, 1900 г., что и Планк. В своей работе Рэлей [14] исходил из закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. Он получил известную формулу:

$$E(\lambda, T) = 8\pi kT\lambda^{-4}\, d\lambda$$

---

[12] H. Rubens, G. Michel. Phys. Zeitschr. 22, 569, 1921.
[13] M. Planck. Vorträge u. Erinerungen, 1949, стр. 23.
[14] W. Rayleigh. Phil. Mag., 539, 1900; J. H. Jeans Phil. Mag., (6), 10, 91, 1905.

в результате подсчета, основанного на том, что каждая степень свободы имеет энергию $\frac{1}{2}\,kT$. Неудовлетворительность этой формулы для спектра излучения черного тела в целом общеизвестна, хотя, как мы отметили выше, она асимптотически правильна для длинных волн; так же хорошо известны и были отмечены уже вскоре после появления этой формулы абсурдные результаты, к которым она приводит (так называемая «ультрафиолетовая катастрофа»). Неудовлетворительность формулы Рэлея, конечно, облегчила физикам понимание необходимости нового неклассического подхода к проблеме [15].

Ни в работах 1900 г., ни в работах 1901 г. Планк не ссылается на результат Рэлея. То обстоятельство, что вывод Планка не может быть согласован с равномерным распределением энергии по степеням свободы, не вызвало больших возражений, так как сам этот закон представлялся недостаточно обоснованным и служил предметом оживленной дискуссии в физико-математической литературе. Однако неспособность классической теории дать правильный закон распределения энергии в спектре излучения, естественно, заставляла сомневаться в ее универсальной значимости для объяснения физических явлений.

В своем первоначальном виде формула Планка скорее всего может быть названа эмпирической формулой, так как соотношение (3) не имеет последовательного теоретического обоснования.

Почти два месяца, до середины декабря, Планк посвятил упорным поискам ее теоретического обоснования. Зная сложившееся мировоззрение Планка (ему было тогда 43 года), автора многочисленных работ в духе классической физики, ученика Гельмгольца, мы можем представить, сколько он перепробовал за это время всевозможных путей и формальных приемов для того, чтобы найти новому закону место в единой классической картине физических явлений. Но его не удавалось найти.

В своей нобелевской речи, произнесенной 2 июня 1920 г., Планк говорил:

«Однако, хотя эта формула излучения была абсолютно точной, ее значение ограничивалось тем, что она была лишь

---

[15] К формуле Рэлея — Джинса пришел и Лоренц, рассматривая излучение электронов при изменении скорости их движения в металле в момент столкновений с молекулами. Вычислив энергию, испускаемую и поглощаемую пластинкой металла, и разделив первую на вторую, Лоренц получил для излучения черного тела формулу Рэлея — Джинса. Однако при выводе Лоренц ограничился рассмотрением только тех случаев, когда свободный пробег электрона велик по сравнению с интервалами резкого изменения скорости. Таким образом, формула Рэлея — Джинса выведена Лоренцом лишь для больших длин волн, т. е. для той области, где она действительно оправдывается.

счастливо обнаруженной интерполяционной формулой. Поэтому с самого дня ее установления передо мной возникла задача отыскать ее подлинный физический смысл, и эта проблема привела меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью в духе развития идей Больцмана. Именно на этом пути после нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота просветилась и начало брезжить новое неясное и далекое сияние (neue ungeahnte Fernsicht aufzudämmern begann)»[16].

В том же 1900 г., 14 декабря Планк прочитал в немецком физическом обществе доклад «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normalspectrum»[17] («К теории закона распределения энергии в нормальном спектре»), с которого, собственно говоря, и начинается квантовая физика, поскольку в нем впервые был отброшен столь характерный для классической физики принцип непрерывности перехода из одного состояния в другое, непрерывности поглощения и испускания энергии.

Однако исходные предпосылки Планка были классические; они черпались в данном случае не из электродинамики со столь характерной для нее идеей континуума, а из молекулярно-кинетической теории и статистики Больцмана, атомистической по своему существу. Вместо феноменологического подхода, который, по словам самого Планка, был характерен для его работ по термодинамике лучистой энергии до 1900 г., он стремится теперь объяснить найденный закон с помощью раскрытого в духе Больцмана смысла энтропии.

«Для того чтобы применить соотношение $S = k \ln W$ к рассматриваемому случаю, я построил образ, состоящий из очень большого числа N одинаковых осцилляторов, и стремился подсчитать вероятность того, что этот образ обладает заданной энергией U_N. Так как далее величина вероятности может быть найдена только с помощью счета, то необходимо рассматривать энергию U_N как сумму дискретных равных друг другу элементов ε, число которых может быть обозначено через P(очень большое число). Тогда

$$U_N = NU = P\varepsilon, \tag{6}$$

где U обозначает среднюю энергию одного осциллятора»[18].

Это представление перенесено из статистического распределения частиц (атомов), что позволяло использовать понятие

[16] M. Planck. Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie. Vorträge u. Erinerungen, 1949, S. 129.

[17] M. Planck. Verhandl. Deutsch. Phys. Ges., II, 1900, S. 237—245.

[18] M. Planck. Vorträge u. Erinerungen, 1949, S. 25.

о термодинамической вероятности и логарифмический характер ее связи с энтропией. Как известно, Больцман вывел формулу для связи энтропии S с термодинамической вероятностью W не для индивидуальных молекул, а для грамм-молекулы, и поэтому у него энтропия определялась с точностью до произвольной постоянной (т. е. при W был неопределенный множитель пропорциональности). Планк же нашел выражение $S = k \ln W$, где энтропия имеет определенное, абсолютное значение; в это выражение входит постоянная Больцмана k.

Только в этом случае для U получается выражение:

$$U = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon / kT} - 1};$$

но так как

$$U = \nu\phi\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

то должно обязательно иметь место соотношение:

$$\varepsilon = h\nu, \tag{7}$$

т. е. средняя энергия простого вибратора Герца с частотой ν есть целое кратное $h\nu$.

Отсюда следует, что

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu / kT} - 1}$$

и

$$E = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu / kT} - 1} = \frac{8\pi c h \lambda^{-5} d\lambda}{e^{ch / \lambda kT} - 1}, \tag{8}$$

т. е. закон распределения энергии в спектре теплового излучения Планка.

Это выражение совпадает с формулой (5), в которой неопределенные постоянные заменены через h и k.

Пусть в полости с отражающими стенками заключено N резонаторов с частотой ν, N' резонаторов с частотой ν' и. т. д., где все N — большие числа. Пусть энергия системы равна E_t, причем часть этой энергии находится в среде в виде излучения, часть — в резонаторах.

Проблема состоит в нахождении распределения этой энергии в стационарном состоянии по частотам колебаний резонаторов и в определении температуры всей системы.

Планк сначала рассматривает только колебания резонаторов, для которых имеем

$$E + E' + \ldots = E_0 < E_t,$$

где E — энергия N резонаторов с частотой ν, E' — энергия N'[1] резонаторов с частотой ν' и т. д. Энергия $E_t - E_0$ находится

в среде в виде излучения. Рассмотрим, например, E. Тогда «если E рассматривается как неограниченно делимая величина,— говорит Планк,— то распределение E (между N резонаторами — *Л. П.*) возможно бесконечным числом способов. Мы рассмотрим, однако,— и это есть существенный пункт всего расчета — E как составленную из совершенно определенного числа конечных, равных частей и введем при этом универсальную постоянную $h = 6{,}55 \cdot 10^{-27}$ *эрг. сек.* Эта постоянная, умноженная на частоту резонаторов ν, дает элемент энергии ε в эргах, а при делении E на ε получим числа элементов энергии, которые распределены между N резонаторами. Если подсчитанное таким образом количество не есть целое число, то возьмем для P ближайшее целое число»[19].

Воспользуемся больцмановым понятием комплексий; тогда для P и N получим число возможных комплексий

$$\frac{(N+P-1)!}{(N-1)!\,P!},$$

или в достаточно хорошем приближении

$$\frac{(N+P)^{N+P}}{N^N \cdot P^P}.$$

Каждому произвольному распределению энергии E, E'... соответствует определенное число комплексий R. Из всех возможных распределений при постоянной энергии E_0 рассмотрим такое, для которого $R = R_0$ имеет наибольшее значение.

Распределение энергии найдется с помощью универсальной постоянной h, а температура ϑ — с помощью постоянной Больцмана $k = 1{,}346 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град* из формулы

$$\frac{1}{\vartheta} = k \frac{d \ln R_0}{dE_0}.$$

Величина $k \ln R_0$ есть энтропия системы резонаторов, равная сумме энтропий отдельных резонаторов. В результате вычислений получим формулу (8).

Планк подсчитал значения h и k на основе измерений распределения энергии в спектре черного тела; он получил:

$$h = 6{,}55 \cdot 10^{-27} \text{ эрг.сек},$$

$$k = 1{,}346 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}.$$

Современные их значения таковы:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг.сек},$$

$$k = 1{,}380 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}.$$

[19] M. Planck. Verhandl. Deutsch. Phys. Ges., Bd. 2, 1900, S. 239—240.

Входящая в формулу $S = k \ln W$ и формулу (8) константа k, как легко показать, связана с универсальной газовой постоянной следующим образом:

$$N = \frac{R}{k}.$$

Отсюда можно найти N — число молекул в грамм-молекуле газа. Планк нашел следующее значение для N:

$$N = 6{,}175 \cdot 10^{23},$$

которое хорошо согласуется со значением $6{,}40 \cdot 10^{23}$, принятым в то время. Это было большим успехом, что прекрасно понимал Планк. Более того, значение N, найденное таким образом, дает новый метод определения заряда электрона. Дело в том, что заряд грамм-иона, т. е. N ионов в электролизе, в то время считался равным 9,658 CGSM.

Обозначив через e заряд электрона в электростатических единицах, получим

$$Ne = 9{,}658 \cdot 3 \cdot 10^{10},$$

откуда $e = 4{,}69 \cdot 10^{-10}$ CGSE.

Двумя годами раньше Дж. Дж. Томсон нашел $e = 6 \cdot 10^{-10}$ CJSE. Значение, полученное Планком, значительно ближе к более точным современным экспериментальным значениям, которые дают $e = 4{,}802 \cdot 10^{-10}$ CGSE.

Планк рассматривал и вопрос о необходимости развитого им вывода закона. Он указывает, что пропорциональность элемента энергии ε частоте ν непосредственно следует из закона смещения Вина. Соотношение между E и U есть основное уравнение электромагнитной теории излучения. В остальном вывод основан на пропорциональности энтропии системы резонаторов с данной энергией логарифму полного числа возможных при этой энергии комплексий, т. е., во-первых, на законе $S = k \ln W$ и, во-вторых, на соотношении $W \sim R$. Последнее соотношение может быть оправдано только опытом.

В заключение этой работы Планк вычисляет значение некоторых универсальных констант, выражаемых через постоянную Больцмана k.

Сформулируем еще раз основные идеи рассмотренной работы Планка.

Установленное еще Больцманом положение, что число микросостояний, отнесенных к одному макросостоянию, является мерой вероятности последнего, как заметил Планк, применимо не только к системам, описание которых основывается на механике. Он применил это положение к системе из очень большого числа резонаторов с частотой ν.

Макроскопическое состояние задано полной энергией всех резонаторов, микросостояние же определено заданием энергии каждого отдельного резонатора. Для того чтобы число микросостояний, соответствующих одному макросостоянию, было конечным, Планк разделил полную энергию на конечное число одинаковых порций (квантов) энергии ε. Тогда логарифм числа способов, которыми можно распределить эти элементы энергии между резонаторами, определяет энтропию, из значения которой термодинамическим путем можно определить температуру.

Таким образом, в этом выводе неявно предположено, что отдельные резонаторы могут поглощать и испускать энергию только квантами. Этот вывод противоречит и механике и электродинамике. Первоначально это, к счастью для развития физики, не было замечено Планком.

Заметим, что здесь существенным было противоречие с механикой, в то время как выражение для плотности энергии излучения было совместимо с уравнениями Максвелла, хотя и не является необходимым их следствием. Это обстоятельство сыграло существенную роль в работах Планка 1910—1914 гг.

Важно отметить также, что средняя энергия резонатора (например, колеблющегося электрона) U по классической теории электромагнитного излучения остается неизменной в течение продолжительного интервала времени, если она связана с плотностью излучения E соотношением (1). Это есть результат применения классической механики для колеблющегося электрона, теории Максвелла для поля излучения и теории Лоренца для взаимодействия между ними. Так как, согласно классической теории, основанной на законе равномерного распределения энергии по степеням свободы, для осцилляторов в термическом равновесии имеет место соотношение $U_\nu = kT$, которое приводит к несправедливому в общем случае закону Рэлея — Джинса, то от него надо отказаться и принять закон Планка.

Отсюда Планк сделал вывод о существовании дискретных энергетических уровней в осцилляторах такого рода, вывод, разрушавший самые глубокие основы всех теорий, применявшихся для вывода формулы (1), построенных на предположении о непрерывном ходе явлений природы.

При $\nu \to 0$ из закона Планка (8) следует закон Рэлея, а при $\nu \to \infty$ —закон Вина (выраженный через постоянные h и k). Из того же распределения (8) легко получается также закон смещения Вина и закон Стефана — Больцмана.

Значение работы Планка выходит далеко за пределы той проблемы, которая в ней рассматривается. Развитие ее основной идеи квантования энергии, ограничение или отказ от

классической картины, заключенный в ней, сыграли важную роль и в формировании основных идей теории относительности Эйнштейна.

В своей творческой автобиографии, изложив некоторые соображения, развивающие идею Планка, Эйнштейн пишет:

«Благодаря такого рода рассуждениям уже вскоре после 1900 г., т. е. вскоре после основополагающей работы Планка, мне стало ясно, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность (за исключением предельных случаев)» [20].

Вполне естественно, что вначале смысл и значение гипотезы Планка не нашли правильной оценки. Вот что вспоминает Макс Борн:

«Как же были приняты эти идеи? Я позволю себе говорить о моем собственном опыте. В Геттингене, насколько я припоминаю, я ничего не слыхал о квантах; также и в Кембридже, где я весной и летом 1906 г. несколько месяцев слушал лекции Дж. Дж. Томсона и Лармора и прошел экспериментальный курс в Кэвиндишской лаборатории. Только тогда, когда я осенью 1906 г. приехал в Бреславль к Луммеру и Прингсгейму, я попал в настоящую квантовую атмосферу, ибо оба они сделали существенный вклад в экспериментальное изучение черного излучения. Но хотя в центре дискуссии стояла формула Планка, обсуждающие склонны были гипотезу Планка о квантовании энергии осциллятора рассматривать как предварительную рабочую гипотезу, а световые кванты Эйнштейна всерьез не принимали. Ведь в самом деле, Луммер был большой специалист в области волновой оптики — вспомните пластинку Луммера — и было слишком много требовать от того, кто каждый день наблюдал интерференцию, чтобы он поверил в возрождение корпускулярной теории. Делались попытки понять закон $\varepsilon = h\nu$ классически. Также и я повинен в этом прегрешении; приведу Вам, шутки ради, мои рассуждения. Вообразите яблоню, у которой длина l черенков яблок убывает пропорционально квадрату высоты H над землей, тогда $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{e}} \sim H$. Если теперь трясти яблоню с определенной частотой, то яблоки, висящие на определенной высоте, раскачиваются в резонанс, упадут вниз и долетят до земли с кинетической энергией, пропорциональной высоте, с которой они упали, а потому и пропорциональной частоте ν: Voilà! Теперь нам это рассуждение кажется наивным, чтобы не сказать — детским. Но в извинение мое

---

[20] А. Эйнштейн. Творческая автобиография. УФН, т. LIX, в. I, 1956, стр. 89.

могу сообщить, что сам Макс Планк привел эту модель в какой-то своей лекции. Откуда он ее взял — не знаю»[21].

Лауэ в автобиографии пишет: «Сразу же (в 1902 г.— *Л. П.*) я пошел на лекцию Планка по теоретической оптике. Я знал его как автора учебника по термодинамике, и мне было известно, что он много занимался оптикой. Но о его главном великом деянии — открытии в 1900 году закона излучения и квантово-теоретическом обосновании его — я ничего не знал; это были тогда еще непризнанные и потому мало известные исследования»[22].

Многие ученые считали, что вывод закона излучения Планка возможен не только с помощью квантовой гипотезы, но и каким-либо путем на основе чисто классических представлений. Все эти попытки оказались неудачными. Дело, однако, не только в этом, так как всегда можно было бы сказать, что еще будет найден правильный, пока не открытый классический способ вывода закона Планка.

Попытка объяснить закон Планка на основе классической статистики с привлечением квантовой гипотезы формально приводит к правильному выражению этого закона. Однако при этом возникает фундаментальная трудность, состоящая в том, что оказывается необходимым ввести фотоны с энергией $nh\nu$, где n — целое число. Это противоречит теории квантов света Эйнштейна, многократно подтвержденной экспериментальными данными.

Неудача этой попытки, по существу говоря, определяется невозможностью перевести волновой вывод формулы излучения на язык корпускулярной теории. Только в принципиально новой статистике — статистике Бозе — Эйнштейна — закон Планка нашел свое полное обоснование.

Применение классической статистики к корпускулярным световым квантам приводит к закону Вина, а не к закону Планка. Для подобного вывода закона Вина фазовое пространство квантов делят на небольшие ячейки и считают, что фотоны совершенно случайно распределены по этим ячейкам. Такие распределения будут при их многократном и независимом осуществлении отличаться числом и состояниями (например, с разными поляризациями) фотонов, которые попадут в ту или иную ячейку, хотя и будут равновероятны. Нормальным, т. е. наиболее вероятным при заданной общей энергии, будет распределение, которое соответствует закону Вина. Впервые Бозе[23] заметил, что вместо этого можно получить закон Планка, если,

[21] М. Борн. Альберт Эйнштейн и световые кванты. УФН, т. LX, 1956, стр. 126—127.

[22] М. Лауэ. История физики. М., ГТТИ, 1956, стр. 177.

[23] Bose. Z. Phys., Bd. 26, 1924, S. 178.

во-первых, принять объем ячейки равным h (что уже делали до него другие авторы), и, во-вторых, при описании равновероятных случаев не указывать, *какие* фотоны попадут в данную ячейку, но лишь *сколько* их там находится.

Как же развивалась теория распределения энергии в спектре излучения черного тела после исходных работ Планка 1900 г.? Это развитие, естественно, должно было идти по двум направлениям:

1) уточнение экспериментальной проверки закона Планка;

2) теоретическое выяснение действительной связи этого закона с классической физикой и того, насколько квантовая гипотеза противоречит всему кругу ее идей.

В январе 1901 г. появилась статья Янке, Луммера и Прингсхейма «Kritisches zur Herleitung der Wienschen Spectralgleichung»[24] («Критические замечания к выводу закона Вина»), в котором дана критика хода рассуждения Вина.

В августе 1901 г. появилась статья Луммера и Прингсхейма [25], в которой они критиковали экспериментальные результаты Пашена, считая их недостаточным обоснованием правильности закона Планка. Они отмечают тем не менее, что закон Планка ближе всех других, предложенных ранее, формул к действительности, хотя и отмечают небольшие систематические расхождения с ним в длинноволновой области.

В ноябре 1901 г. в том же журнале был напечатан ответ Пашена [26], который доказывал, что его экспериментальные результаты не могут быть оспариваемы.

В этом же году Рубенс и Курльбаум [27] опубликовали статью, в которой подробно изложили свои экспериментальные результаты и пришли к выводу, что формула Планка удовлетворяет их наблюдениям в длинноволновой области и, поскольку она охватывает и область малых длин волн (т. е. область закона Вина), имеет еще и преимущество простоты, перед всеми ранее предложенными формулами.

В 1901 г. была опубликована работа Пашена [28], который в результате подробного анализа полученных им и другими авторами экспериментальных данных пришел к выводу, что закон Планка действителен в широкой области от $1/\lambda T = 0{,}002$

---

[24] E. Jahnke, O. Lummer, E. Pringsheim. Ann. d. Phys. 4, Bd. 4, 1901, S. 225—230.

[25] O. Lummer, E. Pringsheim. Ann. d. Phys., 4, Bd. 6, 1901, S. 192—210.

[26] E. Paschen. Ann. d. Phys., 4, Bd. 6, 1901, S. 646—658.

[27] H. Rubens, F. Kurlbaum. Ann. d. Phys., 4, Bd 4, 1901, S. 649—666.

[28] E. Paschen. Ann. d. Phys., 4, Bd. 4, 1901, S. 277—298.

до 0,00001 и что это безусловно нельзя рассматривать как случайное совпадение.

В 1911 г. Э. Байш [29] опубликовал работу, посвященную экспериментальному подтверждению закона Вина и закона Планка в области коротких длин волн. Его результаты хорошо согласовались с законом Планка.

В этом же году Планк напечатал в «Annalen der Physik» статью [30], представляющую в несколько переработанном виде его доклады в Немецком физическом обществе, рассмотренные нами выше. В этой статье Планк еще более отчетливо формулирует необходимость дискретности значений энергии осциллятора, исходя из статистической трактовки энтропии. Он говорит: «Найдем теперь вероятность того, что N резонаторов обладают общей колебательной энергией U_N. Для этого необходимо рассматривать энергию U_N не как непрерывную, неограниченно делимую, но как дискретную, состоящую из целого числа конечных равных частей. Назовем такую часть элементом энергии ε, полагая вместе с тем $U_N = P\varepsilon$, где P — целое, в общем случае большое число, в то время как величину ε еще надо установить» [31].

В 1900 г. была напечатана законченная Планком еще в 1899 г. работа «Ueber irreversibile Strahlungsvorgänge» [32] («О необратимых явлениях излучения»), в которой он ставит своей задачей строго обосновать закон Вина, исходя из классической термодинамики и электродинамики. В этой работе он ввел понятие «нормального излучения», т. е. излучения, энергия которого распределена по отдельным колебаниям совершенно неупорядоченно.

В том же 1900 г. была напечатана законченная в марте того же года работа Планка «Entropie und Temperatur strahlender Wärme» [33] («Энтропия и температура излучаемого тепла»), в которой он еще пытается решить проблему черного излучения с классических позиций.

Продолжая свое исследование законов распределения энергии в излучении черного тела, Планк в 1901 г. печатает дополнение к своей работе «Ueber irreversibile Strahlungsvorgänge» [34].

На этом первый цикл исследований Планка о законе черного излучения закончился. Снова к этой проблеме он вернулся лишь в 1911 г.

В период с 1901 до 1905 г. теория Планка не получила даль-

---

[29] E. Baisch. Ann. d. Phys., 4, Bd. 35, 1911, S. 543—590.
[30] M. Planck. Ann. d. Phys., 4, Bd. 4, 1901, S. 553—563.
[31] Там же, стр. 556.
[32] M. Planck. Ann. d. Phys., 4, Bd. 1, 1900, S. 69—123.
[33] Там же, S. 719—737.
[34] M. Planck. Ann. d. Phys., 4, Bd. 6, 1901, S. 818—831.

нейшего развития. Ее соответствие экспериментальным данным никем не оспаривалось, но ее фундаментальная и революционная, с точки зрения истории физики, идея — идея прерывности возможных энергетических состояний — за это время ничем не обогатилась.

В 1905—1906 гг. появились исследования Эйнштейна и Эренфеста, посвященные закону Планка. Последние понимали, что кванты являются принципиально новым элементом физической картины мира, не укладывающимся в рамки классической физики (надо сказать, что даже сам Планк в то время не до конца понимал это) [35].

Уже в работе 1905 г., в которой было введено представление о квантах света (см. ниже, стр. 347), Эйнштейн показал, что из классической электродинамики вытекает только закон Рэлея — Джинса. На этом основании он сделал вывод, что электродинамика находится в противоречии с экспериментальными данными по излучению черных тел. Поэтому он сначала считал, что гипотеза квантов света противоречит гипотезе квантов энергии. Такая позиция вытекала, по-видимому, из того, что гипотеза квантов света была связана у него не с формулой Планка, а с законом Вина. В первоначальной форме теории Планка гипотеза квантов энергии состояла только в разделении энергии на равные конечным порции. Представление же о поглощении резонаторами энергии только в виде отдельных квант возникло первоначально лишь как следствие гипотезы квантов света Эйнштейна. Однако уже в 1906 г. появилась статья Эйнштейна, в которой он показал, что гипотеза квантов света вытекает из гипотезы квантов энергии [36]. Более того, Эйнштейн даже считает, «...что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу квантов света» [37].

Этот вывод Эйнштейн делает на основе рассмотрения формулы энтропии:

$$S = \frac{\overline{H}}{T} + \frac{R}{N} \ln \int e^{-\frac{N}{RT} H} dp_1 dp_2 \ldots dp_n,$$

где $\overline{H}$ — энергия системы при температуре T (H — энергия, как функция p_1, ..., p_n) и интеграл распространяется на все возможные значения произвольно выбранных переменных p_1, p_2,..., p_n. Эта формула была получена им в работе по анализу оснований термодинамики [38]. Прежде всего Эйнштейн

[35] Это видно хотя бы из «Лекций по теории излучения» Планка, 1906 г. (первое издание).

[36] A. Einstein. Ann. d. Phys., 20, 1906, S. 201.

[37] Там же, S. 203.

[38] A. Einstein. Ann. d. phys., Bd 11, 1903, S. 170.

показал, что для большого количества частиц эта формула переходит в формулу

$$S = \frac{R}{N} \ln \int_{H}^{H+\Delta H} dp_1\, dp_2 \ldots dp_n,$$

которая совпадает с формулой Больцмана — Планка:

$$S = \frac{R}{N} \ln W,$$

если положить

$$W = \int_{H}^{H+\Delta H} dp_1\, dp_2 \ldots dp_n,$$

где $p_1, \ldots, p_n$ — координаты и скорости всех резонаторов.

Далее Эйнштейн показал, что выражение для термодинамической вероятности совпадает с тем, при помощи которого Планк нашел свою формулу излучения только при условии, что энергия H может изменяться лишь на конечную величину $\varepsilon = \frac{R}{N} \beta\nu$, т. е. $\Delta H = \varepsilon$. Таким образом, изменение энергии осциллятора целыми квантами получается при выводе формулы излучения Планка, в чем Эйнштейн и видит связь обеих теорий.

В этой работе Эйнштейн снова подчеркивает, что теория квантов несовместима с классической механикой и электродинамикой. Он отмечает противоречие, которое создается введением в теорию осциллятора дискретности, свойственной теории квант. Он указывает, что благодаря этому оказывается несправедливым доказательство формулы Планка, связывающей плотность энергии со средней энергией резонатора, — формулы, с которой связаны все дальнейшие рассуждения Планка.

Наиболее вероятное объяснение того, почему выведенный при помощи этой формулы закон излучения все-таки правилен, по Эйнштейну, состоит в том, что классическая теория и не известная еще в то время квантовая теория дают для *средней* энергии резонатора одинаковый результат. Однако все эти трудности теории квант Эйнштейн рассматривает не как свидетельство ее неправильности, а как указание на необходимость ее дальнейшей разработки.

К работам Эйнштейна по анализу закономерностей черного излучения примыкают по своему характеру работы Эренфеста, опубликованные в те же годы.

В 1905 г. появилась статья Эренфеста «Über die physikalischen Voraussetzungen der Planck'schen Theorie der irreversibilen Strahlungvorgänge» [39], посвященная в основном докван-

[39] P. Ehrenfest. Sitzungber. Math.-naturwiss. Klasse d. Kais. Akad. Wissensch., Bd. LXIV, Abt. IIa, 1905, S. 1301—1314.

товым работам Планка по термодинамике черного излучения, но затрагивающая также и вопрос о квантах. Эренфест пишет, что работа Планка «Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum» посвящена комбинаторному способу введения энтропии в термодинамическую теорию излучения. Эренфест указывает, что он ограничивается только констатацией того, что эта статья Планка существенно основана на двух гипотезах:

1) гипотеза о равновероятном распределении энергии по резонаторам;

2) гипотеза о том, что энергия излучения различных цветов (частот) состоит из мельчайших частиц энергии (kleinsten Energieteilchen), которые имеют величину

$$\varepsilon_\nu = \nu \cdot 6{,}55 \cdot 10^{-27} \text{ эрг}.$$

Первая гипотеза, как отмечает Эренфест, имеет аналог в теории Больцмана; что же касается второй гипотезы, то Эренфест пишет: «Гипотеза «2», которая в ее современной форме, очевидно, имеет только формальный характер, нуждается еще в дальнейшем исследовании. Насколько я могу судить, в больцмановой теории аналог для нее не существует» [40].

Это, по существу, первое ясное указание на то, что гипотеза квантов энергии чужда классической физике.

В 1906 г. была напечатана новая статья Эренфеста о квантовой теории излучения [41]. Поводом для ее появления была книга Планка «Лекции по теории излучения». Эренфест, прочитавший эту работу еще до ее выхода в свет, проанализировал рассмотренные в ней вопросы квантовой теории черного излучения.

В этой статье высказаны некоторые идеи, предвосхитившие дальнейшее развитие квантовой теории.

В своих «Лекциях» [42] Планк рассматривал полость с диффузно отражающими стенками. Замкнутое в такой полости излучение с течением времени становится хаотическим, но распределение энергии измениться не может; поэтому «нечерное» излучение так и останется «нечерным». Для того чтобы излучение превратилось в «черное», необходимо присутствие внутри полости резонаторов, обладающих затуханием. Взаимодействуя с излучением, они осуществляют перераспределение энергии между частотами до тех пор, пока не установится динамическое равновесие, т. е. излучение не станет «черным». Эренфест указывает, что коль скоро излучение достигло «черного состояния», перераспределение энергии прекращается и

[40] P. Ehrenfest. Цит. соч., стр. 1313.
[41] P. Ehrenfest. Phys. Z.; 5, 7, 1906, S. 528—532.
[42] М. Планк. Лекции по теории излучения. Изд. 1, 1906.

наличие или отсутствие резонаторов ничего не может изменить в состоянии излучения. Далее Эренфест рассматривает «черное» излучение, заключенное в идеально отражающей полости при отсутствии в ней каких бы то ни было резонаторов. Такая система полностью эквивалентна газокинетической системе, состоящей из некоторого идеального газа, молекулы которого не испытывают соударений между собой.

Ударяясь о стенки, которые без ограничения общности можно представить состоящими из неподвижно закрепленных упругих шаров, молекулы беспорядочно рассеиваются, не меняя, однако, при этом своей первоначальной энергии. Планк указывал также на аналогию между газовой системой и излучением в полости, но он считал, что эта аналогия не является полной, так как между молекулами газа может происходить обмен энергий, приводящий к некоторому стационарному состоянию, соответствующему максимуму энтропии, а при излучении в полости такой обмен происходить не может. Это замечание Планка, как отметил Эренфест, отпадает, если излучение уже «черное». Эквивалентность газокинетической системы и полости с «черным» излучением позволила Эренфесту *полностью* использовать весь математический аппарат кинетической теории газов при рассмотрении «черного» излучения. Воспользовавшись этой аналогией, Эренфест определяет максимум энтропии

$$S = \text{const} - k\int_0^\infty d\nu N(\nu)\iint_{-\infty}^{\infty} \ln F(\nu, f, g)\, df\, dg,$$

где $F(\nu, f, g)$ — функция распределения относительно канонических переменных f координат и g импульсов, а $N(\nu)$ — число частиц с данной частотой ν. Этот максимум определяется при двух дополнительных условиях:

$$\iint_{\infty-}^{\infty} F(\nu, f, g)\, df\, dg = 1 \text{ и } \int_0^\infty d\nu N(\nu)\iint_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_\nu F(\nu, f, g)\, df\, dg = W.$$

Первое представляет собой условие нормировки, т. е. выражает равенство единице вероятности излучения любой энергией. Второе условие выражает равенство полной энергии системы интегралу от средней энергии частиц с данной частотой, умноженной на число частиц с данной энергией. Очевидно, что в таком случае получится распределение, соответствующее закону Рэлея — Джинса, ведущему к «ультрафиолетовой катастрофе».

Основная идея анализа Эренфеста (рассмотрение идеального газа, заключенного в полости) является предвосхищением

метода статистики световых квант. Дальнейшим развитием этого метода явилась работа Круткова[43], опубликованная в 1914 г., в которой он отчетливо показал, что в рамках классической статистики световых квантов получается формула излучения Вина.

Рассуждение Эренфеста, исходящее из самых общих соображений, доказывает, что из классической статистики газокинетического ансамбля Максвелла — Больцмана вытекает лишь закон Рэлея — Джинса, а не закон Планка, который, следовательно, несовместим с этой статистикой. «Напрашивается вопрос,— говорит Эренфест,— с помощью каких средств планковская теория комплексий устраняет эти трудности?»[44]. Естественно, что при нахождении максимума энтропии следует наложить еще какие-то дополнительные условия, кроме приведенных выше двух условий. Однако из классической статистики такие условия получить нельзя. Единственное, что можно сделать, исходя из принципов классической статистики,— это написать, какой вид в общем случае должно иметь это новое, еще неизвестное, условие.

Очевидно, это условие, каково бы оно ни было, должно приводить к выражению вида:

$$\int_0^\infty d\nu N(\nu) \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(\nu, f, g)\, df\, dg = A,$$

где Φ — некоторая произвольная функция, а A — постоянная. Тогда наиболее вероятное распределение может быть определено методом неопределенных множителей Лагранжа. Расчет дает

$$F(\nu, f, g) = e^{-[1+\rho+\sigma E_\nu (f, g)+\tau\Phi(\nu, f, g)]},$$

где ρ, σ, τ — постоянные.

Конкретный вид этой формулы зависит от совершенно произвольного выбора функции $\Phi(\nu, f, g)$. Эренфест поэтому считал, что нахождение функции $\Phi(\nu, f, g)$ и физическое ее истолкование — путь для дальнейшего развития квантовой гипотезы[45].

Так как Эренфест рассматривает «черное» электромагнитное излучение в замкнутой зеркальной полости при отсутствии резонаторов и показывает применимость к нему статистических методов, то можно полагать, что именно в его постановке

---

[43] Ю. А. Крутков. ЖРФХО, XLVI, 1914, стр. 1—21.

[44] P. Ehrenfest. Phys. Zeitschr. 5 ser., 7, 1906, S. 531.

[45] См., например, Л. Ландау, Е. Лифшиц. Квантовая механика. М., Гостехиздат, 1948.

задачи и в применяемых им методах лежат истоки теории Дебая (1910 г.).

В заключении статьи Эренфест делает два важных замечания относительно гипотезы квантов энергии. Во-первых, он указывает, что разделение энергии на равные порции равносильно гипотезе о том, что резонаторы могут иметь энергии только кратные некоторому определенному кванту энергии. Во-вторых, Эренфест подчеркивает, что такое разделение на кванты справедливо только для некоторой фиксированной частоты.

Какие-либо новые опытные факты относительно черного излучения в этот период отсутствовали. Обреченность попыток вывести закон Планка из чисто классических представлений о непрерывности процессов еще отнюдь не была раскрыта. Поэтому в этих условиях идея квантов энергии могла развиваться только при успешном применении ее к другим физическим явлениям.

Так как кванты энергии появились в физике при рассмотрении равновесного излучения полости из вещества, т. е. при исследовании одного из фактов взаимодействия излучения и вещества, то естественно было применить эту идею к изучению других случаев такого взаимодействия, тем более что в явлениях, связанных с распространением света, континуальная (волновая) теория с исключительной убедительностью и законченностью объясняла все известные явления. Не объяснен-ным классической физикой, хотя и хорошо изученным случаем взаимодействия света и вещества был фотоэлектрический эффект. Это явление превращения энергии света в кинетическую энергию вырванных из вещества электронов и оказалось следующим объектом применения и развития квантовой гипотезы. И именно здесь кванты света (фотоны) впервые получили признание.

Надо отметить, что квантовая гипотеза Планка оказала влияние на развитие основополагающих исследований Эйнштейна по теории относительности [46]. С другой стороны, появление в 1905 г. первой и основной работы Эйнштейна по специальной теории относительности, в которой переоценивались и обобщались принципы классической физики и выяснялась принципиальная ограниченность классической механики, не могло не отразиться на психологической подготовленности ученых к ломке основных понятий физики XIX в. Специальная теория относительности утверждала неправомерность универсализации понятий и законов классической физики. Поэтому она оказалась одним из факторов, благоприятствовавших выдвиже-

[46] А. Эйнштейн. Творческая автобиография. УФН, т. LIX, 1956, стр. 89.

нию и принятию гипотез, в основе которых лежали предпосылки, чуждые классической физике.

Планк считал, что квантовые свойства относятся к самому процессу взаимодействия вещества и излучения. Что же касается свободной радиации, то он представлял ее в виде электромагнитных волн согласно классической теории Максвелла. Следующий шаг был сделан Эйнштейном в 1905 г.

В работе «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunk» («Об одной эвристической точке зрения, касающейся получения и превращения света») [47] Эйнштейн высказал гипотезу о том, что световой поток — по крайней мере в случае небольших плотностей излучения — состоит из дискретных корпускулярных квантов энергии $h\nu$ (сам Эйнштейн еще не употреблял для постоянной Планка обозначения h).

В качестве обоснования этой гипотезы он рассмотрел правило Стокса, фотоэффект и некоторые другие явления.

Название этой работы Эйнштейна является необычным как вообще для работ по физике, так и для самого Эйнштейна. Необычность эта заключена в словах «об одной эвристической точке зрения». Ни в почти одновременно опубликованных им работах по специальной теории относительности и броуновскому движению, ни в работах, напечатанных впоследствии, не встречается такой подчеркнутой философской оценки содержания исследования. Эвристическая точка зрения в данном случае означает, что Эйнштейн не утверждает реального существования в материальном мире квантов энергии, а рассматривает их только как средство, позволяющее объяснить некоторые не объяснимые иным путем явления. Однако это не то, что часто называют «рабочей гипотезой». В последней обычно берется упрощенная модель или схема (первые члены в разложении в ряд, нулевое или, реже, первое приближение) изучаемых явлений, и вопрос о том, станет ли эта рабочая гипотеза частью физической картины мира, зависит от заключенной в ней степени приближения к действительным законам. В рассматриваемом же нами случае дело обстоит не так. Кванты энергии с точки зрения формальной логики либо существуют, либо нет. Ведь Эйнштейн вводил не какую-либо форму связи, которая может быть заменена другой, а некоторую новую, неизвестную ранее в физике субстанциальную связь, если не было бы оговорки об эвристической точке зрения. В то же время с точки зрения подтвержденной бесчисленными опытами классической волновой теории света, распространение последнего есть ряд последовательных изменений состояния некоторой среды. Таким

[47] A. Einstein. Ann. d. Phys., 4. Bd. 17, 1905, S. 132—148.

образом, переход к фотонной картине вносил путаницу в характерное для классической физики четкое разделение длительно пребывающей во времени вещи (предмета) и ее состояния, меняющегося со временем.

Подчеркивание эвристической точки зрения освобождало Эйнштейна от разрыва как с классической физикой, так и с классической формальной логикой, разрыва, к которому не были подготовлены тогда не только физики-теоретики, но и сам Эйнштейн. Может быть, это обстоятельство лучше всего показывает, какой переворот в физической картине мира, в методах ее построения заключался в «эмбриональном» виде в этой работе Эйнштейна.

Он указал, что если существуют только дискретные состояния, то должны существовать и дискретные их изменения и, следовательно, световые кванты $h\nu$. Эти смелые выводы, при всей их простоте, настолько решительно порывали с классическими представлениями, что даже Бор долго не рисковал перейти от условия частот и квантовых скачков в атоме к представлению о квантах света.

В начале статьи Эйнштейн указывает, что атомно-электронная теория газов и других тел и максвеллова теория электромагнитных процессов в «так называемом пустом пространстве»[48] имеют глубокое формальное различие. Первая оперирует с состояниями, определяемыми полностью положениями и скоростями конечного числа частиц, а вторая требует для определения электромагнитного состояния пространства непрерывных пространственных функций. Иными словами, энергия тела не может быть разделена на бесконечно малые части в отличие от энергии излучения или электромагнитного поля.

Теория Максвелла объясняет ряд явлений распространения света, но приходит к противоречию при рассмотрении явлений излучения и превращения света. Поэтому, говорит Эйнштейн, «...мне кажется, что ...[эти явления] сделаются более понятными при предположении, что энергия света распределена в пространстве не непрерывно. С точки зрения принятого здесь предположения при распространении вышедшего из какой-либо точки луча света энергия не непрерывно распределяется во все более и более возрастающем пространстве, но состоит из конечного числа локализованных в точках пространства квантов энергии, которые движутся без того, чтобы делиться на части, могут поглощаться и испускаться только как целое»[49].

Таким образом, Эйнштейн хочет обосновать введение квантов света аналогией с тем, как энергия газа делится на конеч-

[48] A. Einstein, Ann. d. Phys., 4, Bd 17, 1905, S. 132.
[49] Там же, S. 133.

ное число конечных частей, поскольку доказано его атомистическое строение.

Однако необходимо еще раз отметить, что эта аналогия заключает в себе противоречие с классической физикой, так как последняя имела два различных аспекта для газа вещественных частиц и для поля — аспекты дискретный и континуальный. Перенос дискретности на поле равновесного излучения был первым шагом в направлении к развитию корпускулярно-волнового синтеза, в выяснении того, что как классическая волновая, так и корпускулярная картины, взятые сами по себе, являются лишь предельными случаями единой физической картины.

Эйнштейн сначала излагает положение с законом излучения черного тела, а затем переходит к определению Планком элементарного кванта. Он показывает далее, что эти элементарные кванты Планка в некоторой степени не зависят от развитой им теории черного излучения. Исследуя энтропию монохроматического излучения на основе принципа Больцмана, Эйнштейн приходит к выводу: «Монохроматическое излучение незначительной плотности (внутри области применимости закона Вина) ведет себя с точки зрения теории теплоты так, как если бы оно состояло из независимых друг от друга квантов энергии, имеющих величину $\frac{R\beta\nu}{N}$» [50]. Эйнштейн показал, что вероятность того, что в некоторый, произвольно выбранный момент времени вся энергия радиации оказалась в объеме v, являющемся частью полного объема v_0, будет

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^{E/h\nu}.$$

Из кинетической теории газов известно, что если газ, заключенный в объеме v_0, состоит из n молекул, то вероятность того, что в некоторый, произвольно выбранный момент времени все n молекул будут в части этого объема v, равна

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^{n}.$$

Сопоставив эти выражения, Эйнштейн указывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из $E/h\nu$ квантов энергии или фотонов, каждый из которых имеет величину $h\nu$ и которые независимы друг от друга.

Здесь необходимо сделать два замечания. Прежде всего, вывод Эйнштейна был основан на законе Вина, а не на законе Планка. Это впоследствии было строго показано рядом авторов. Для того чтобы получить закон Планка с помощью классиче-

[50] A. Einstein. Ann. d. Phys., 4, Bd. 17, 1905, S. 143.

ской статистики, необходимо допустить существование фотонов с энергией $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$ и т. д. Наконец, укажем, что наименование «фотон» было введено в науку только в 1926 г. Льюисом[51].

Таким образом, в отличие от Планка Эйнштейн выдвинул гипотезу о том, что кванты величины $h\nu$ существуют не только в процессе поглощения или испускания, но имеют и самостоятельное существование, и применил эту гипотезу к фотоэффекту. Он объяснил хорошо известные и необъяснимые с точки зрения волновой теории света особенности фотоэлектрического эффекта и сформулировал основной закон фотоэлектрического эффекта:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - P,$$

где $\frac{mv^2}{2}$ — максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, P — работа выхода электрона. Отсюда, естественно, вытекает существование порогового значения ν для осуществления фотоэлектрического эффекта.

Уравнение Эйнштейна было проверено экспериментально в 1912 г. Комптоном и Ричардсоном и в 1916 г. Милликеном. Оно полностью объясняет фотоэлектрический эффект, что невозможно для классической физики, поскольку она требует запаздывания во времени, связанного с необходимостью накопления в облучаемом веществе достаточной энергии.

В 1908 г. Штарк [52], исходя из изложенной гипотезы Эйнштейна, нашел соотношение между частотой фиолетового конца полосатого спектра газов и их ионизационным потенциалом

$$I = h\nu.$$

В 1909 г. Штейбинг [53] экспериментально подтвердил теорию Штарка. В 1908 г. Штарк [54] предложил, а в 1912 г. Эйнштейн [55] разработал аналогичную концепцию фотохимического разложения, согласно которой при диссоциации молекулы в результате поглощения излучения частоты ν количество энергии, поглощенной молекулой, будет $h\nu$. Варбург выполнил эксперименты, в целом подтвердившие изложенную теорию.

Ряд авторов показал, что импульс фотона равен $h\nu/c$, так как масса его равна $h\nu/c^2$, а скорость — c. Формулированная Эйнштейном корпускулярная теория света непосредственно приводит к релятивистскому выражению допплер-эффекта. Согласно этой теории, допплер-эффект есть просто лоренц-пре-

[51] N. Lewis. Nature, 18 Dec., 1926.
[52] I. Stark. Phys. Z., IX, 1908, S 65.
[53] W. Steubing, Phys. Z., X, 1909, S. 787.
[54] I. Stark. Phys. Z., IX), 1908; S. 889.
[55] A. Einstein. Ann. d. Phys., 37, 1912, S. 832 38, 1912, S. 881.

образование четырехмерного вектора энергии-импульса для кванта света.

В декабре 1906 г. Эйнштейн развил квантовую теорию, найдя для нее новую область приложения: изучение теплоемкости твердых тел.

Основная идея Эйнштейна состояла в том, что представление о квантах энергии является следствием классической теории. В начале своей работы «Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der specifischen Wärme» [56] («Теория излучения Планка и теория теплоемкости»), опубликованной в 1907 г., он пишет: «...я показал, что истолкование закона распределения энергии черного излучения в духе больцмановской интерпретации второго начала приводит нас к новому пониманию явлений испускания и поглощения света, которое хотя и не имеет никоим образом характера полной теории, однако заслуживает быть рассмотренным, так как облегчает понимание ряда закономерностей»[57].

Задачей этой работы является показать, что теория излучения Планка приводит к видоизменению молекулярно-кинетической теории теплоты, позволяющему преодолеть ряд известных ранее трудностей, и приводит также к известной связи между оптическими и тепловыми явлениями твердых тел.

Как известно, из классической теории теплоемкости твердого тела не следовала экспериментально найденная зависимость ее от температуры. Нернст и его школа выяснили, что закон Дюлонга и Пти верен лишь при достаточно высоких температурах, а при низких — теплоемкость любых тел очень мала.

Эйнштейн показал, что при применении закона Планка на каждую степень свободы должна приходиться средняя энергия

$$\frac{1}{2}kT\frac{h\nu/kT}{e^{h\nu/kT}-1},$$

а на грамм-атом кристалла — энергия

$$3RT\frac{x}{e^{x}-1},$$

где $x=\frac{h\nu}{kT}$ и допущено для простоты, что все вибраторы имеют частоту ν. Так как удельная теплоемкость равна производной энергии по температуре, то

$$C_V=\frac{d}{dT}\left(3RT\frac{x}{e^{x}-1}\right)=3R\frac{x^2e^{x}}{(e^{x}-1)^2}\approx 6\frac{x^2e^{x}}{(e^{x}-1)^2}.$$

[56] A. Einstein. Ann. d. Phys., 4, Bd. 22, 1907, S. 180—190, 800.

[57] Там же, стр. 180.

Согласно этой формуле, при уменьшении температуры теплоемкость падает, а при приближении к абсолютному нулю для всех тел — стремится к нулю. При возрастании же температуры теплоемкость стремится к 6 *кал* [58]. Многочисленные экспериментальные исследования были выполнены для определения x, т. е. для определения ν.

Очевиден существенный недостаток этой теории: в ней предположено, что все атомы в твердом теле колеблются с одной и той же частотой ν. На самом деле этого нет. Для того чтобы определить частоты колебаний атомов твердого тела, Дебай [59] в 1912 г. рассмотрел в качестве приближенной модели упругое твердое тело и упругие продольные и поперечные волны в нем. Он показал, что в таком твердом изотропном теле объемом V число колеблющихся центров с частотой от ν до $\nu + d\nu$ равно

$$4\pi V \nu^2 d\nu \left(\frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3}\right),$$

где c_t и c_l — скорости поперечных и продольных волн, соответственно. Далее он предположил, соединяя классическое волновое представление с квантовым, что каждой из частот соответствует такая же энергия, какая по закону Планка должна быть приписана световым волнам.

Энергия волн с частотой от ν до $\nu + d\nu$ в единице объема будет тогда равна

$$4\pi h \nu^3 \left(\frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3}\right) \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

а полная энергия получится интегрированием этого выражения по ν. Выбор пределов интегрирования представляет серьезную трудность, так как, строго говоря, в непрерывном упругом теле (модель Дебая) ν изменяется от нуля до бесконечности. Дебай преодолел это затруднение с помощью несколько произвольного, хотя и представляющегося естественным допущения, что верхним пределом является ν_m такое, что полное число колебаний, меньших ν_m, равно $3N$, где N — число атомов в теле. В результате он пришел к выражению, в которое входит величина

$$x_m = \frac{h\nu_m}{kT}.$$

---

[58] Свои исследования Эйнштейн развил в 1911 г. в статье «Elementare Betrachtungen über die thermische Molekularbewegung in festen Körpern». Ann. d. Phys., 4, Bd. 35, 1911, S. 679—694.

[59] P. Debye. Ann. d. Phys., Bd. 39, 1912, S. 789.

Если обозначить постоянную величину $\frac{h\nu_m}{k}$ через θ, то $x_m = \theta/T$. Таким образом, атомная теплоемкость есть универсальная функция отношения T/θ, т. е. температуры T, деленной на температуру θ, которая является характеристической для данного тела. Выводы этой теории Дебая оказались, в общем, в хорошем согласии с экспериментальными результатами для многих элементов.

При высоких температурах формула, полученная Дебаем, приводит к закону Дюлонга и Пти, а при низких температурах атомная теплоемкость оказывается пропорциональной кубу абсолютной температуры. И этот закон был также хорошо подтвержден экспериментом.

Отметим, что почти одновременно с Дебаем Борн и Карман[60] рассмотрели ту же проблему с точки зрения динамики кристаллической решетки, т. е. в более общем и строгом виде, чем Дебай, метод которого имеет зато преимущество простоты. В отношении зависимости атомной теплоемкости от температуры (при низких температурах) Борн и Карман пришли к тому же результату, что и Дебай.

В 1909 г. Эйнштейн [61] сделал следующий важный шаг в развитии квантовой теории, рассмотрев проблему флуктуаций излучения, заключенного в некотором объеме при температуре T.

Переход к изучению флуктуаций был логически необходим и неизбежен, поскольку проблема закона распределения энергии в спектре изучения рассматривалась в корпускулярном аспекте с точки зрения классической статистики. Закономерности любого статистического ансамбля (в том числе ансамбля конечного и очень большого числа световых квантов), поведение которого определяется вероятностью, всегда связаны с флуктуационными явлениями. Из термодинамики, применимость которой не зависит от того, принят в рассмотрение непрерывный или прерывный механизм поглощения или испускания излучения и его строения, следует, что средний квадрат флуктуации энергии в единице объема в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ равен

$$\bar{\varepsilon}^2 = kT^2 \frac{dE}{dT} .$$

Взяв E согласно распределению Планка, получим

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{8\pi h^2 \nu^4 \, d\nu}{c^3} \left(\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} + \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)^2} \right) = h\nu E + \frac{c^3 E^2}{8\pi \nu^2 \, d\nu} .$$

[60] M. Born, T. Kármán. Phys. Z., XIII, 1912, S. 297; XIV, 1913, S. 15, 65.

[61] A. Einstein. Phys. Z., X, 1909, S. 185.

Для закона Вина мы получили бы соотношение

$$\bar{\varepsilon}^2 = h\nu E,$$

а для закона Рэлея — Джинса

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{c^3 E^2}{8\pi\nu^2 d\nu},$$

т. е. средний квадрат флуктуаций, согласно закону Планка есть сумма средних квадратов флуктуаций по закону Вина и закону Рэлея — Джинса.

Так как флуктуации, вызванные независимыми причинами, аддитивны, то возникает мысль, что флуктуации при высоких частотах (область применимости закона Вина) вызваны другими причинами, чем в случае низких частот (область применимости закона Рэлея — Джинса).

Рэлеевская флуктуация, как показал Лоренц [62], является необходимым следствием интерференции волн, заполняющих полость во всех направлениях, а флуктуация $h\nu E$ вытекает из молекулярно-кинетической теории для единицы объема идеального газа, если допустить, что каждая молекула имеет энергию $h\nu$, т. е. она может быть получена из корпускулярной теории.

Заметим, что отношение первого члена (корпускулярного) ко второму (волновому) в соотношении (9) равно

$$e^{h\nu/kT} - 1$$

и поэтому при низких частотах и высоких температурах $\left(\frac{h\nu}{kT} \to 0\right)$ преобладает волновой член, а при высоких частотах и низких температурах $\left(\frac{h\nu}{kT} \to \infty\right)$ преобладает первый (корпускулярный) член.

Отсюда следует вывод, что, если принять экспериментально подтвержденный закон Планка, то ни волновая, ни корпускулярная теория света не могут в отдельности представить его природу. Каждое из этих представлений с достаточным приближением верно лишь для определенной области явлений.

Записав выражение для флуктуации излучения в общем виде

$$(\overline{\Delta\varphi})^2 = \bar{\varphi} + \bar{\varphi}^2 = \varphi(\varphi + 1),$$

замечаем, что в нем проявляется та особенность квантовых

[62] H. Lorentz. La théorie statistique et thermodynamique. Leipzig, 1916, p. 114.

эффектов, что из классических формул получаются квантовые заменой φ^2 через $\varphi(\varphi + 1)$.

Таково первое отчетливое выражение корпускулярно-волнового синтеза света в физике.

В годы, непосредственно следующие за появлением этой работы Эйнштейна, корпускулярно-волновой дуализм света проявился в области изучения рентгеновых лучей.

В 1910 г. вопрос о природе рентгеновых лучей еще не был решен. Брэгг [63] сделал попытку решить его с корпускулярной точки зрения. Он отметил важное значение того факта, что энергия электронов, вырываемых рентгеновыми лучами из вещества, такова же, как энергия электронов, которые возбудили вначале рентгеново излучение, независимо от расстояния и распространения последних. Это заставляло думать, что энергия пучка рентгеновых лучей сохраняется, а не распределяется по все возрастающей поверхности с уменьшающейся соответственно плотностью. Вся энергия пучка передается одному электрону. Брэгг пришел к выводу, что в этом явлении действует «общий принцип, что если одна реальная сущность (α, β, γ, рентгеново или катодное излучение) входит в атом, то одна и только одна сущность исходит из него, унося с собой энергию вошедшей в атом сущности» [64]. Энергия при этом обмене не теряется. Таким образом, рентгеновы лучи не рассеивают свою энергию при распространении, т. е. они представляют собой корпускулы. Этот вывод Брэгга экспериментально подтвердил в 1911—1912 гг. Вильсон [65] с помощью своей камеры.

В своих рассуждениях Брэгг не использовал квантовых представлений; но после открытия самим Брэггом, а также Лауэ, Фридрихом, Книпингом и другими волновых свойств рентгеновых лучей и выяснения их места в спектре электромагнитного излучения корпускулярно-волновой дуализм естественно распространился и на них.

Несмотря на многочисленные успехи гипотезы световых квантов, большинство физиков, особенно старшего поколения, либо не признавали ее, либо даже относились к ней не слишком серьезно. Это хорошо показывает следующий эпизод, рассказанный М. Борном.

«В следующем (1912) году созрел план Берлинской Академии наук, состоявший в том, чтобы пригласить в Берлин Эйнштейна, который в то время был профессором Высшей технической школы в Цюрихе. Для поддержания этого плана четыре наиболее выдающихся германских физика — Планк,

[63] W. H. Bragg. Phil. Mag., 20, 1910, p. 385.

[64] Там же.

[65] C. T. R. Wilson. Proc. Roy. Soc., A, 35, 1911, p. 285; A, 37, 1912, p. 277.

Нернст, Рубенс и Варбург сделали прусскому министерству просвещения представление, в котором они перечислили и оценили заслуги Эйнштейна. При этом произошел удивительный пассаж, о котором я могу рассказать Вам, не рискуя быть нескромным, так как он напечатан в прекрасной книге Карла Зелига «Альберт Эйнштейн и Швейцария» [66]. В представлении, о котором шла речь, говорится: «Подводя итог, можно сказать, что среди больших проблем, которыми так богата современная физика, не существует ни одной, в отношении которой Эйнштейн не занял бы примечательной позиции. То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком сильно ставить ему в упрек. Ибо не решившись пойти на риск, нельзя осуществить истинно-нового даже в самом точном естествознании».

Эта цитата иллюстрирует тот скепсис в отношении представления о световых квантах, который в то время был всеобщим»[67].

Что же касается квантовой теории теплового излучения, то полученные с ее помощью объяснения закона Планка не могли все же заставить ученых закрыть глаза на то, что она не согласуется с электродинамикой Максвелла, столь блестяще и всесторонне подтвержденной экспериментально. Не был удовлетворен этим положением и автор квантовой гипотезы Планк.

В 1912 г. Планк так характеризовал положение с квантовой теорией излучения и свое отношение к квантам света: «Несмотря на удовлетворительное согласие... результатов между собой и с опытными данными, идеи, из которых они возникли, хотя и возбуждают очень большой интерес, но, насколько я могу судить, еще отнюдь не нашли себе всеобщего признания. Это связано с тем, что квантовая гипотеза до сих пор еще не достигла удовлетворительного завершения. В то время как многие физики из консерватизма отвергают развитые мною соображения или занимают выжидательную позицию, другие авторы, напротив, считают необходимым дополнить мои соображения еще более радикальными предположениями (о существовании фотонов.— *Л. П.*). Так как для успешного развития новой гипотезы нет ничего вреднее, чем выход за пределы ее применимости, то я всегда стоял за то, чтобы возможно теснее связать квантовую гипотезу с классической динамикой, нарушая границы последней только тогда, когда опытные факты не дают никакого другого выхода» [68].

[66] C. Seelig. Albert Einstein und die Schweiz. Zürich, 1952.

[67] М. Борн. Альберт Эйнштейн и световые кванты. УФН, LX, 1956, стр. 127.

[68] М. Планк. Теория теплового излучения. ОНТИ, 1935, стр. 7 (предисловие ко второму изданию).

В исследованиях 1910—1914 гг. Планк делает несколько попыток добиться максимального сближения своей квантовой теории с классической физикой.

Так, в 1910 г. Планк, отметив абсурдность выводов из закона Рэлея — Джинса, рассмотрел еще раз теорию теплового излучения [69]. Он подчеркнул, что для правильного описания экспериментальных фактов «необходима новая гипотеза, которая предполагает при элементарных явлениях излучения определенные, дискретные кванты величиной $h = 6{,}55 \cdot 10^{-27}$ *эрг·/сек*» [70].

Планк считает, что при этом «...теория остается насколько возможно консервативной, т. е. в прежние теории вносятся только такие изменения, которые являются абсолютно необходимыми [71], и полагает, что нет необходимости изменять уравнения Максвелла — Герца для вакуума. Он считает нужным ввести для излучения временную прерывность (zeitliche Unstetigkeit) и отмечает, что «с введением временной прерывности я приближаюсь к воззрениям А. Эйнштейна, И. Штарка, Дж. Дж. Томсона, Дж. Лармора и др.; но остается существенное различие, которое состоит в том, что я утверждаю строгое выполнение дифференциальных уравнений Максвелла — Герца в пустом пространстве, которые, само собой разумеется, исключают существование дискретных квантов энергии в вакууме» [72].

В 1911 г. Планк опубликовал работу [73], в которой он развил свою новую гипотезу. Согласно этой гипотезе, испускание света есть квантовый процесс, а поглощение — непрерывный, подчиняющийся законам классической электродинамики. Поэтому распространение излучения описывается уравнениями электродинамики Максвелла и энергия осциллятора имеет непрерывный ряд возможных значений. В случае поглощения осциллятором энергии, равной $h\nu$, существует вероятность (и только вероятность!) испускания такого же количества энергии. В этой теории, таким образом, для процесса испускания имеет место прерывность во времени, хотя излучение остается непрерывным в пространстве. Планк показал, что из этих предположений вытекает закон излучения абсолютно черного тела, выведенный им в 1900 г. Однако средняя энергия линейного осциллятора имеет в этой теории значение большее, чем в первоначальной теории на $(1/2)h\nu$. Поэтому при абсолютном нуле средняя энергия осциллятора не обращается в нуль, а оказывается равной $(1/2)h\nu$. Это было первым появлением в

---

[69] M. Planck. Ann. Phys., 4, Bd. 31, 1910, S. 758—768.
[70] Там же, стр. 768.
[71] Там же.
[72] Там же, стр. 767—768.
[73] M. Planck. Verh. Deutsch. Phys. Gesellsch., XIII, 1911, S. 138.

физике энергии при абсолютном нуле. Такова так называемая вторая теория Планка.

Заметим, что в 1916 г. Нернст [74] предположил, развивая этот фундаментальной важности результат Планка, что эфир может быть непрерывно заполнен осцилляторами с так называемой «нулевой» энергией, соответствующей температуре абсолютного нуля.

В 1912 г. в статье «Über die Begrundung des Gesetzes der schwarzen Strahlung» [75] («Об обосновании закона черного излучения») Планк рассматривает поглощение с точки зрения электродинамики, а испускание света и стационарное распределение лучистой энергии — с точки зрения статистической механики. В этой статье он хочет построить теорию, которая бы «не очень удалялась от ядра классической элекродинамики и электронной теории» [76].

В том же 1912 г. эту теорию Планка подверг критике Пуанкаре в одной из своих последних работ [77]. Вторая теория Планка была окончательно отвергнута, когда опытами Франка и Герца [78] была установлена полная аналогия между оптическим поглощением и соударениями электронов с молекулами.

В 1914 г. Планк, продолжая отступление на позиции классической физики, развил новую гипотезу, так называемую третью теорию [79], согласно которой испускание, так же как поглощение излучения осциллятором, есть процесс непрерывный, подчиняющийся законам классической электродинамики. Квантовая прерывность, согласно этой теории, имеет место только при обмене энергии при столкновении осциллятора со свободными частицами вещества.

В 1915 г. он отказался от этой теории [80], так как расчеты Фоккера [81] показали, что полученная согласно классической электродинамике картина стационарных состояний твердого электрического диполя ведет к прямому противоречию с экспериментом.

Объяснить постоянную Планка с точки зрения классической электродинамики пытались многие ученые, в том числе,

---

[74] W. Nernst. Verh. Deutsch. Phys. Gesellsch., XVIII, 1916, S. 83.

[75] M. Planck. Ann. Phys., 4, Bd. 37, 1912, S. 642—656.

[76] Там же, стр. 643.

[77] A. Poincaré. J. de Physique, II, 1912, p. 5.

[78] Z. Frank, G. Hertz. Verh. Deutsch. Phys. Ges., XVI, 1914, S. 457, 517.

[79] M. Planck. Berlin. Sitzungsber., 918, 1914.

[80] M. Planck. Berl. Sitz., 512, 1915.

[81] A. D. Fokker. Ann. Phys., XLIII, 1914, S. 810.

например, А. Хаас [82], который положил в основу модель Томсона и получил хорошее численное совпадение вычисленного им значения h с результатами измерений. Однако его гипотезы явно взяты ad hoc, а самое важное заключается в том, что он не смог ни в какой степени вывести и объяснить универсальный характер постоянной Планка. Г. Лоренц [83] попытался развить точку зрения Хааса, связав ее с некоторыми наглядными представлениями. Наконец, Шидлоф [84], также исходя из модели Томсона и гипотезы о том, что атом функционирует как резонатор Планка, нашел, что

$$h = 2\pi e \sqrt{\frac{Am}{N^{1/3}}} = \text{const} = 6{\cdot}05{\cdot}10^{-27} \text{ эрг}{\cdot}\text{сек},$$

где e — элементарный заряд, A — половина диаметра положительно заряженного шара, m — масса электрона, который колеблется внутри атома водорода, N — число зарядов.

В 1910 г. была опубликована статья А. Ф. Иоффе «К теории лучистой энергии» [85]. Иоффе отмечает, что кроме энтропии черного излучения можно указать еще другую функцию состояния, это функция

$$P = \frac{U}{\nu},$$

где U — общая энергия, а ν — частота данного излучения.

Многие явления, по мнению А. Ф. Иоффе, лучше всего объясняются допущением, что свет имеет не непрерывное строение, а состоит из неделимых элементов — атомов света.

Между понятиями теории излучения, молекулярно-кинетической и электронной теории существует аналогия, иллюстрируемая таблицей (на стр. 360).

Иоффе отмечает, что в теории Планка моделью излучения является идеальный газ, если вместо массы молекулы брать величину h, а вместо кинетической энергии — $h\nu$. Как и в излучении, заданное в некоторый момент времени распределение скоростей не может самопроизвольно измениться; но достаточно ничтожного поглощения (например, столкновения между молекулами), чтобы в конце концов создать черное излучение (максвелл-больцмановское распределение). «Тепловое излу-

---

[82] A. E. Haas. Jahrb. Radioactiv, 7, 1910, S. 261.
[83] H. A. Lorentz. Phys. Zs., 11, 1910, S. 1232.
[84] A. Schidloff. Ann. Phys., 4, Bd. 35, 1911, S. 90.
[85] А. Ф. Иоффе. Журнал Русского физико-химического общества, т. XLII, СПб., 1910, стр. 409. См. также: A. Ioffe. Ann. Phys. 4, Bd. 36, 1911, S. 534.

Таблица

Теория излучения	Молекулярно-кинетическая теория	Электронная теория
W Энтропия излучения	Энтропия, S	
$P=\frac{U}{\nu}$	Масса тела, M	Заряд тела, Q
h	Масса молекулы	Заряд электрона, e
ν	$\frac{1}{2}v^2$	Потенциал, V
$\frac{-}{\nu}$	Абсолютная температура, T	
Спектральная плотность энергии черного излучения, $U=f(\nu, T)$	Энергия частиц, обладающих данной скоростью в максвелловском распределении, $N\cdot\frac{1}{2}mv^2=F\left(\frac{1}{2}v^2, T\right)$	

чение,— говорит А. Ф. Иоффе,— аналогично испарению при насыщении, причем кривая насыщения совпадает с адиабатой»[86].

В том же 1911 г. состоялся первый Сольвеевский конгресс физиков[87]. Первостепенная важность вопроса о квантах была настолько очевидна, что темой его было «Излучение и кванты». В число участников этого конгресса входили такие крупные ученые, как В. Вин, Г. Лоренц, А. Эйнштейн, А. Пуанкаре, В. Нернст, А. Зоммерфельд и другие. Планк выступил на этом конгрессе с докладом «О законе черного излучения и гипотезе элементарного количества действия», который не заключал в себе существенно нового по сравнению с его работами 1910 г. Эйнштейн сделал доклад «О современном состоянии проблемы удельной теплоемкости». И эти и остальные доклады, а также дискуссия по ним, хотя и не дали важных новых идей и результатов, но безусловно стимулировали мысль ученых, работавших в области теории квантов и сопредельных задач.

Естественно, что на конгрессе, происходившем незадолго до появления теории Бора, т. е. до того как квантовый характер процессов был понят как основная и существенная особенность микрокосмоса, могли быть только поставлены, но отнюдь не решены фундаментальные вопросы соотношения квантовых представлений и классической физики. Ясно было лишь, что

[86] А. Ф. Иоффе. Цит. соч., стр. 423.

[87] La Théorie du Rayonnement et les Quanta. Rapports et Discussions de la Réunion Tenue à Bruxelles du 30 Octobre au 3 Novembre 1911. Paris, 1912.

пренебречь квантами уже нельзя, а значит, в той или иной степени предстоит (и уже началась) ломка привычных концепций. Недаром в заключительных высказываниях на конгрессе наметились две существенно различные линии — линии поколений, потому что и в истории физики во все переломные моменты есть свои проблемы «отцов и детей».

Представитель старшего поколения А. Пуанкаре [88] с некоторой растерянностью говорил: «Кажется, что последние исследования ставят под вопрос не только основные принципы механики, но и то, что до сих пор представлялось неотделимым от самого понятия закона природы. Сможем ли мы выразить эти законы в виде дифференциальных уравнений?

С другой стороны, меня поразило в дискуссии, которую мы слышали, то, что одна и та же теория опирается то на принципы старой механики, то на новые гипотезы, являющиеся отрицанием этой механики; нельзя забывать, что нет положения, которое нельзя было бы легко доказать, если не ввести в доказательство две противоречивые посылки».

А представитель более молодого поколения физиков Бриллюэн [89] сказал: «Я бы хотел резюмировать впечатление, которое произвело на меня сначала чтение докладов, а еще более наши дискуссии в целом. Быть может, самым молодым из нас мое заключение покажется робким; но и такое оно представляется мне уже очень значительным. Мне кажется, что отныне можно быть уверенным, что необходимо ввести в наши физические и химические концепции понятие прерывности, скачкообразного изменения, о котором мы несколько лет тому назад не имели никакого представления. Как следовало его вводить? Это я вижу менее ясно. Будет ли это в виде, первоначально предложенном г. Планком, несмотря на вызываемые этим предложением трудности, или это будет в другом виде? Будет ли это в форме, предложенной г. Зоммерфельдом, или в какой-либо другой, которую надо искать? Я еще не знаю; каждая из этих форм хорошо годится для одной группы явлений и плохо подходит для другой. Нужно ли идти еще дальше и разрушить самые основы электромагнетизма и классической механики, вместо того чтобы ограничиться применением нового понятия прерывности к старой механике?»

Может быть, в этих высказываниях и заключен исторически наиболее ценный итог конгресса.

В том же 1911 г. была опубликована работа Дебая «Die Warscheinlichkeitbegriff in der Strahlungstheorie» [90]. В этой работе

---

[88] La Théorie du Rayonnement... Générale Conclusion. Paris, 1912.
[89] Там же.
[90] P. D e b y e. Ann. Phys., Bd. 33, 1910, S. 1427.

Дебай впервые попытался применить к полю электромагнитного излучения квантовые представления.

Дебай сделал смелое предположение, что каждый из гармонических осцилляторов, которые могут как бы представлять те гармонические собственные колебания, наложение которых дает колеблющееся электромагнитное поле в полом пространстве, также квантован и обладает дискретными энергетическими уровнями.

Отсюда сразу получается закон излучения Планка, так как энергия квантового осциллятора есть $\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1}$, а число собственных колебаний с частотой, лежащей в интервале от ν до $\nu+\Delta\nu$, в общем объеме V будет $V\cdot\frac{8\pi\nu^3}{c^3}\cdot\Delta\nu$.

По Дебаю, таким образом, полная энергия электромагнитного излучения в полом пространстве является суммой квантов энергии. Однако точка зрения Дебая существенно отлична от концепции Эйнштейна. Эйнштейн предполагает пространственную локализацию квантов энергии, в то время как Дебай считает, что каждое из собственных колебаний, распространяющихся по всему полому пространству, заключает в себе некоторое число квантов энергии $h\nu$. Слияние представлений Эйнштейна и Дебая осуществилось значительно позже, когда в 1925 г. квантовая механика решительно пошла по пути, намеченному Дебаем.

В 1912 г. А. Ф. Иоффе опубликовал статью «Атомы света»[91], в которой дал обзор состояния вопроса о теории излучения и квантах света. Он пришел к выводу, что введение квантов энергии, вполне аналогичных по своим свойствам атомам вещества и атомам электричества, оказалось весьма плодотворным для познания законов ряда физических движений. Однако, говорит Иоффе, «в то же время надо сознаться, что атомная гипотеза сама еще никакого объяснения не имеет, что она не имеет даже конкретной, хотя бы и произвольной формы, что не выяснено, удается ли ее согласовать с хорошо изученными фактами волновой оптики, что она, вообще, создает больше вопросов, чем дает ответов»[92].

Впрочем, вывод, вытекающий отсюда, ясен: есть все основания заниматься проверкой этой гипотезы и ее разработкой.

В том же году Планк[93] показал, что его гипотеза о квантах действия находится в тесной связи с теоремой Нернста, в том

---

[91] А. Ф. Иоффе. Вопросы физики, вып. 2. СПб., 1912, стр. 37.
[92] Там же, стр. 50.
[93] M. Planck. Phys. Z., Bd. 13, 1912, S. 165.

расширенном истолковании, которое ей дал Планк [94]. Согласно Планку, эта теорема гласит, что при температуре абсолютного нуля энергия однородного (твердого или жидкого) тела равна нулю. Рассматривая эту теорему с точки зрения атомистики, в которой энтропия есть выражение вероятности состояния, можно найти физический смысл теоремы Нернста в том, что элементарные области вероятности не произвольно малы, но имеют вполне конечную величину, в чем Планк и видел существенное содержание своей гипотезы.

Подробное исследование вопроса об испускании и поглощении света с классической точки зрения привело в 1912 г. Мак-Ларена к выводу, что «никакими непрерывными законами движения невозможно описать действительное распределение энергии. Доказательство этого, однако, включает предположение, что статистический метод применим к системам с бесконечным числом степеней свободы» [95].

К. Эйзенман [96] показал, что если положить в основу квантовую теорию, то при введении функции распределения может быть дан полный вывод энергии и уравнения состояния твердого тела из его энтропии.

Выяснение логической структуры квантовой теории произвел в 1911 г. П. Эренфест в работе «Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theoria der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle» [97] («Какие черты гипотезы световых квантов играют в теории теплового излучения существенную роль»).

Разрыв с классической непрерывной картиной вызвал целый ряд попыток как-то связать квантовые формулы с классической механикой. Это означало попытку показать, что кванты по крайней мере не противоречат классической картине. Именно это пытался сделать в 1911 г. А. Зоммерфельд, который, как он сам указывает,исходил из совпадения размерности величины, стоящей под интегралом в принципе Гамильтона, и размерности кванта действия Планка. Исходя из того, что квант действия имеет размерность [энергия × время], Зоммерфельд вводит следующее допущение: «Всеобщее свойство всех молекул, которое находит свое выражение в излучении, состоит не в том, что появляются определенные характеристические количества энергии, а в том, что временное протекание обмена энергии упорядочено некоторым общим образом..., большое количество энергии отдается или берется материей в корот-

[94] M. Planck. Vorlesungen über Thermodynamik. 3 Aufl., 1911, S. 266.

[95] S. B. Mc Laren. Phil. Mag., v. XVIII, 1912, p. 513—542.

[96] K. Eisenmann. Ann. Phys., 4, Bd. 39, 1912, S. 1165—1174.

[97] P. Ehrenfest. Ann. Phys., 4, Bd. 36, 1911, S. 91—118.

кое время, малое количество энергии — в длинное время, так что произведение энергии на время или интеграл по времени от энергии определяется через величину h»[98].

Чтобы придать этому положению более конкретную формулировку, Зоммерфельд применяет принцип Гамильтона. Сходство наименований — квант «действия» и интеграл «действия»— служит для него исходным пунктом. «Мы достигнем точного выражения для величины «энергия — время», если мы будем исходить из чрезвычайно удачно выбранного Планком названия «квант действия». Это приводит нас к встречающемуся в принципе Гамильтона интегралу по времени $\int (T-V)dt$, так называемому действию»[99]. В общем случае, если L есть кинетический потенциал, по терминологии Гельмгольца, то $\delta\int Ldt=0$ выражает принцип Гамильтона. И «если рассматривать вместе с Гельмгольцем — Планком принцип действия как высший, основной закон механики и физики, то... надо...установить соотношение между фундаментальной константой излучения и имеющим ту же самую размерность действия интегралом $\int Ldt$. Мы приходим тогда к следующей фундаментальной гипотезе о всеобщем значении h. При каждом чисто молекулярном процессе будет отдаваться или получаться молекулой определенная универсальная величина действия, именно величина $\int_0^\tau Ldt = h/2\pi$, где τ есть продолжительность процесса действия»[100]. Множитель 2π введен по соображениям, вытекающим из рассмотрения фотоэлектрического эффекта.

Эта фундаментальная гипотеза может быть в известной степени обоснована при помощи теории относительности. В самом деле, рассмотрим в некоторой системе отсчета две соседних точки. Тогда их координаты выразятся так:

$$x,\ y,\ z,\quad l = ict$$

и

$$x+dx,\quad y+dy,\quad z+dz,\quad l+dl = ict+icdt,$$

где c — скорость света. Элемент мировой линии запишется в виде:

$$ds = \sqrt{dx^2+dy^2+dz^2+dl^2},$$

причем это выражение, как известно, есть инвариант. Физически это выражение для ds определяет четырехмерное расстояние

[98] A. Sommerfeld. Das Plancksche Wirkungsquantum und seine allgemeine Bedeutung für die Molekularphysik. Phys. Ztschr., 24, 1911, S. 1062.

[99] А. Зоммерфельд. Цит. соч., стр. 1063.

[100] Там же.

соседних точек в смысле мира Минковского — Эйнштейна. Положим, как обычно, для сокращения

$$v^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2$$

и

$$\beta = \frac{v}{c};$$

тогда элемент мировой линии можно записать следующим образом:

$$ds = ic\,dt\sqrt{1-\beta^2}.$$

Чтобы получить размерность *эрг·сек*, умножаем это выражение на $-icm_0$, где m_0 — масса покоя, т. е. инвариантная величина для механического процесса. Получающееся в результате этого умножения выражение $-icm_0\,ds = c^2m_0\,dt\cdot\sqrt{1-\beta^2} = L dt$ есть инвариант по отношению к лоренцовым преобразованиям координат. Обозначение величины $c^2m_0\sqrt{1-\beta^2}$ через L имеет свое оправдание в том, что в механике теории относительности уравнения движения получаются из этой величины L точно таким же способом, как в обычной механике уравнения Лагранжа из величины $L = T - V$. Отсюда ясно, что и интеграл $\int_0^\tau L\,dt = -icm_0S_{12}$ не зависит от системы отсчета, так как он пропорционален длине мировой линии между двумя мировыми точками 1 и 2, с соответствующими моментами времени 0 и τ.

Согласно принципу относительности, все формулировки физических законов не должны зависеть от произвольного выбора системы координат. «Энергия или даже интеграл по времени от энергии не имеет никакого другого абсолютного физического значения, кроме значения величины действия. Оно дает нам единственную возможность связать механику материальной точки с универсальной постоянной; вышенаписанная формула для нашей фундаментальной гипотезы есть аналитическое выражение этой возможности» [101].

Не останавливаясь на разборе конструкции Зоммерфельда, мы можем сделать важные выводы уже из приведенных соображений. Мы видим, что Зоммерфельд примыкает к Гельмгольцу и Планку, считавшим принцип действия высшим законом физики. Он вводит определенную физическую гипотезу о характере молекулярного процесса, которая математически выражается в том, что, в отличие от классической физики, требовавшей для

[101] А. Зоммерфельд. Цит. соч., стр. 1063.

интеграла Гамильтона экстремума, Зоммерфельд определяет значение этого интеграла равным $h/2\pi$.

В этом можно, очевидно, усматривать выражение различия между микрокосмосом и макрокосмосом. Но особенно важно то, что энергия не имеет «абсолютного» физического значения, что основным понятием является понятие действия. Именно эта величина дает возможность связать классическую физику с физикой микрокосмоса. Действие есть основное понятие физики, ключ к законам физических явлений,— такова точка зрения Зоммерфельда.

Факт совпадения размерностей кванта действия и подинтегральной величины в принципе Гамильтона и позже неоднократно приводил к мысли найти в этом факте выражение их внутренней связи.

Эта связь могла выражаться в применении аппарата классической механики к атомным проблемам, в раскрытии какого-то особенного фундаментального смысла величины действия в физической картине мира. Не только в начале XX в., когда смысл постоянной h был достаточно расплывчат, когда еще не было общей теории относительности, в которой действие оказалось инвариантом, но и в более позднее время, уже после разработки основоположений квантовой механики, многие ученые ставили вопрос о возможной связи принципа действия и постоянной Планка, с тем чтобы в этой связи найти источник дальнейшего развития физики.

Рассматривая проблему связи классической динамики Гамильтона —Якоби с квантованностью действия и энергии, Пуанкаре прежде всего указывает, что закон равномерного распределения энергии по степеням свободы «...вытекает из самой формы, которую всегда придавали уравнениям динамики, формы Гамильтона» [102]. Однако перед такой концепцией равномерного распределения энергии по степеням свободы с течением времени возникли трудности. Среди них прежде всего необходимо указать на законы излучения абсолютно черного тела,— проблему, которая и привела непосредственно к квантовой гипотезе, а также на необъяснимое классически стремление теплоемкости к нулю при понижении температуры, «как если бы эти молекулы, охлаждаясь, теряли степени свободы, как если бы некоторые из их суставов окоченевали» [103]. Только гипотеза квант Планка, преодолев эти трудности, стала исходной идеей новой физики, произвела, по существу говоря, революционный переворот в ее развитии. Однако гипотеза Планка

---

[102] А. Пуанкаре. Последние мысли. М., Научн. книгоизд., 1923. Гл. VI, Гипотеза квант, стр. 89.

[103] Там же, стр. 91.

«столь ...странная, что всеми способами старались от нее избавиться» [104].

Нернст предложил, например, в качестве выхода, для сохранения непрерывности рассматривать массу как функцию скоростей и ускорения. Это понятно при ретроспективном рассмотрении проблемы. Ведь теория Планка, согласно которой «...физические явления перестают повиноваться законам, выражаемым дифференциальными уравнениями, есть без всякого сомнения самая большая и самая глубокая революция, которую натуральная философия претерпела со времен Ньютона» [105].

Исследуя гипотезу квантов Планка в проблеме закона распределения энергии в черном излучении, Пуанкаре показал, что подобная гипотеза является единственной, которая приводит к закону Планка.

Но тогда возникают естественные сомнения в значимости механики Гамильтона — Якоби для нового круга проблем микрокосмоса, так как, следуя Планку, «...мы имеем действительное равновесие и, если оно не находится в согласии с законом равномерного распределения, то это потому, что уравнения Гамильтона неточны»[106]. Можно было бы, конечно, допустить неточность классической термодинамики, которая используется при рассмотрении проблемы абсолютно черного тела, но, по мнению Пуанкаре, в ней «...нельзя допустить ни одной бреши, чтобы она вся не обрушилась» [107].

Таким образом, необходимо исследовать связь канонических гамильтоновских систем с характером распределения энергии и вероятностью. Вопрос этот тем более важен, что и в теории атома Бора из всего непрерывного, бесконечного множества траекторий, возможных в классической механике, выделяется конечное дискретное количество их с помощью квантования. Таким образом, условия квантования как бы налагаются извне на классическую механику, не нарушая ее целостности.

Однако на самом деле существует прямая антиномия между квантовым законом Планка и обычной механикой, что и показал Пуанкаре.

Канонические уравнения Гамильтона допускают единицу в качестве последнего множителя Якоби. Пуанкаре рассматривает этот последний множитель как *плотность вероятности*

---

[104] Там же, стр. 101.

[105] H. Poincaré. Sur la Théorie des Quanta. J. de Physique théor. et appl, t. 2, Paris, 1912, p. 5.

[106] А. Пуанкаре. Последние мысли. М., Научн. книгоизд., 1923. Гл. VI, Гипотеза квант, стр. 92.

[107] А. Пуанкаре. Там же, стр. 91.

в фазовом пространстве (p, q). Классическая динамика приводит к выводу, что в том случае, когда последний множитель есть единица, существует полная однородность для возможности локализовать изображающую точку состояния системы в фазовом пространстве. Это есть причина того, что все теории, которые предполагают уравнения динамики в форме Гамильтона — Якоби, с необходимостью приводят к закону равномерного распределения энергии.

Пуанкаре определяет систему изображающей точкой в фазовом пространстве (q, p) или, что то же самое, точкой в пространстве энергии — фазы.

Пусть имеется система дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dx_k}{dt} = X(x_k). \tag{10}$$

Пусть далее $W d\tau$ — вероятность того, что изображающая точка состояния системы находится в элементарном объеме $d\tau$ пространства (x_k). Вероятность присутствия этой точки во всем n-мерном объеме V будет

$$\underbrace{\int \ldots \int}_{n} W \, d\tau.$$

Для этой вероятности возьмем отношение t/T, где T — очень большой интервал времени, а t — время, в течение которого между θ и $\theta + T$ изображающая точка находится в рассматриваемом объеме V фазового пространства. Эта вероятность имеет смысл, если она независима от θ и T (при t достаточно большом).

Если это условие выполнено (и если W вообще может быть определена), то W должна удовлетворять уравнению в частных производных.

$$\sum_k \frac{\partial (W X_k)}{\partial x_k} = 0,$$

и тогда W есть последний множитель системы (10). Для канонических уравнений немедленно получаем

$$W = 1. \tag{11}$$

Соотношение (11) выражает сразу существование решений, которые соответствуют классической механике в пространстве (q, p), а также их непрерывность и однородность.

Пуанкаре ищет такой последний множитель, который в отличие от множителя $W = 1$, приводящего к закону равно-

мерного распределения Рэлея — Джинса, приводил бы к закону Планка. Он получает функцию W существенно прерывную, содержащую множители $w(\eta_k)$, обращающиеся в нуль, если энергия η_k отличается от энергии, кратной энергии кванта ε. Эти разрывности неизбежны, если хотят, чтобы полное излучение было конечным.

Как указывает сам Пуанкаре, «...все уравнения механики выражаются в форме Гамильтона, и, следовательно, они предполагают единицу последним множителем в смысле Якоби. Приходится предположить, что законы столкновения свободного электрона с резонатором не заключаются в этой форме, и что последний множитель уже не единица, а какой-то другой. Очевидно, необходимо, чтобы они имели последний множитель, иначе второе начало термодинамики не будет верным, и мы встретим то же самое затруднение, что и выше; однако нет надобности чтобы этот множитель был единица.

Именно этот последний множитель и измеряет вероятность данного состояния системы (точнее говоря, то, что было бы можно назвать плотностью вероятности). В гипотезе квант этот множитель не может быть непрерывной функцией...» [108].

В результате математического анализа проблемы Пуанкаре показал, что если закон излучения абсолютно черного тела должен в соответствии с экспериментом заключать в себе конечность полной энергии излучения, то это приводит к функции W, имеющей прерывный характер, аналогичный тому, который вводится гипотезой квант. В то же время для классической механики $W = 1$, т. е. существенно непрерывна. В этом и состоит смысл антиномии между квантовым законом Планка и классической механикой.

Излучение и поглощение света веществом есть процесс, происходящий в атомах и молекулах. Естественно поэтому, что гипотеза квантов должна была занять важное место в изучении строения атомов и молекул. На основе модели атома Резерфорда и при решении в первую очередь задачи объяснения закономерностей атомных спектров в их связи со структурой атома возникла квантовая теория атома.

В 1897—1899 гг. Вихертом, Дж. Дж. Томсоном и Ленардом были измерены заряд, масса и скорость электронов. Почти одновременно с этим начались попытки построить модель атома из отрицательных и положительных зарядов, имея в виду решение трех задач:

1) установить связь между испусканием и поглощением спектральных линий и колебанием электронов;

---

[108] А. Пуанкаре. Последние мысли. М., Научн. книгоизд., 1923. Гл. VII. Взаимоотношение материи и эфира, стр. 111—112.

2) объяснить периодическую систему элементов;
3) объяснить явления естественной радиоактивности.

Существовало предположение, что спектральные линии можно будет истолковать по аналогии с основными звуковыми колебаниями и обертонами. Для этого нужны были устойчивые положения электронов и, как при упругой связи, линейный закон сил

$$F = kr.$$

Первую такую модель предложил в 1902 г. В. Томсон (Кельвин) [109]. В ней предполагалось равномерное распределение положительного заряда по всему объему атома. Внутри этого положительного облака— по Томсону — находятся электроны. Если электронов больше одного, то они группируются в определенные устойчивые конфигурации. Однако рассчитать такую пространственную модель для большого числа электронов весьма трудно. Проще обстоит дело в случае, когда электроны расположены в одной плоскости. Эту задачу математически подробно исследовал Дж. Дж. Томсон в 1903 г. в работе «On the Structure of the Atom; an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a Number of Corpuscles Arranged at Equal Intervals Around the Circumference of a Circle; With Application of the Results to the Theory of Atomic Structure» [110]. («О структуре атома; исследование устойчивости и периодов колебания некоторого числа частиц, расположенных на равных интервалах по окружности круга; с приложением результатов к теории атомной структуры»). Он предложил в качестве модели атома систему, состоящую из распределенного положительного заряда и движущихся в нем отрицательных зарядов (электронов), так как только наличие зарядов двух противоположных знаков позволяет объяснить наблюдаемую нейтральность атома. Положительный заряд, согласно классической электродинамике, не мог быть положительно заряженной частицей, так как такая система из двух разноименных частиц не может находиться в устойчивом состоянии. Поэтому Дж. Дж. Томсон предположил, что положительный заряд, как и у Кельвина, равномерно распределен по сфере с радиусом, вычисленным на основании кинетической теории газов, а электроны расположены внутри сферы в одной плоскости, причем их суммарный заряд равен положительному заряду. Дж. Дж. Томсон исследовал такую схему в предположении малого числа электронов и нашел, что в этом случае они располагаются на равных расстояниях от центра положительно наэлектризован-

[109] Kelvin. Phil. Mag., 3, 1902, p. 257.
[110] J. J. Thomson. Phil. Mag., 7, 1904, p. 237; Electricity a. Matter, 1904.

ной сферы. Когда же число электронов возрастает, то они располагаются в виде сферических оболочек или колец. В этом случае модель воспроизводит некоторые из периодических свойств атомов, отраженных в периодическом законе Менделеева. Если один из электронов слегка сместить из его положения равновесия, то возникает восстанавливающая сила, величина которой пропорциональна смещению. Это свойство модели особенно важно, так как оно позволяет объяснить оптические явления дисперсии и адсорбции и даже позволяет объяснить монохроматический характер спектральных линий. Однако, с оптической точки зрения модель Томсона не в состоянии была объяснить многочисленные закономерности, наблюдаемые в спектрах, каким-либо определенным расположением электронов в атоме. По мнению Рэлея [111] и Ритца [112], это принципиально невозможно; закономерности в спектрах всегда заключают в себе длину волны в степени минус единица, а по квазиупругой теории Дж. Дж. Томсона, она должна была бы быть всегда в степени минус два.

Другую модель, в известном смысле противоположную модели Дж. Дж. Томсона, предложил в том же году Ленард [113]. Он исходил при этом из того, что в проделанных им опытах по прохождению катодных лучей через вещество большая часть атомного объема не оказывала никакого сопротивления проникновению этих лучей. В его модели нет раздельно существующих электронов и положительных зарядов. Атом, по Ленарду, состоит из особых частиц, которые он назвал «динамидами» и которые представляют собою электрический дублет, обладающий массой. Все динамиды одинаковы, и атом содержит такое их число, какое необходимо для того, чтобы получить массу данного атома. Радиус их настолько мал, что бóльшая часть объема атома пуста: если радиус атома $\sim 10^{-8}$ *см*, то радиус динамиды $\sim 0{,}3 \cdot 10^{11}$ *см*. Модель Ленарда интересна только представлением о пустоте значительной части атомного объема. Сама по себе она не получила сколько-нибудь широкого признания, так как не было никаких доказательств существования динамид и не удавалось даже указать никаких экспериментов, которые могли бы ответить на вопрос, существуют ли они на самом деле. В этом отношении они были совершенно в духе многочисленных моделей эфира и механизма тяготения, предложенных в XIX в. и не сыгравших почти никакой роли в развитии физики.

В 1904 г. новый вариант модели атома предложил профессор университета в Токио Нагаока в статье «Kinetics of System

[111] W. Rayleigh. Phil. Mag., 44, 1897, p. 356; 11, 1906, p. 123.
[112] W. Ritz. Ann. d. Phys., 12, 1903, S. 264; 25, 1908, S. 660.
[113] Ph. Lenard. Ann. d. Phys., 12, 1903, S. 714.

of Particles illustrating the Line and the Band Srectrum and the Phenomena of Radioactivity» [114] («Кинетика системы частиц, поясняющая линейчатые и полосатые спектры и явления радиоактивности»). Для объяснения оптических спектров и известных тогда явлений радиоактивности Нагаока предлагает следующую модель атома: «Система, которую я предполагаю обсудить, состоит из большого числа частиц равной массы, расположенных по кругу на равных угловых интервалах и отталкивающих одна другую с силами обратно пропорциональными квадрату расстояния; в центре круга располагается частица большой массы, притягивающая остальные частицы по тому же закону. Если эти отталкивающиеся частицы вращаются почти с одной и той же скоростью вокруг притягивающего центра, система в общем остается стабильной для небольших возмущений, предполагая, что притягивающая сила достаточно велика. Эта система отличается от системы Сатурна, рассмотренной Максвеллом (имеются в виду кольца Сатурна.— *Л. П.*), тем, что она состоит из отталкивающихся частиц вместо притягивающихся спутников. Рассматриваемый случай, очевидно, может быть приблизительно осуществлен, если мы заменим эти спутники отрицательными электронами и притягивающий центр положительно заряженной частицей. Исследование катодных лучей и радиоактивности показали, что такая система может рассматриваться как идеальный атом. В своей лекции об электроне сэр Оливер Лодж привлек внимание к системе Сатурна, которая, по всей вероятности, имеет то же устройство, как и предложенная система атома» [115]. Возражением против такой системы, как указывает далее Нагаока, является то, что электроны системы должны в конце концов перейти в покоящееся состояние вследствие передачи энергии излучению.

Нет надобности останавливаться на дальнейшем развитии и применении этой модели, которая, как мы теперь знаем, не могла дать удовлетворительного объяснения атомных процессов не только ввиду неверной концепции «кольца Сатурна», но и вследствие отсутствия в ней квантового принципа. Она интересна только идеей ядра и внеядерных электронов (по современной терминологии), подчиненных кулоновым силам и тем не менее представляющим устойчивую конфигурацию. Надо отметить, что до появления модели атома Резерфорда были возможны и такие гипотезы об атомном поле, которые рассматривали его, как поле магнитных сил [116], так как они подходят для объяснения сериальных формул линейчатых спектров (длина волны в степени —1).

[114] H. Nagaoka. Phil. Mag., 12, 1904, p. 445—455.
[115] H. Nagaoka. Phil. Mag., 12, 1904, p. 445—446.
[116] W. Ritz. Revue génér. des Sci., 1909, p. 171—175.

Резерфорд, работавший с α-лучами, а не с катодными, как Ленард, естественно, смог получить более точные результаты и дать им количественное выражение. Он нашел, что имеют место отклонения α-лучей при прохождении через вещество на угол больше прямого, что не может быть объяснено с помощью модели Томсона или Ленарда. В декабре 1910 г. Резерфорд пришел к заключению, что наблюдаемая при рассеянии α-лучей картина может быть объяснена только предположением существования в центре атома небольшого по размеру, а потому весьма концентрированного положительного заряда, вблизи которого создается сильное электрическое поле. Годом позже Вильсон [117] подтвердил этот вывод с помощью фотографии треков α-частиц в камере Вильсона.

Первая работа Резерфорда, в которой предложена и описана новая модель атома, была опубликована в мае 1911 г. под названием «The scattering of α-and β-Particles by Matter and the Structure of the Atom» [118] («Рассеяние α- и β-частиц веществом и строение атома»). Изложив экспериментальные данные по рассеянию α-лучей, противоречащие модели Томсона и предложив для теоретического обсуждения этого рассеяния свою модель, Резерфорд указывает, что «вопрос об устойчивости предложенного атома на этой стадии не нуждается в рассмотрении, потому что, очевидно, устойчивость будет зависеть от тонкой структуры атома и от движения образующих его заряженных частей» [119].

Действительно, для исследования рассеяния α-лучей можно ограничиваться геометрической моделью. Согласно модели Резерфорда, положительный заряд находится в центре атома и имеет радиус $< 3 \cdot 10^{-12}$ *см*, как того требуют опыты с рассеянием α-лучей; он окружен отрицательными зарядами — электронами, причем заряд ядра равен Ze, где Z — примерно половина атомного веса. Это согласуется с результатом, полученным экспериментально Баркла [120], согласно которому число рассеивающих электронов для легких элементов (за исключением водорода) равно половине атомного веса.

Модель Резерфорда получила название планетарной или ядерной модели атома. Сам термин «ядро» употреблен Резерфордом впервые в его книге «Radioactive Substances and their Radiations», вышедшей в 1912 г.

В декабре 1913 г. Резерфорд [121] выдвинул принцип, что

---

[117] C. T. R. Wilson. Proc. Roy. Soc., A, 87, 1912, p. 279.
[118] E. Rutherford. Phil. Mag., 21, 1911, p. 669—688.
[119] Там же, p. 671.
[120] Barkla. Phil. Mag., 11, 1906, p. 812.
[121] E. Rutherford. Nature, 12, 1913, p. 423; Phil. Mag. 24, 1913, p. 702.

заряд ядра или число электронов есть фундаментальная постоянная, определяющая химические свойства атома. Что касается радиоактивности и тяжести, то, поскольку они не зависят от химических свойств, они определяются только ядром. Этими предположениями объясняется существование изотопов. Резерфорд предположил также, что ядро водорода может быть «положительным электроном», имеющим массу, почти равную массе атома водорода; на собрании Британской ассоциации в Кардиффе в 1920 г. Резерфорд предложил для него общепринятое ныне название—протон. Надо отметить, что еще в 1904 г. Пуанкаре в докладе «L'etat actuel et l'avenir de la Physique mathematique» [122] («Современное состояние и будущее математической физики»), прочитанном на конгрессе техники и науки в Сен-Луи, указывал, что вся масса тел, по-видимому, связана с суммой масс только положительных электронов. В 1914 г. Дарвин [123] рассчитал электрическое взаимодействие между α-частицей и ядром и в результате этого сделал вывод, что опыты Гейгера и Марсдена по рассеянию α-частиц могут быть согласованы только с законом обратных квадратов, который действует до расстояния $3 \cdot 10^{13}$ *см* от центра атома. Наконец, ван дер Брек [124], заметив, что число рассеянных ядром α-частиц на один атом, деленное на квадрат заряда ядра, есть величина постоянная, показал, что этот результат может быть объяснен предположением, что заряд ядра равен примерно половине атомного веса и совпадает с номером элемента в таблице Менделеева, т. е. заряд ядра равен Ze, где Z — порядковый номер элемента в этой таблице.

Это предположение было полностью подтверждено Мозли [125] (1887—1915), работавшим в лаборатории Резерфорда. Мозли использовал в качестве антикатода в трубке Рентгена химические элементы от кальция до никеля, так что под действием катодных лучей они излучали характеристические рентгеновы спектры, состоявшие в основном из K- и L-линий; длины их волн определялись. Он нашел, что квадратный корень из частот этих линий возрастает на постоянную величину при переходе от одного элемента к другому со следующим атомным номером в таблице Менделеева; таким образом, $\gamma = k(N-a)^2$, где k — постоянная, a — постоянная, имеющая различное значение для K- и L-линий, N — атомный номер.

Таким образом, в атоме существует некоторая фундаментальная величина, которая возрастает на единицу при перехо-

---

[122] H. Poincaré. Bull. Sci. Math. **28**, 1904, p. 302.
[123] C. G. Darwin. Phil. Mag., **27**, 1914, p. 499.
[124] A. van der Broek. Phys. Z., **14**, 1913, p. 32.
[125] H. G. I. Moseley. Phil. Mag., **26**, 1913, p. 1024; Phil. Mag., 27, 1914, p. 703.

де к следующему элементу. Согласно результатам Резерфорда и ван дер Брека, это может быть объяснено лишь тем, что число отрицательных электронов вокруг ядра в атоме химического элемента равно порядковому номеру элемента в периодической системе элементов [126].

Принципиальные трудности для классической электродинамики в объяснении формул частот вида

$$\nu = A - \frac{B}{(n+m)^2},$$

где $n = 1, 2, 3...$, и, в частности, сериальных формул атомных и молекулярных спектров состояли в следующем:

1) в формулу входят частоты, а не их квадраты;

2) нельзя указать никаких упругих или электрических систем, которые имели бы уравнение частот приведенного типа;

3) распределение энергии по частотам должно подчиняться закону Планка.

В конце XIX в. световое излучение рассматривали по аналогии с излучением звука и полагали, что линейчатые спектры, представляющие световые колебания, возникают так же, как звук возникает из свободных колебаний тел. Атом считали электрической системой, имеющей большое число собственных периодов колебаний. Эти собственные периоды соответствуют набору спектральных линий.

Для того чтобы построить картину атомных процессов и объяснить спектральные закономерности, надо было перейти к принципиально новым представлениям.

В 1904 г. появилась статья Штарка «Über die Entstehung der electrischen Gasspectra» [127] («О возникновении электрического газового спектра»).

В этой работе (так же как ранее в 1902 г.) Штарк выдвигает гипотезу, что положительный ион атома является носителем электромагнитного излучения, образующего линейчатый спектр соответствующего химического элемента. Что касается полосатых спектров, то они, по мнению Штарка, возникают в результате создания системы из положительного атомного остатка (положительный ион) и отрицательного иона при их воссоединении в нейтральный атом.

---

[126] В 1912 г. Дарвин рассмотрел теоретически поглощение и рассеяние α-лучей. Он принимает модель атома Резерфорда и отмечает, что она «делает аналитические трудности в рассмотрении темы его статьи меньшими, чем какая-либо другая модель, и что имеется сильное экспериментальное ее доказательство в большом рассеянии α-лучей» (C. G. D a r w i n, Phil. Mag., 23, 1912, p. 901—920).

[127] J. S t a r k. Ann. d. Phys., 4, Bd. 14, 1904, S. 506—538.
См. также: J. S t a r k. Die Electricität in Gasen. Leipzig, 1902.

Ни подобные достаточно произвольные допущения, ни старые классические модели не могли объяснить закономерности спектров во всей их простоте, целочисленности и многогранности.

Требовалось выработать специфический подход к этой проблеме, подход, основанный как на новой неклассической модели атома, так и на новой, тоже неклассической точке зрения на сам процесс испускания и поглощения света. Такой подход не мог, конечно, выработаться сразу. Он создавался постепенно, отдельными несвязанными элементами, пока не нашел в 1913 г. замечательного синтеза в работах Бора.

Точка зрения Штарка была подвергнута критике Вином [128], который из наблюдений действия магнитного поля на каналовые лучи, образованные в различных парах и газах, сделал вывод, что линейчатые спектры производятся нейтральными атомами и что свет возникает за счет колебаний, получающихся при рекомбинации отрицательного электрона и положительного иона.

Позицию Вина поддержал Хортон [129] на основании экспериментальных наблюдений пяти линий спектра ртути в различных электрических условиях.

В 1907 г. Конвей [130] (1875—1950) впервые выдвинул принцип, согласно которому атом производит спектральные линии по одной в каждый отдельный момент времени, так что получение полного спектра определяется присутствием большого числа атомов.

По гипотезе Конвея, атом для того, чтобы излучить спектральную линию, должен быть в возбужденном состоянии. В этом состоянии единственный электрон атома испытывает колебания с частотой, соответствующей частоте излучаемой спектральной линии.

Дальше этой безусловно глубоко правильной идеи Конвей не пошел. Больше того, в декабре 1913 г. появилась работа Конвея «An Electromagnetic Hypothesisas to the Origin of Series Spectra» [131] («Электромагнитная гипотеза происхождения спектральных серий»); в ней Конвей пытался найти соотношения Бора, на работу которого он ссылается, исходя из модели атома Томсона и чисто классических представлений.

В 1910 г. Бивен [132] (1875—1913) в работе, описывающей эксперименты по аномальной дисперсии в парах натрия, снова рассмотрел этот вопрос. Он установил, что применение класси-

---

[128] W. Wien. Ann. d. Phys., 30, 1909, S. 349.
[129] F. Horton. Phil. Mag., 22, 1911, p. 213—219.
[130] A. W. Conway. Sci. Proc. Roy. Dubl. Soc., II, 1907, p. 181.
[131] A. W. Conway. Phil. Mag., 24, 1913, p. 1010—1017.
[132] P. V. Bevan. Proc. Roy. Soc., A, 84, 1910, p. 209.

ческой теории Лоренца приводит в этом случае к требованию бесконечно большого числа электронов в молекуле. Отсюда он сделал правильный вывод, что спектроскопические явления объясняются присутствием большого числа атомов, каждый из которых в данный момент находится в индивидуальном состоянии и ответствен не за весь спектр в целом, а только за одну линию в спектре.

В 1900 г. Ридберг [133] и в 1908 г. Ритц [134] заметили, что волновые числа всех линий главной и двух побочных серий представляют собою разности чисел («термов») следующей таблицы:

$$\frac{1}{(1+s)^2},\ \frac{1}{(2+s)^2},\ \frac{1}{(3+s)^2},\ \ldots,$$
$$\frac{1}{(2+p_1)^2},\ \frac{1}{(3+p_1)^2},\ \ldots,$$
$$\frac{1}{(2+p_2)^2},\ \frac{1}{(3+p_2)^2},\ \ldots,$$
$$\frac{1}{(3+d)^2},\ \ldots,$$

Они сформулировали так называемый комбинационный принцип, согласно которому спектру какого-либо элемента соответствует набор таких «термов», что волновые числа линий спектра этого элемента являются разностями этих термов, взятых попарно, и что различным комбинациям этих термов соответствуют различные спектральные линии.

В случае водорода спектральные термы приобретают особенно простой вид

$$\frac{R}{n^2},$$

где R — постоянная Ридберга; n — целое, положительное число.

Следующий шаг был сделан в 1911—1912 гг. Никольсоном [135], который в ряде работ ввел в спектроскопию модель атома Резерфорда и высказал предположение, что спектры имеют квантовую природу.

Никольсон был астрофизиком и занимался спектрами небесных тел. Он в основном изучал спектры некоторых туманностей и солнечной короны. Таким образом, астрофизика шла

---

[133] R y d b e r g. Rapp. présenté au congrès int., Paris, 1900, II, p. 200.

[134] W. R i t z. Phys. Z., 9, 1908, S. 521; Ges. Werke, S. 141.

[135] J. W. N i c h o l s o n. Month. Not. Roy. Astr. Soc., 72, XI, 1911; XII, 1911; VI, 1912; p. 677; VIII, 1912.

на помощь физике в единой проблеме: звезды и атомы. Изучавшиеся им спектры не походили на спектры, изученные на Земле, и он приписал их гипотетическим элементам небулию и протофтору. Под влиянием Резерфорда Никольсон предположил, что в каждом атоме 4—5 электронов вращаются вокруг ядра по одному кольцу. Он пытался рассчитать эту модель с помощью указанного Нагаока максвелловского метода кольца Сатурна. Он сформулировал даже количественное выражение квантования применительно к атому, а именно: угловой момент атома может возрастать или уменьшаться только на дискретную величину. Следуя Конвею и Бивену, он утверждал, что различные линии в спектре производятся различными атомами. С этой точки зрения, если рассматривать, например, атомы водорода, тождественные по их химическим свойствам и весу, то они окажутся существенно различными по их внутренним движениям. Это означает, что атом может существовать в различных состояниях, напоминающих энергетические уровни осцилляторов Планка.

Однако Никольсон придерживался еще классических идей в отношении частот спектральных линий, которые он отождествлял с частотами колебания динамической системы. Тем не менее он является прямым предшественником Бора, которому последний многим обязан, и забвение его работ совершенно незаслуженно.

Надо отметить, что к 1911—1912 гг., хотя кванты не стали более понятны для физиков, во всяком случае многие перестали считать их чем-то курьезным. Особенно это было заметно вне круга специалистов по оптике. Борн пишет:

«В мою задачу не входит описывать постепенную перемену настроений. Хочу отметить только несколько важнейших событий. К числу их относится прежде всего замечание Дж. Дж. Томсона, сделанное в 1907 г. и состоявшее в том, что число атомов, ионизированных рентгеновскими лучами, по мере удаления от источников лучей убывает, между тем как для каждого акта ионизации должна быть доставлена одна и та же энергия. Из этого он заключил, что излучение состоит не из сферических волн, но что оно скорее ведет себя, как дождь частиц. Позднее (1916 г.) Эйнштэйн обосновал эту идею «игольчатого излучения» (Nadelstrahlung) статистически [136], вычислив импульс, который получает и отдает возвешенная в световом поле частица при поглощении и испускании. Оказалось, что требование, чтобы при этом не нарушалось нормальное броуновское

[136] A. Einstein. Mitt. Phys. Ges. Zürich., 18, 1916; Phys. Z., 18, 1917, S. 121.

движение, выполнимо только в том случае, если излучение ведет себя как газ частиц с энергией $h\nu$ и импульсом $h\nu/c$ [137].

Первое успешное применение теории квант к спектроскопии молекулярных спектров принадлежит Бьерруму [138], который в 1912 г. пытался объяснить особенности наиболее коротковолновой области инфракрасного спектра. Он предположил, что двухатомная молекула состоит из атомов, один из которых заряжен положительно, а другой отрицательно и что они колеблются с частотой ν один относительно другого вдоль соединяющей их линии.

Падающее излучение этой частоты поглощается. Следуя Нернсту, который еще в 1911 г. предположил существование квантования молекулярных вращений [139], Бьеррум полагает, что вращательная энергия в случае вращения вокруг линии, соединяющей атомы в молекуле в некоторой плоскости, должна быть кратной $h\nu$.

Если, как обычно, обозначить момент инерции вращающейся системы через I, то вращательная энергия будет

$$\frac{1}{2} I(2\pi\nu)^2$$

и, согласно основной гипотезе,

$$\frac{1}{2} I\,(2\pi\nu)^2 = nh\nu,\ (n = 0, 1, 2, 3\ldots).$$

Отсюда для частоты найдем

$$\nu_n = \frac{nh}{2\,\pi^2 I},$$

а возможные частоты будут таковы:

$$\nu_0,\ \nu_0 \pm \frac{h}{2\pi^2 I},\quad \nu_0 \pm \frac{2h}{2\pi^2 I} \text{ и т. д.}$$

После появления теории Бора оказалось необходимым видоизменить теорию Бьеррума, сопоставив спектральные линии не с действительными вращениями, а с переходами из одного состояния вращения в другое.

В 1931 г. Эренфест [140] улучшил квантовую теорию вращения, предположив, что если ν есть число обращений в секунду, то вращательная энергия есть кратное $^1/_2\ h\nu$, а не $h\nu$, как у Бьеррума; множитель $^1/_2$ вводится потому, что вращатель-

[137] М. Борн. А. Эйнштейн и световые кванты. УФН, т. LIX, ГТТИ, 1956, стр. 128.
[138] N. Bjerrum. Nernst Festschrift. 1912, S. 90.
[139] W. Nernst. Z. Electrochem., 17, 1911, S. 265.
[140] P. Ehrenfest. Verh. Deutsch. Phys. Ges., 1913, p. 451.

ная энергия чисто кинетическая в отличие от осциллятора. Тогда

$$\frac{1}{2} I (2\pi\nu)^2 = n \frac{1}{2} h\nu, \quad (n = 0, 1, 2 \ldots),$$

и

$$\nu = \frac{nh}{4\pi^2 I}.$$

Таким образом, угловой момент $2\pi\nu I$ имеет значение

$$nh/2\pi,$$

т. е. равен целому кратному $\hbar$.

Все эти отдельные попытки нашли свое завершение в июле 1913 г. в работе двадцативосьмилетнего датского физика Нильса Бора [141]. Нильс Бор объединил предшествующие результаты, приняв модель атома Резерфорда и предположив, что процесс излучения есть квантовое явление. Он предположил, в согласии с принципом Ритца о спектральных термах, что излучение каждой спектральной линии связано с переходом какого-либо электрона в атоме из одного состояния, характеризуемого определенным уровнем энергии, в другое.

Согласно Бору, для стационарной орбиты электрона в атоме, при движении по которой излучения не происходит

$$mvr = nh/2\pi,$$

а при переходе электрона с одной орбиты с энергией E_2 на другую, с энергией E_1, излучается или поглощается энергия $h\nu$:

$$E_2 - E_1 = h\nu.$$

Бор смог найти исторически правильный путь для новой квантовой атомной физики.

Эйнштейн, характеризуя положение физики в 1913 г. и роль Бора, писал:

«...Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточным, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне

[141] N. Bohr. Phil. Mag., 26, 1913, p. 1, 476, 875.

чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли» [142].

Бор был вполне подготовлен к отказу от классической электродинамики, так как многократно обсуждал с Резерфордом, в лаборатории которого в Манчестере он в то время (1913) работал, вопрос о неприменимости этой электродинамики к модели атома, предложенной Резерфордом.

В первой работе «On the Constitution of Atoms and Molecules» [143] («О строении атомов и молекул»), датированной 5 апреля 1913 г. и опубликованной по представлению Резерфорда в июльском и сентябрьском номерах «Philosophical Magazine», Бор отмечает, что хотя модель Резерфорда, в противоположность модели Томсона, неустойчива с точки зрения классической электродинамики, однако оценка этого обстоятельства должна быть существенно изменена в связи с развитием и применением в различных областях физики квантовой теории. В результате этого выяснилось «общее убеждение, что классическая электродинамика недостаточна для описания систем атомного размера. Каково бы ни оказалось изменение в законах движения электронов, кажется необходимым ввести в эти законы величины, чуждые классической электродинамике, т. е. постоянную Планка...» [144].

Постоянная Планка входит в теорию Бора не только как величина, характеризующая излучаемую атомом энергию, но и как величина, значение которой (или целое кратное которой) определяет дискретный ряд устойчивых, в противоречии с классической теорией, состояний электронов.

«Мы предполагаем, что электроны, расположенные на равных угловых интервалах на коаксиальных кольцевых окружностях, вращаются вокруг ядра. Для того чтобы определить частоты, а также размеры этих колец, мы вводим главную гипотезу...что в устойчивом состоянии атома угловой момент каждого электрона относительно центра его орбиты равен универсальной величине $h/2\pi$, где h — постоянная Планка. Мы примем как условие устойчивости, что полная энергия системы в рассматриваемой конфигурации меньше, чем в любой соседней конфигурации, удовлетворяющей тому же условию для углового момента электронов» [145].

Формирование атома из ядра и электронов представляет собою процесс, в результате которого возникает нейтральный атом. «Бор говорит: «...мы предполагаем, что облако четырех

---

[142] А. Эйнштейн. Творческая автобиография. УФН, т. LIX, 1956, стр. 87.

[143] N. Bohr. Phil. Mag., 26, 1, 1913, p. 476.

[144] Там же, стр. 2.

[145] Там же, p. 476.

электронов образуется последовательным связыванием ядром электронов, первоначально почти покоящихся, причем энергия в этом случае излучается»[146]. Этот процесс продолжается до полного выравнивания величины положительного и отрицательных зарядов. Примером такого процесса может быть образование гелия из α-лучей.

Из рассмотрения предыстории теории Бора мы видим, что ни допущение состояний атома, которые не подчиняются законам классической электродинамики, ни отказ от непрерывного хода изменения состояний не представляли собой, собственно говоря, идеи Бора. Сочетание их, т. е. применение квантового принципа к модели атома Резерфорда принадлежит Бору. Основная же его идея, глубокий смысл которой был раскрыт лишь впоследствии, состояла в том, что он принял предположение о невозможности наглядного классического представления во времени поведения электрона в течение перехода атома из одного состояния в другое.

В квантовые соотношения, введенные Бором, время перехода электрона из одного состояния в другое не входит и не может быть введено. Таким образом, этот переход совершается за время, равное нулю, т. е. вне времени. Пожалуй, единственным вневременным явлением классической физики была сила тяготения, которая распространялась от тела к телу мгновенно, т. е. вне времени (с бесконечной скоростью, так как $dt = 0$, а $ds \neq 0$). Однако в этом случае вне времени распространялось не вещество, а действие одного агрегата вещества на другой. Даже такое распространение было в физике XX в. одиноким остатком от XVIII в., и положение с ним было, хотя и привычным, но явно внутренне неудовлетворительным, особенно после создания электродинамики Фарадея, Максвелла, Лоренца. В теории Бора вневременным актом является переход электрона-частицы из одного состояния в другое, т. е., согласно модели Резерфорда — Бора, с одной орбиты на другую, удаленную на другое расстояние от ядра, чем исходная орбита, причем происходит как изменение расстояния электрона от ядра, так и скорости его движения по орбите.

Этот процесс в наглядной модельной теории Резерфорда является принципиально ненаглядным во времени (хотя и весьма наглядным в пространстве). Так в новой физике снова появились вневременные процессы, какими было распространение силы тяготения (и электрической по отвергнутым теориям дальнодействия).

Бор справедливо указывает, что, «принимая теорию Планка, мы признаем открыто недостаточность обычной электродина-

[146] N. Bohr. Phil. Mag., 26, 1, 1913, стр. 477.

мики и решительно порываем с тесно связанной цепью положений этой теории» [147].

На этой основе оказывается возможным построить модель атома, позволяющую объяснить закономерности в спектрах. В результате же объяснения спектров с помощью соотношения

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad \text{или} \quad \nu = \frac{E_2}{h} - \frac{E_1}{h}$$

возникает возможность перейти «к попытке составить наглядное представление о стационарных состояниях» [148]. Хотя, добавим от себя, переходы между состояниями остаются, как уже отмечено, ненаглядными, отражая «...то резкое противоречие, в котором стоят изложенные соображения к поразительно гармоничному кругу представлений, которые по справедливости называют классической электродинамикой» [149].

Для того чтобы подчеркнуть, насколько развитый круг идей был отчетливо выражен Бором уже в его первой работе, приведем еще две выдержки из нее. В этих выдержках Бор говорит об основных принципиальных допущениях своей теории:

«Принципиальные сделанные допущения таковы:

1) динамическое равновесие системы в стационарном состоянии может быть рассмотрено с помощью обычной механики, в то время как переход системы между различными устойчивыми состояниями не может быть рассмотрен на этой основе;

2) последний процесс сопровождается испусканием гомогенного излучения, для которого отношение между частотой и количеством излученной энергии определяется теорией Планка» [150].

Еще резче заостряя эти положения, Бор поясняет далее: «ибо известно, что обычная механика не может иметь абсолютной ценности (validity), а имеет место только при расчетах некоторых средних значений движения электронов. С другой стороны, в расчетах динамического равновесия в стационарном состоянии, в котором нет относительного смещения частиц, мы не нуждаемся в том, чтобы различать между действительными движениями и их средними значениями.

Второе допущение находится в очевидном противоречии с обычными идеями электродинамики, но кажется необходи-

---

[147] Н. Бор. Три статьи о спектрах и строении атомов. Перевод С. И. Вавилова. М.—Л., ГИЗ, 1923. О спектре водорода, стр. 20.

[148] Там же, стр. 22.

[149] Там же, стр. 29.

[150] N. Bohr. Phil. Mag., 26, 1913, p. 7.

мым для того, чтобы дать отчет об экспериментальных фактах»[151].

Однако такой подход к атомным явлениям необходимо связан, как отмечено нами, с принципиально ненаглядным характером перехода электрона из одного состояния в другое.

Вопрос о равенстве нулю времени перехода электрона из одного состояния в другое интересен еще и потому, что для принципа соответствия, лежащего в основе методов решения задач в теории Бора, величина этого времени несущественна. Действительно, при переходе к классическому случаю при больших квантовых числах, расстояние между квантовыми орбитами уменьшается и стремится к нулю, а следовательно, и время перехода, если бы оно было отлично от нуля, также стремилось бы к нулю. Можно сказать, что равенство $t = 0$ представляет собой специфический для теории Бора результат, в котором дискретность процессов выражается дискретностью времени.

Это ясно видел и, конечно, не мог принять М. Планк. Даже в 1923 г. он, ссылаясь на опыты Штерна и Герлаха, которые показали, что в атоме осуществляются именно квантовые состояния, полагает, что в общем случае это не имеет места, так как это приводит к вневременным актам перехода: «что они (квантовые состояния.— *Л. П.*) являются единственно возможными, не следует думать хотя бы уже потому, что переход из одного стационарного состояния в другое ни в коем случае не может иметь скачкообразный характер, т. е. совершаться вне времени»[152].

Собственно говоря, модельная теория Бора заплатила исключением времени за возможность в каком-то, хотя бы и достаточно грубом приближении представлять и анализировать мир атома с помощью классических понятий, созданных макроскопической физикой. Полуклассическая модель атома Бора, как мы знаем теперь из квантовой механики, не могла быть последовательно построена, и это нашло свое отражение, в частности, в том, что принципиально наглядная модель заключала в себе столь явное исключение времени для процессов переходов электронов с одного уровня энергии на другой.

Что же касается пространственных форм процессов, то они в теории Бора имеют совершенно классический характер.

Признание вслед за Резерфордом неприменимости классической электродинамики к движению электрона по орбите, использование этой же электродинамики при решении конкрет-

---

[151] N. Bohr. Phil. Mag., 26, 1913, стр. 7.

[152] М. Планк. Теория теплового излучения. М.—Л., ОНТИ, 1935, стр. 10.

ных задач, сочетание классической механики и чуждых ей квантовых постулатов, вся характерная для теории Бора внутренняя противоречивость не помешали ей, а может быть, напротив, помогли объяснить и предсказать огромное количество экспериментальных фактов.

Классическая механика дает возможность вывести из физической картины электрона, вращающегося вокруг ядра, формулы, связывающие радиусы орбиты, энергию и число оборотов в единицу времени. Однако она не может объяснить закономерностей спектра, испускаемого атомом. Для объяснения их необходимо было, как это сделал Бор, постулировать, что 1) атом обладает только определенными уровнями энергии, образующими дискретный ряд

$$E = -\frac{Rh}{n^2},$$

где R — постоянная Ридберга, равная $\frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3 c}$, а $n = 1, 2, \ldots$, и 2) излучение или поглощение энергии атомом происходит при переходе с одного уровня энергии на другой. На основе принципа соответствия, т. е. требования, чтобы новая механика асимптотически переходила в старую в случае больших квантовых чисел, оказалось возможным однозначно решить вопрос о связи между экспериментально определенными постоянными Ридберга и атомными постоянными: массой электрона и квантом действия Планка.

Квантование момента количества движения, являющееся основной чертой атомной механики Бора, и предполагаемое в ней верным в общем случае, остается в этой теории совершенно необоснованным и по существу неясным, хотя тем не менее оно очень хорошо оправдывается при развитии теории и объяснении экспериментальных данных.

Так как специфичным для теории Бора является квантование некоторых величин, причем только это квантование позволяет объяснить результаты многочисленных опытных данных, то возникает естественный вопрос об общем методе нахождения квантующихся величин, т. е. величин, могущих принимать только дискретный ряд значений. Выяснение этого вопроса на основе теории Гамильтона было осуществлено в течение 1915—1925 гг. в работах Вильсона, Зоммерфельда, Шварцшильда, Эпштейна, Эренфеста и др.

Первым блестящим результатом, определившим немедленное и всеобщее признание теории Бора, было вычисление с изумительной точностью постоянной Ридберга, выраженной им через другие универсальные постоянные: заряд электрона l, массу электрона m, постоянную Планка h. Бор получил

$$R = \frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3 c} \; см^{-1}.$$

Подставив значения постоянных, имевшихся в его распоряжении, Бор нашел

$$R = 107\,300 \; см^{-1},$$

в то время как из опыта получено $R = 109\,667 \; см^{-1}$. Прекрасный результат!

Из сформулированных им постулатов Бор вывел формулу Бальмера

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right),$$

где $m = 2, \; n = 3, \; 4...$

При этих выводах постоянная Планка появляется дважды, как deus ex machina.

Для точного вычисления постоянной Ридберга надо принять во внимание, что ядро на самом деле не покоится, и учесть движение ядра и электрона вокруг общего центра тяжести. Хотя $m_э$ равна $^1/_{1837}$ массы ядра и поправочный член $[1 + (m_э/m_я)]^{-1}$ очень мал, при исключительно высокой точности спектроскопических измерений поправка эта (меньшая промилли!) все же имеет значение, тем более, что она различна для различных атомов. Опыт и здесь дает превосходное согласие с теорией Бора.

Теория Бора позволила объяснить закономерности, обнаруженные в линейных спектрах атомов, ряд явлений флуоресценции, расщепление спектральных линий в электрическом поле — штарк-эффект, открытый в 1913 г. Штарком, нормальный эффект Зеемана и т. д. При огромной точности экспериментальных спектральных методов, дающих пятый-шестой знак после запятой, теория Бора смогла получить количественное согласие с опытом, при котором расхождение с расчетными данными не превышает нескольких единиц последней значащей цифры.

Другой триумф теории Бора связан с открытием элемента с атомным номером 72. Этот элемент, по предположению химиков, относился к редким землям (Z от 57 до 71).

В 1911 г. Урбэн [153] открыл при помощи фракционирования гадолинита элемент с атомным номером 72, относящийся, как ему казалось, к группе редких земель. Тем не менее, проанализировав с точки зрения заполнения электронных оболочек,

---

[153] G. Urbain. Comptes rendus, 152, 1911, 141.

согласно значениям главного квантового числа, положение редких земель в периодической системе Менделеева, Бор в 1921 г. пришел к выводу, что элемент с $Z = 72$ отнюдь не должен принадлежать к редким землям, а должен быть гомологом циркония. В 1922 г. Костер и Хевеши в Копенгагене проверили и подтвердили это предсказание, открыв элемент гафний ($Z = 72$), оказавшийся действительно гомологом титана и циркония.

Развитие квантовой физики после 1913 г.— это в основном развитие теории Бора, блестяще объяснявшей многочисленные экспериментальные факты, но в то же время оказавшейся явно неудовлетворительной как с логической точки зрения, так и перед лицом ряда новых проблем, выдвинутых экспериментальной физикой.

Бор указывает: «За последние годы разработан метод определения стационарных состояний не только для простых периодических систем, но и для определенного класса непериодических, так называемых, условно-периодических систем, уравнения движения которых могут быть разрешены «разделением переменных». Для систем такого типа, как известно, обобщенные координаты могут быть заданы так, что описание движения с помощью методов общей динамики сведется к рассмотрению некоторого числа обобщенных «компонент движения», каждая из которых соответствует изменению только одной координаты во время движения и в некотором отношении «независима» от остальных» [154].

Модель атома Бора может быть распространена на более сложную механическую систему. В своей первой работе Бор установил, что «во всех системах, состоящих из электрона и ядра, где ядро покоится и электрон описывает круговую орбиту (со скоростью малой по сравнению с c), кинетическая энергия равна, au signe prés половине потенциальной энергии» [155].

Распространение теории Бора на более общий случай (а не только на случай круговой орбиты) было сделано Зоммерфельдом, который воспользовался как исходным пунктом одной идеей Планка. Планк рассматривал одномерный линейный гармонический вибратор и хотел подсчитать вероятность того, что система будет находиться в каком-либо квантовом состоянии.

Как известно, теорема Лиувилля устанавливает, что в классической механике равные элементы фазового пространства (в данном случае двумерного (p, q)-пространства) равновероятны.

---

[154] Н. Бор. Три статьи о спектрах и строении атомов. ГИЗ, 1923, стр. 48.

[155] Там же, стр. 49.

Планк рассмотрел вид зависимости p от q для квантованного гармонического осциллятора. Уравнение характеристик в этом случае имеет вид:

$$\frac{p^2}{m} + 2\pi^2 m \nu^2 q^2 = E;$$

оно определяет эллипс с площадью E/ν. Так как допустимые состояния осциллятора имеют энергию $nh\nu$, то площадь n-го эллипса будет nh, так что площадь, заключенная между двумя последовательными эллипсами, будет h.

Зоммерфельд вводит искусственные границы посредством ординат, отстоящих друг от друга на расстоянии 2π для того, чтобы возрастание на 2π угловой координаты приводило к возвращению к начальному положению. Когда угловой момент является кратным $h/2\pi$, площадь между двумя последовательными кривыми есть h. Переходя к общему случаю, Зоммерфельд пишет:

$$\oint_n p dq - \oint_{n-1} p dq = 0,$$

где индекс n указывает n-ую орбиту. Знак $\oint$ обозначает интеграл по замкнутому контуру, а написанный интеграл известен под названием фазового интеграла. Предположим, что

$$\oint_0 p dq = 0;$$

тогда получаем

$$\oint p dq = nh,$$

где слева стоит интеграл действия.

Зоммерфельд рассматривает далее задачу атома водорода; он показывает, что в отличие от теории Бора надо вводить два квантовых числа:

$$\oint p_\theta \, d\theta = n_1 h,$$

$$\oint p_r \, dr = n_2 h,$$

где n_1 — азимутальное, а n_2 — радиальное квантовые числа.

Энергия эллиптической орбиты в таком случае будет:

$$E = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 (n_1 + n_2)^2}.$$

Надо заметить, что, таким образом, энергия зависит только от суммы квантовых чисел, а не от каждого из них в отдельности. В более поздней работе Зоммерфельд показал, что при

решении задачи водородоподобного атома с точки зрения релятивистской механики энергия должна слабо зависеть от отдельных квантовых чисел; другими словами, каждая линия в спектре водородоподобного атома расщепляется и имеет тонкую структуру. Этот результат качественно и количественно согласуется с экспериментом, особенно для случая ионизированного атома гелия, где это расщепление больше и легче измеримо, чем у атома водорода. Объяснение Зоммерфельдом тонкой структуры спектральных линий было одним из триумфов квантовой теории.

Блестящие успехи теории атома Бора, объяснившей и связавшей воедино огромное количество экспериментальных фактов, не могли скрыть ее внутренних противоречий. Эти внутренние противоречия раскрывались с развитием, расширением и обобщением теории Бора. Постепенно выяснились и трудности, вставшие при объяснении отдельных экспериментальных результатов.

Как в своих принципиальных основах, так и при решении важнейших задач (модель атома гелия) классическая теория Бора в начале 20-х годов XX в. переживала серьезный кризис.

Основной, принципиальный дефект теории Бора — Зоммерфельда состоит в том, что она определяет все множество классических орбит и на последней стадии вычислений отбрасывает большинство из них.

В решении конкретных задач методы классической квантовой теории привели к расхождению с опытом.

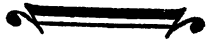
Из условия равенства общего момента импульса следует, что круговые орбиты двух электронов гелия образуют угол в 120°. Кажущийся произвол в выборе разности фаз вращения электронов на их орбитах Крамерс устранил наложением условия: средняя величина потенциала возмущающих сил должна иметь минимум в данной системе. В первом приближении эта средняя величина потенциала соответствует той энергии, которую нужно добавить к энергии невозмущенной системы, чтобы получить полную энергию истинного стационарного состояния. Условие минимума средней величины потенциала эквивалентно требованию устойчивости в отношении энергии. Это требование удовлетворяется, если оба электрона будут одновременно проходить через противолежащие точки пересечения обеих круговых орбит, т. е. если разность фаз проекций движений электронов на неизменную плоскость равна 180°. Любая другая модель гелия приводит к неустойчивости.

Полученное на основании наиболее точных измерений значение ионизационного потенциала гелия равно 24,6 *в*. Крамерс остроумно решает задачу и находит для упомянутой выше модели значение ионизационного потенциала 20,7 *в*. Разность

экспериментальной и теоретической величины лежит за пределами ошибок измерения.

Далее Крамерс решает также задачу о динамической устойчивости модели Бора. Для этой цели исследуется движение электронов, при котором мгновенное положение и скорость несколько отклоняются от значений, соответствующих действительному движению. В случае динамической устойчивости отклоненная система должна совершать колебания около устойчивого положения; в случае же неустойчивости она должна все дальше отходить от положения устойчивости. Модель Бора в этом смысле оказалась динамически неустойчивой.

Неудача в распространении теории Бора на атом гелия показала ограниченность самой теории и лежащих в ее основе методов классической механики; вся теория обратилась в почти интуитивное угадывание истинных отношений.



Б. Г. Кузнецов

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

В предыдущем очерке было показано, как теория Бора сталкивалась со все более серьезными трудностями и все яснее становилась неудовлетворительность ее оснований — отсутствие общего физического принципа, из которого вытекали бы квантовые условия, выбор «разрешенных» орбит электрона. Вместе с тем происходил процесс постепенного накопления понятий и идей, без которых не могла бы появиться новая теория, содержащая такой общий принцип и выводящая из него квантование электронных орбит. В начале двадцатых годов этот процесс продвинулся уже далеко. Физика, если рассматривать логические связи между открытиями и теоретическими концепциями, стояла на пороге новых обобщений.

Общая историческая обстановка характеризовалась в это время возобновлением международных научных связей[1] и оживлением научной литературы Франции, Германии и Англии. Несмотря на тяжелые послевоенные условия, собственно тео-

[1] Роль международного научного сотрудничества в создании квантовой механики очень ярко освещена в воспоминаниях Гейзенберга. Приведем отрывок из этих воспоминаний: «Летом 1925 г. я поехал в Кембридж и там в колледже, в лаборатории русского физика Капицы, сделал сообщение о своей тогдашней работе небольшому кружку теоретиков. Среди присутствующих находился необычайно талантливый, едва достигший 23 лет, студент, который взялся за мою проблему и в течение нескольких месяцев разработал законченную квантовую теорию атомной оболочки. Это был Дирак — человек с выдающимися математическими способностями. Его образ мышления значительно отличался от моего, его математические методы были изящнее и оригинальнее по сравнению с теми, которыми мы пользовались в Геттингене. Однако в конечном счете он пришел в самых существенных пунктах к тем же результатам, к каким пришли здесь, в Геттингене, Бор, Иордан и я; или, иначе говоря, наши результаты взаимно дополняли друг друга самым превосходным образом. Этот факт служит новым доказательством объективности науки и ее независимости от языка, расы или веры ученого».

ретическая мысль в физике била ключом уже в самом начале двадцатых годов. Несколько позже начался подъем теоретических исследований в других странах Европы и в США. После разгрома интервенции советская наука, внесшая в 1922 г. значительный вклад в теорию относительности (релятивистская космология Фридмана), подготовляла свой вклад в физику микромира. Новые стимулы научного творчества в СССР, новые идейные позиции, новые кадры, создание ряда новых исследовательских центров в 1918—1922 гг.— все это сказалось во второй половине 20-х гг. в быстром экспериментальном и теоретическом применении и развитии квантовой механики [2].

В этих условиях и произошел крупный перелом в физической теории, не имеющий прецедентов по быстроте, с которой почти непрерывно появлявшиеся новые теории сменялись другими, еще более радикальными. Ни электронная теория в девяностые годы, ни специальная теория относительности в 1905—1908 гг., ни общая теория относительности в 1911—1919 гг. не знали такого быстрого темпа возникновения и первоначального развития своих основ.

В 1923 г. де Бройль пришел к мысли о волнах материи; в 1924 г. была опубликована диссертация де Бройля, в следующем году — более систематическое изложение новой теории; в том же 1925 г.— первый вариант квантовой механики Гейзенберга; затем в течение одного года Гейзенберг, Борн и Иордан создали матричную механику, Шредингер открыл знаменитое волновое уравнение, Борн, Винер, Эккарт, Дирак, Шредингер и другие показали эквивалентность волновой механики де Бройля — Шредингера и квантовой механики Гейзенберга — Иордана — Борна; было создано операторное представление квантовой механики; Иордан и Дирак выдвинули теорию преобразований; к следующему, 1927 г. осталось интерпретировать эту теорию, что и было сделано Гейзенбергом и Бором в работах о принципе неопределенности.

На первый взгляд, развитие физики в двадцатые годы напоминает «волновой пакет», фигурирующий в квантовой механике; на небольшом отрезке времени процесс развития идей приобрел характерный, резко локализованный во времени, максимум, хотя, разумеется, он не был незначительным ни до, ни после 1925—1927 гг. После 1927 г. квантовая механика переживает период быстрого развития применений. Но если говорить об основаниях теории (речь пока идет о нерелятивистской теории),

---

[2] См. В. А. Фок. Квантовая механика. Сб. Математика и естествознание в СССР. М.—Л., 1938, стр. 165—176. Д. И. Блохинцев. Пути развития теоретической физики в СССР, УФН, 23, 285 (1947). Я. И. Френкель. Теоретическая физика в СССР за 30 лет, УФН, 33, 284 (1947).

то в указанные годы укладывается особый и важный период развития физики. Рассмотрим главные вехи короткого, но богатого событиями пути от первой работы де Бройля вплоть до статей Гейзенберга и Бора о принципе неопределенности.

Первым наброском теории де Бройля была статья, напечатанная в докладах Парижской Академии наук осенью 1923 г. Уже здесь де Бройль сопоставлял движению электронов некоторые волновые процессы. Вскоре, в 1924 г., де Бройль представил свою диссертацию, в которой изложил это представление в более систематической и строгой форме [3]. Оптико-механическая аналогия, лежащая в основе новой концепции, сопоставляет частице волну, которая движется со скоростью u, связанной со скоростью частицы v соотношением $u = \frac{c^2}{v}$, где c — скорость света.

Из этого уравнения видно, что скорость распространения волны превышает скорость света. Однако это не противоречит релятивистским соотношениям, ограничивающим лишь скорости распространения энергии и массы. Каков же смысл скорости u? Де Бройль отождествляет ее с групповой скоростью, со скоростью движения центра энергии группы волн. При этом сама частица приобретает характер волнового пакета.

Для теории де Бройля характерно широкое использование исторических экскурсов и обобщения идей, высказанных в прошлом. Непосредственным, исторически исходным пунктом теории была проблема квантования электронных орбит, иными словами, проблема, поставленная Бором за десять лет до появления теории де Бройля. Но идейные корни новой теории уходят еще дальше. Де Бройль широко пользовался в своих выводах соотношениями специальной теории относительности. Далее, для генезиса идей де Бройля решающее значение имел синтез оптических и механических концепций, высказанных на заре классической физики.

Следуя за Гамильтоном, де Бройль обратил внимание на поразительную аналогию между принципом кратчайшего времени распространения света, с одной стороны, и принципом наименьшего интеграла механической скорости — с другой. Уже в древности Герон Александрийский писал о кратчайшей длине светового луча. Это условие относилось не к времени, а к пространству, но, в случае отражения, кратчайшее расстояние совпадает с кратчайшим временем. Если же скорость света меняется, то общей основой законов геометрической оптики является требование наименьшего времени. Именно таким образом сформулировал основу геометрической оптики Ферма.

[2] Ann.d. Phys. (10), 3, 22, 1925.

В следующем столетии Мопертюи и Эйлер выдвинули принцип наименьшего значения интеграла механической скорости. В формулировке указанного принципа механическая скорость аналогична обратной величине волновой скорости, фигурирующей в принципе Ферма. Гамильтон обратил внимание на эту аналогию и вместе с тем создал предпосылки для ее дальнейшего углубления, показав, что классическая механика в целом может быть выведена из принципа наименьшего действия.

Учитывая форму, которую приняли вариационные принципы механики Гамильтона, можно по-иному представить оптико-механическую аналогию — сопоставить поверхность равной фазы волны с поверхностью равного действия. Такое сопоставление и было исходным пунктом дальнейших рассуждений де Бройля. Де Бройль говорит о волнообразном распространении действия, представляет действие как фазу волны. Учитывая, что фаза — безразмерная величина, де Бройль сопоставляет фазе отношение действия к некоторой константе, имеющей размерность действия. Идя по этому пути, де Бройль показывает, что волновые величины (частоту ν и волновой вектор $\mathbf{k}$) можно с помощью коэффициента h связать с механическими величинами (энергией E и импульсом $\mathbf{p}$) соотношениями:

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad \mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{n}.$$

Наиболее важной идеей де Бройля было отождествление коэффициента h, фигурирующего в этих соотношениях, с постоянной Планка — квантом действия. Далее, де Бройль выразил длину волны λ, сопоставленной частице, с импульсом p частицы:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Он указал также связь между частотой ν такой волны с энергией E частицы (для последнего необходимо исходить из релятивистского выражения энергии $E = mc^2$).

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}.$$

Если движение частиц представляет собой по существу распространение волн, то путь к решению проблемы, поставленной Бором, оказывается сравнительно простым. Де Бройль рассматривает боровскую модель атома и переводит на язык волновых понятий и соотношений картину движения частицы по замкнутой орбите. Он приходит к выводу, что такое движение может совершаться при условии, что фаза сопоставленной частице волны, после того как волна пробежит замкнутую

орбиту, не изменится (изменится на величину $2n\pi$, где n — целое число). Отсюда можно получить квантовые условия Бора. Де Бройль показывает, что при постоянной скорости движения частиц по круговой орбите возможны лишь такие орбиты, на которых длина волны укладывается целое число раз. При этом момент количества движения L подчиняется условию

$$2\pi L = nh.$$

Таково квантовое условие для водородоподобного атома. Де Бройль показал, что волновое представление объясняет и более сложные квантовые условия, выведенные Бором и Зоммерфельдом.

Из теории де Бройля естественным образом вытекала мысль о возможности наблюдать дифракционные явления, демонстрирующие волновую природу частиц. С точки зрения нового взгляда на природу частиц, классическую механику можно было уподобить геометрической оптике в том отношении, что как та, так и другая строго справедливы лишь при предположении о бесконечно малой длине волн. Для оптики речь идет об электромагнитных волнах, для механики — о волнах материи. Геометрическая оптика — предельный случай волновой; геометрическая оптика переходит в волновую в случае конечной длины волны; волновые свойства появляются в явлениях интерференции и дифракции света. Аналогичным образом можно было представить себе, что в случае непренебрежимой длины де-бройлевых волн геометрическая механика переходит в волновую, которая проявляется в соответствующих дифракционных явлениях. Эйнштейн в 1925 г. [4] высказал эту мысль, которая вскоре получила экспериментальное подтверждение. Соображения Эйнштейна сводились к следующему. Длина волны де Бройля связана с импульсом частицы соотношением

$$\nu = \frac{h}{mv}.$$

При достаточно малой скорости электрона длина волны принимает значения, допускающие экспериментальное обнаружение дифракции. Поэтому при низких температурах и соответственно больших длинах де-бройлевых волн весьма вероятны аномалии, могущие получить объяснение с точки зрения дифракции волн материи. Подобные аномалии наблюдались. За год до работы Эйнштейна, Гюнтер описал аномальное падение вязкости водорода при низких температурах. Эйнштейн заявил о принципиальной возможности объяснить подобные

[4] Sitzungsber. Preus. Akad. d. Wiss., 1925, S. 9.

аномалии дифракцией де-бройлевых волн. После этого Эльзасер [5] предположил, что таким же образом можно объяснить аномалии, наблюдавшиеся при столкновении свободных электронов с атомами.

В 1927 г. Дэвиссон и Джермер, в результате тщательных экспериментов, поставленных со специальной целью проверки идей де Бройля, обнаружили явления дифракции электронов [6]. В этих опытах пользовались пучком электронов, падавших на поверхность монокристалла никеля. При этом измерялось число электронов, рассеянных под разными углами. Оказалось, что в некоторых направлениях это число возрастало и кривая рассеяния напоминала кривую рассеяния рентгеновых лучей. Так как распределение максимумов дает возможность определить длину волн в случае рассеяния рентгеновых лучей и так как картина, наблюдавшаяся Дэвиссоном и Джермером, не отличалась по существу от рассеяния рентгеновых лучей, можно было определить длину волны, соответствующей движению электронов. Подобные экспериментальные наблюдения (впоследствии не раз повторявшиеся) дали результаты, согласные с теорией де Бройля. Вскоре Г. П. Томпсон [7] исследовал с той же целью проверки идей де Бройля прохождение электронов через тонкие металлические фольги и наблюдал дифракционные явления даже в случае сравнительно быстрых электронов. Электроны, пройдя через фольгу, попадали на фотографическую пластинку, на которой получались дифракционные круги, вполне аналогичные кругам, образующимся при прохождении через фольгу рентгеновых лучей. Вычисление длины де-бройлевых волн на основе этих опытов также дало результаты, согласные с теорией.

Экспериментальное подтверждение идей де Бройля дало сильный толчок их дальнейшему развитию. Начался период почти непрерывно следовавших один за другим новых теоретических обобщений, приведших к созданию основ современной квантовой механики. Год спустя после опубликования теории де Бройля появились концепции Гейзенберга и Шредингера, которые, подобно теории де Бройля, были поворотным моментом в истории новой физики. Статья Гейзенберга, положившая начало принципиально новому направлению в теории микромира, была напечатана в июле 1925 г. [8] Статьи Шредингера появились несколько позже — в начале 1926 г.[9] Однако

[5] Naturwiss., 13, 1925. S. 711.
[6] Phys. Rew., 30, 1927, p. 705.
[7] Proc. Roy. Soc., A, 117, 1928, p. 600.
[8] Z.f. Phys., 33, 1925, S. 879.
[9] Ann. d. Phys., 79, 1926, S. 361; 79, 1926, S. 489; 80, 1926, S. 437; 81, 1926, S. 109.

концепция Шредингера логически непосредственно примыкает к идеям де Бройля. В ней было предложено волновое уравнение, которое играет в квантовой механике роль, аналогичную той, какую играли в классической механике классические уравнения движения. Методологической основой концепции Шредингера было некоторое дальнейшее обобщение идей де Бройля. Если де Бройль сопоставил механический вариационный принцип с основным принципом геометрической оптики, то Шредингер провел последовательную аналогию между механикой и принципом Гюйгенса.

Теория Шредингера была выражена в отвлеченной математической форме, но она характеризуется яркой «физичностью»: математическим построениям соответствуют сравнительно наглядные физические модели. Развивая оптико-механическую аналогию, Шредингер сосредоточивает свое внимание на некоторой волновой функции ψ, локализованной в бесконечно малой области пространства. Исследование непрерывных изменений этой величины в пространстве и во времени имеет своим математическим эквивалентом составление и решение дифференциальных уравнений. Классическая физика выражает принцип Гюйгенса волновым дифференциальным уравнением. В нем вторая производная волновой функции ψ по времени приравнивается сумме вторых производных ψ по координатам. Если пользоваться символом оператора Лапласа, то волновое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + c^2 \Delta\psi = 0.$$

Пользуясь результатами де Бройля, Шредингер переходил от оптических величин к полной энергии E и потенциальной энергии V частицы. В результате он получает следующее уравнение синусоидальной волны, сопоставленной движению частицы:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h}(E - V)\psi = 0.$$

Написанное уравнение является исходным пунктом количественных расчетов квантовой физики. Шредингер показал, что предложенное им уравнение дает возможность с помощью некоторой математической процедуры получить дискретные значения энергии частицы. Это было очередным требованием развивающейся теории. Пока боровская модель атома шла от одного успеха к другому, произвольный характер квантовых постулатов не находился в центре внимания теоретической мысли. Но когда теория Бора столкнулась с принципиальными затруднениями, мысль теоретиков сосредоточилась на поисках физических понятий и математических методов, которые выво-

дили бы квантовые условия из более общих принципов. В развитии математического аппарата особенно важными стали поиски приемов, автоматически дающих дискретные решения. Первым крупным результатом подобных поисков и была теория Шредингера.

Шредингер исходил из факта, давно обнаруженного теорией дифференциальных уравнений. Дифференциальное уравнение, включающее постоянные параметры и функции пространственных координат, имеет однозначные, конечные и непрерывные решения при определенных дискретных значениях постоянных параметров. При таких значениях решение уравнения становится непрерывной однозначной функцией координат во всем пространстве. Указанные значения параметров называются характеристичными числами уравнения (или собственными значениями соответствующего оператора), а соответствующие функции — фундаментальными функциями (или собственными функциями того же оператора). В уравнении Шредингера постоянным параметром является полная энергия частиц, а потенциальная энергия есть функция координат, непрерывно меняющаяся в пространстве от точки к точке. Непрерывное и однозначное в каждой точке пространства решение уравнения Шредингера получается, когда полная энергия принимает дискретные значения, соответствующие характеристичным числам уравнения. Это обстоятельство позволяет решать задачу квантования энергии. Статья Шредингера так и называлась: «Квантование как проблема характеристичных чисел». Шредингер применил указанную идею к исходной задаче квантовой физики — вычислению дискретного ряда значений энергии линейного осциллятора. Оказалось, что энергия осциллятора равна

$$E = (2n + 1)\frac{h\nu}{2}.$$

Такой результат несколько отличается от результата Планка — энергии, принимавшей значения, кратные целому кванту. Шредингер показал, что энергия всегда равна нечетному кратному половины кванта энергии $h\nu$. Заметим, что из теории Шредингера следует, что энергия даже в самом низшем состоянии колебаний осциллятора ($n = 0$) не равна нулю.

С помощью того же метода Шредингер исследовал движение частицы вокруг неподвижного центра. Энергия такой частицы оказалась также кратной половине кванта энергии.

Дальнейшее звено рассуждений Шредингера — переход от волновой функции одной частицы к волновой функции многих частиц. Обобщенное уравнение для такого случая имеет вид

$$\frac{1}{m_1}\Delta_1\psi + \frac{1}{m_2}\Delta_2\psi + \ldots + \frac{8\pi^2}{h^2}(E - V)\psi = 0,$$

где m_1, m_2 и т. д. — массы движущихся частиц, а Δ_1, Δ_2 и т. д. — соответствующие операторы Лапласа.

Теория Шредингера содержала одну важную с исторической точки зрения особенность, которую можно оценить лишь ретроспективно. Речь идет о физической интерпретации волнового уравнения для многих частиц. Основная тенденция Шредингера, как мы видели, состояла в широком использовании наглядных, классических по своему духу представлений. Но, как выяснилось впоследствии и как, по существу, вытекало из самого обобщенного уравнения, в случае многих частиц такого рода наглядная интерпретация невозможна. Если каждая частица колеблется в трехмерном пространстве и ее положение в нем характеризуется тремя переменными, то в случае n частиц — таких переменных $3n$. Применяя к этому случаю геометрические соотношения, мы должны пользоваться абстрактной геометрией, изучающей конфигурационное пространство $3n$ измерений, каждая точка которого соответствует определенной конфигурации системы, состоящей из частиц. Волны в таком $3n$-мерном пространстве могут служить интерпретацией обобщенных уравнений Шредингера. Тем самым механика значительно расширяет само понятие интерпретации, включая в него значительно более сложные и менее наглядные геометрические представления. Такое существенное расширение возможности применения геометрических методов содержалось implicite в обобщенном уравнении Шредингера.

Статья Гейзенберга [10], положившая начало собственно квантовой (в отличие от волновой) механике, была направлена против использования в механике микромира классических представлений об электронных траекториях. Позитивное содержание статьи состояло в попытке показать связь между уровнями энергии атома и оптическими характеристиками излучения. И те, и другие Гейзенберг характеризует как «наблюдаемые» физические величины в отличие от «ненаблюдаемых» электронных орбит. Исходный принцип своей работы Гейзенберг считает априорным «принципом наблюдаемости» и придает этому принципу метафизический характер. Субъективная установка Гейзенберга была враждебна «модельной» тенденции де Бройля и Шредингера. Такими же были субъективные установки других создателей матричной механики — Борна и Иордана. Тем более любопытна, с точки зрения истории науки, объективная эквивалентность волновой механики, созданной на основе отчетливой классической тенденции, и матричной механики, при построении которой Гейзенберг, Борн и Иордан стремились к максимальному исключению классических моделей. Эта экви-

[10] Z. f. Phys., 33, 1925, S. 879.

валентность результатов, противоречащая противоположности замыслов, выяснилась в 1926 г.

В своей статье Гейзенберг хотел заменить «ненаблюдаемые» электронные орбиты амплитудами и фазами излучаемых волн, т. е. величинами, допускающими спектроскопическое наблюдение. Изменение координат электрона, его движение по орбите можно разложить в ряд Фурье. Зная амплитуду и фазу некоторой излученной электроном волны, можно определить коэффициент одного из членов такого разложения. Зная все амплитуды и фазы излученных волн, можно определить все коэффициенты в разложении Фурье и, таким образом, определить «орбиту» электрона. Подобная связь между орбитой и гармоническими колебаниями устанавливается классической картиной движущегося по орбите и излучающего электрона. В квантовой механике, по мнению Гейзенберга, совокупность амплитуд и фаз также определяет состояние системы. Вместо коэффициентов в разложении электронной орбиты («коэффициентов классического разложения») фигурируют величины особого рода. Каждый коэффициент классического разложения можно было приписать одному определенному состоянию, с одним определенным уровнем энергии. Величины, заменяющие в квантовой механике коэффициенты классического разложения, по-иному связаны с состоянием и уровнями энергии. Каждая из них соответствует переходу из состояния n в состояние m, и совокупность подобных коэффициентов q_{nm} принимает вид матрицы:

$$\begin{matrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \cdots \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \cdots \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{matrix}$$

Такая матрица изображает колебания координат электрона. Матрицами можно представить и другие динамические переменные. Гейзенберг в своей первой статье о квантовой механике еще не подозревал, что двойственные множества, зависящие от двух индексов, q_{nm}, к которым он пришел, и есть матрицы, которые давно известны в линейной алгебре. Борн и Иордан [11], а также Дирак [12] увидели тождество множеств Гейзенберга с матрицами, и вскоре матричная, или квантовая, механика получила систематическое изложение в совместной работе Борна, Гейзенберга и Иордана [13]. Им удалось придать физический смысл правилам алгебры матриц. Особенно важную

[11] Z. f. Phys., 34, 1925, S. 858.
[12] Proc. Roy. Soc., 109, 1925, p. 642.
[13] Z. f. Phys., 35, 1926, S. 557.

роль играло одно из этих правил — некоммутативность умножения матриц. Если по правилам матричной алгебры помножить матрицу q на матрицу p, то $qp \neq pq$. Пользуясь этим математическим законом, с помощью некоторых допущений Борн, Гейзенберг и Иордан пришли к известным перестановочным соотношениям — уравнениям, связывающим матрицы импульса p_r между собой и с матрицами координат q_r:

$$p_r q_s - q_s p_r = \frac{h}{2\pi i} S_{rs},$$

$$q_r q_s - q_s q_r = 0,$$

$$p_r p_s - p_s p_r = 0,$$

где

$$S_{rs} = \begin{cases} 1 \text{ при } r = s, \\ 0 \text{ при } r \neq s. \end{cases}$$

Матричная механика позволяет получить квантовые условия Бора — Зоммерфельда. При этом постоянная h Планка с самого начала фигурирует как константа движения электрона. В теории Бора постоянная Планка была оптической константой в теории спектров и механической константой в теории атома. В новой механике две функции постоянной Планка выводятся одна из другой. Де Бройль и Шредингер выводят динамическую функцию из спектральной; Гейзенберг, Борн и Иордан, наоборот, выводят оптическую функцию постоянной Планка из ее динамической функции.

Вскоре после опубликования статей Шредингера, содержавших систему волновой механики, появился ряд исследований, показавших в конце концов эквивалентность волновой механики Шредингера, с одной стороны, и матричной механики Борна, Гейзенберга и Иордана — с другой. Важные результаты при этом были получены Борном и Винером [14], Экартом [15] и самим Шредингером, статья которого называлась «Об отношении квантовой механики Гейзенберга, Борна и Иордана к моей» [16].

Начиная с этого времени, квантовая механика получает свою современную математическую форму, сделавшую возможной строгое доказательство эквивалентности двух ранее появившихся концепций. Наиболее характерной особенностью математического аппарата в квантовой механике становится понятие оператора. Начиная с возникновения анализа, мате-

[14] Z. f. Phys., 36, 1926, S. 174.
[15] Phys. Rev., 28, 1926, p. 711.
[16] Ann. d. Phys., 4, 79, 1926, S. 734.

матика была по преимуществу наукой о переменных величинах, и основным понятием ее была функция, устанавливающая соответствие между двумя числовыми множествами. Уже вариационное исчисление вышло за эти рамки; оно рассматривает взаимно-однозначное соответствие между функциями, с одной стороны, и числами — с другой. В наше время создался широкий фронт математики переменных отношений и появилась более общая теория — учение об операторах, рассматривающее взаимно-однозначные соответствия между функциями. С 1926 г. операторы — символы, указывающие, каким образом одна функция переходит в другую,— начинают фигурировать в теоретических работах по физике. В сущности, и метод матриц Гейзенберга, Борна и Иордана, и метод характеристичных чисел Шредингера выходили за рамки математики переменных величин и рассматривали переменные отношения между функциями. Поэтому операторное исчисление, более общий и мощный метод математики переменных отношений, мог стать общим методом квантовой механики, помогая ей вскрыть эквивалентность волновой механики де Бройля — Шредингера и матричной механики Гейзенберга — Борна — Иордана. Здесь можно дать только самое общее изложение основных идей операторного представления физических величин.

Квантовая механика в операторном представлении сопоставляет состояния квантовых систем функциям, а динамические переменные (координаты, импульс, энергию и т. д.) — операторам. Из числа различных операторов квантовая механика пользуется так называемыми линейными самосопряженными операторами, причем основные задачи решаются при помощи трех операторов и их комбинаций. В число этих трех операторов прежде всего входит оператор независимой переменной. Если помножить $f(x)$ на x, получится новая функция; операция умножения функции на независимую переменную x может быть символически представлена в виде

$$\hat{x} f(x) = x f(x),$$

где $\hat{x}$— оператор независимой переменной. Пусть далее оператор $\hat{a}$ символизирует умножение функции на постоянную величину a: $\hat{a}f(x) = af(x)$ и, наконец, оператор d — дифференцирование по x:

$$df(x) = \frac{\partial}{\partial x} f(x).$$

Все перечисленные операторы являются линейными, так как каждый из них, действуя на сумму двух функций, может быть представлен в виде суммы двух одинаковых операторов, действующих на слагаемые; вместе с тем постоянная величина,

умноженная на функцию, может быть вынесена за знак оператора. В квантовой механике применяются комбинации указанных операторов. Правила, которым подчиняются комбинации операторов, образуют операторную алгебру, отличающуюся от обычной прежде всего некоммутативностью умножения. Нетрудно видеть, что две последовательные операции, производимые над функцией, могут дать иной результат в случае изменения порядка, в котором они действуют на функцию. Произведение $\hat{L} = \hat{K}\hat{M}$ операторов $\hat{K}$ и $\hat{M}$ служит символом, указывающим на последовательное применение к функции $f(x)$ этих двух операторов. Такое символическое произведение, вообще говоря, некоммутативно: в случае двух операторов независимой переменной или двух дифференциальных операторов оно коммутативно, но в случае применения к функции оператора независимой переменной $\hat{x}$ и дифференциального оператора $\hat{d}$ результат будет различен в зависимости от порядка:

$$\hat{x}\hat{d} \neq \hat{d}\hat{x}.$$

Для квантовой механики первостепенное значение имеет понятие собственной функции и собственного значения оператора. Обозначая оператор через $\hat{L}$, его собственное значение через λ и собственную функцию через ψ, мы можем написать соотношение между ними в виде уравнения

$$\hat{L}\psi = \lambda\psi.$$

Это уравнение означает, что действие оператора на собственную функцию можно заменить умножением на его собственные значения, как простые множители, и функции, допускающие такую замену, являются собственными функциями оператора. Можно сказать, что для собственных функций оператор десимволизируется, превращается в обычный множитель.

Каждой динамической переменной соответствует свой оператор; координатам, составляющим количества движения, потенциальной энергии, кинетической энергии и полной энергии, сопоставлены особые операторы. Оператор координаты как независимой переменной означает умножение на эту переменную; аналогичным образом всякая динамическая переменная, представляющая собой функцию координат, например потенциальная энергия, также изображается оператором, представляющим собой умножение на координату или функцию координат. Импульс представлен дифференциальным оператором; каждой составляющей импульса сопоставляется оператор, означающий дифференцирование функции по соответствующей координатной оси. Импульсу сопоставляется оператор

$$\hat{\mathrm{p}} = ih\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\right),$$

или, если воспользоваться символом ∇,

$$\hat{\mathrm{p}} = ih\nabla.$$

С помощью этих допущений находят операторы функций координат и импульса, операторы кинетической энергии

$$\hat{T} = \frac{h^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) = \frac{h^2}{2m}\Delta,$$

и потенциальной энергии

$$\hat{U} = U(x,\ y,\ z)$$

(умножение на функцию координат — потенциальную энергию).

Особенно важным понятием квантовой механики является оператор, представляющий сумму кинетической и потенциальной энергии. Если считать, что функция описывает состояние системы, то естественно возникает вопрос о законах изменения состояния и, следовательно, о производной от ψ по времени. Получение производной по времени от функции ψ можно символически изобразить оператором смещения во времени. Нетрудно доказать, что в случае одной свободно движущейся частицы этот оператор совпадает с гамильтонианом H, равным в этом случае оператору кинетической энергии. Важным шагом квантовой механики было доказательство, что во всех случаях, каково бы ни было состояние квантовой системы, оператором смещения во времени служит гамильтониан. В зависимости от характера системы и тех силовых полей, в которых она находится, этот оператор принимает различные формы, но каков бы не был вид гамильтониана, он играет роль оператора смещения во времени. Из этого вывода можно легко получить уравнение Шредингера.

Уравнение Шредингера позволяет получить дискретные значения энергии — характеристичные числа этого уравнения. Этот путь совпадает с нахождением собственных значений оператора Гамильтона.

После того, как уравнение Шредингера было получено из посылок квантовой механики, встал вопрос о физическом смысле волновой функции ψ. Эйнштейн в 1925 г. впервые выдвинул мысль о вероятностном характере волн де Бройля[17].

[17] Sitzungsber. Preus. Akad. Wiss., 1925, S. 3.

Далее, в известной работе Борна, Гейзенберга и Иордана, в которой было дано систематическое изложение матричной механики [18], подчеркивался вероятностный в общем характер квантово-механических соотношений.

Фундаментальная работа о вероятностном смысле волновой функции принадлежит Борну. В 1926 г. Борн [19], рассматривая вопрос о физическом смысле волновой функции ψ, пришел к следующему выводу. Если система состоит из одной точки, то волновая функция измеряет вероятность пребывания частицы в данной точке трехмерного пространства, вероятность встретить частицу в этой точке. Если же система состоит из n частиц, речь идет о функции, изменяющейся от точки к точке конфигурационного пространства с $3n$ измерениями. Впоследствии при изложении вероятностной интерпретации волновой функции обычно пользовались примером дифракции электронов. Если электроны, летящие параллельно и с одинаковой скоростью, проходят через две узкие щели в непрозрачном экране, а затем попадают на флуоресцирующий экран, то на последнем можно видеть интерференционные полосы, так как щели в первом экране оказываются источниками двух сферических волн. В случае большого числа электронов светлые полосы соответствуют местам максимального числа попавших на флуоресцирующий экран электронов, т. е. максимальной плотности электронов. Квадрат амплитуды де-бройлевой волны выражает плотность электронов. Если же пучок состоит из одного электрона, то интерференционная картина на флуоресцирующем экране, демонстрирующая волновые свойства электрона, показывает вероятность попадания электрона на различные точки экрана. При многократном повторении эксперимента, в котором участвует каждый раз один электрон, интерференционная картина соответствует распределению вероятности. Таким образом, волновой аспект движения частиц показывает волнообразное распространение, суперпозицию, интерференцию и т. д. вероятности попадания частиц в ту или иную точку флуоресцирующего экрана; волны де Бройля по своему физическому смыслу представляют волны вероятности.

Такой вывод мог быть сделан на основе операторного представления динамических переменных и физической интерпретации понятий собственных значений и собственных функций. Если вместо собственных значений и собственных функций фигурируют другие значения оператора и другие функции, изображающие состояние системы, то речь может идти уже не об определенном результате единичного измерения, а об опре-

[18] Z. f. Phys., 35, 1926, S. 557 (особенно гл. 4, § 3).
[19] Z. f. Phys., 37, 1926, S. 863; 38, 1926, S. 803.

деленном среднем результате большого числа измерений. В отдельном эксперименте квантовомеханическими соотношениями определено математическое ожидание, величина, к которой среднее значение результата измерений будет приближаться по мере увеличения числа измерений. Такая вероятностная интерпретация волновой функции стала официальной, т. е. наиболее распространенной в мировой науке, излагаемой в учебниках и т. д. Она получила дальнейшее развитие впоследствии, в трудах Эренфеста, показавшего, что средние значения динамических переменных в микроскопических системах подчиняются уравнениям классической макроскопической механики.

Для дальнейшего использования классических понятий и соотношений существенное значение имела работа Неймана «Математические основы квантовой механики» [20]. Нейман ввел в квантовую механику классическую конструкцию, созданную Гиббсом. Гиббс в свое время рассматривал пространство фаз — евклидово пространство с декартовой системой координат, которыми служат импульсы и пространственные координаты системы. Число измерений такого пространства соответственно вдвое больше числа степеней свободы системы, и каждое состояние системы, каждый набор координат и импульсов соответствуют точке в этом пространстве. Гиббс пользовался такой конструкцией, чтобы представить закономерности классической статистики. Он представил вероятности пребывания системы в том или ином состоянии в виде плотности «жидкости», заполняющей пространство фаз. Нейман ввел эту конструкцию в квантовую механику.

В 1926—1927 гг. в работах Иордана [21] и Дирака [22] была выдвинута теория преобразований — чрезвычайно эффективный и изящный математический аппарат квантовой механики. Его интерпретация, данная Гейзенбергом и Бором, была завершающим звеном в той цепи крупных теоретических обобщений, которые в 1927 г. привели к построению основ нерелятивистской квантовой механики, оставив двум следующим десятилетиям разнообразное и эффективное применение основных принципов к конкретным задачам атомной физики. Теория преобразований Иордана и Дирака и ее последующая интерпретация, связанная с принципом неопределенности, были основой появлявшихся с тридцатых годов систематических изложений квантовой механики. Примером такого систематического изложения, основанного на указанной теории преобразований, принципе неопределенности и вероятностной интерпретации волновой

[20] Matematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin, 1932.
[21] Z. f. Phys., 40, 1926, S. 809; 41, 1927, S. I.
[22] Proc. Roy. Soc., A 113, 1926, p. 621.

функции, является книга Дирака «Основы квантовой механики» [23], написанная в 1929—1930 гг.

Рациональный смысл идеи, положенной Дираком в основу квантовой механики, состоит в независимости квантовых состояний от методов наблюдения и измерения, приводящих либо к точному определению положения частиц в пространстве, либо к точному определению их импульсов. Нетрудно увидеть характерную аналогию. Основным принципом теории относительности Эйнштейна было инвариантное, независимое от выбора координатных систем представление макроскопических процессов; в теории квант, как это показал Дирак, основной также является идея инвариантности состояний в отношении преобразований. Преобразования здесь, однако, означают переход не от координатной системы к другой, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно (специальная теория относительности), либо с ускорением (общая теория относительности), а переход от одного классического вопроса, заданного природе, например, вопроса о точном значении координат, к другому классическому вопросу — о точном значении соответствующих составляющих импульса.

Нужно подчеркнуть, что такая идея скрывалась в теории преобразований, но именно *скрывалась*: и Иордан, и Дирак были склонны связать изложение квантовой механики в виде теории преобразований и инвариантов с субъективистской трактовкой понятия состояния. Дирак противопоставляет метод непосредственного оперирования инвариантами методу координат. Координатный метод приводит либо к построению физики микромира в виде волновой механики, когда на первый план выдвигаются состояния системы, либо в виде матричной механики, оперирующей в основном динамическими переменными. Обоим этим методам, методу Шредингера и методу Гейзенберга, Дирак противопоставляет свою теорию преобразований, инвариантами которых служат квантовые механические соотношения.

В изложении Дирака основным принципом квантовой механики является принцип суперпозиции, гласящий, что каждое промежуточное состояние квантовой системы представляет собой суперпозицию двух стационарных состояний. Из принципа суперпозиции и вытекает векторное представление состояний. Дирак подчеркивает глубокую аналогию между суперпозицией и сложением векторов. В случае трех состояний ψ_a, ψ_b и ψ_c с симметричной суперпозицией, т. е. при возможности получить состояние ψ_a суперпозицией ψ_b и ψ_c, состояния ψ_b

[23] The Principles of Quantum Mecanics. London, 1930; см. перевод: Дирак П. А. М. Основы квантовой механики, изд. 2. Л.—М. ОНТИ, 1937.

суперпозицией ψ_a и ψ_c, состояние ψ_c суперпозицией ψ_a и ψ_b; можно представить суперпозицию уравнением:

$$x_a\psi_a + x_b\psi_b + x_c\psi_c = 0.$$

Если коэффициенты x_i не все равны нулю, то это уравнение аналогично уравнению, связывающему зависимые векторы. Поэтому суперпонирующие состояния можно представить в виде зависимых векторов. Тогда максимальному числу *независимых* состояний соответствует число измерений векторного пространства.

Нужно подчеркнуть, что в векторном представлении квантовых состояний вскрывается характерное различие между классической и квантовой суперпозицией. Умножение вектора на число $k \neq 0$ дает новый вектор, что соответствует классической суперпозиции, когда однократное или многократное наложение состояния самого на себя дает новое состояние. Сложение классических волновых процессов дает новый по амплитуде волновой процесс. В квантовой механике наложение состояния на самого себя и вообще умножение на любое не равное нулю число, не изменяет состояния, не дает нового; поэтому при векторном изображении квантовых состояний множество состояний находится в однозначном соответствии со множеством направлений; состоянию соответствует лишь направление сопоставляемого вектора.

Кроме того, в квантовой механике в уравнении, выражающем симметричность суперпозиции, т. е. существование зависимых состояний

$$x_1\psi_1 + x_2\psi_2 + \ldots + x_n\psi_4 = 0,$$

коэффициенты x_1, x_2,...x_n могут быть комплексными числами.

Существенное значение для развития и изложения квантовой механики имело введенное Дираком разграничение трехмерного и четырехмерного понятий состояния. Оно соответствует важному разделению квантовой механики на две области. Ряд закономерностей определяет положение системы в данный момент. Например, все, что говорится о возможности одновременного измерения импульса и координат, относится к состоянию в трехмерном смысле. Однако квантовая механика рассматривает также закономерные изменения трехмерных состояний во времени, например, уравнение Шредингера устанавливает закон перехода от одного трехмерного состояния к другому. Такому рассмотрению системы соответствует четырехмерный смысл понятия состояния. Можно говорить и о четырехмерной суперпозиции. Если состояния в данный момент связаны суперпозицией и эта связь сохраняется в последующие

моменты времени, то это означает суперпозицию состояний в четырехмерном смысле.

Теория преобразований компонент векторов-состояний в пространстве функций рассматривает и геометрически интерпретирует понятие оператора. Преобразования компонент n-мерного вектора или, что то же самое, координат точки n-мерного пространства, изображающей состояние системы, имеют линейный характер. Каждая новая координата a'_r равна сумме $\sum_{s=1}^{n} \gamma_{rs} a_s$ координат a_s, помноженных на коэффициенты γ_{rs}, иными словами (применяя эйнштейновскую сокращенную запись суммирования):

$$a'_r = \gamma_{rs} a_s.$$

Коэффициенты γ_{rs} можно считать компонентами оператора и, таким образом, оператор, подобно вектору, характеризуется своими компонентами в каждой системе координат. Подобные допущения позволяют Дираку построить теорию инвариантов координатных преобразований векторов, изображающих состояния квантовых систем с тем, чтобы затем дать физическую интерпретацию такой теории. Интерпретация основана на уподоблении операторов динамическим переменным, или по терминологии Дирака —«наблюдаемым». В результате физического эксперимента мы можем получить лишь вещественные числа: вещественная функция динамической переменной и является по Дираку «наблюдаемой». Измерения «наблюдаемой» изменяют состояние системы или, пользуясь векторным представлением, изменяют соотношение между компонентами вектора. Однако в частном случае собственного состояния системы измерение «наблюдаемой» не меняет состояния системы и соответствует в векторном представлении умножению всех координат вектора на один и тот же коэффициент. Таким образом, Дирак интерпретирует известное соотношение между оператором и его собственными значениями. Когда система находится в собственном состоянии, символическое умножение вектора на оператор равнозначно несимволическому умножению вектора на собственное значение оператора. Физически это означает, что измерение «наблюдаемой» не меняет состояния системы.

Далее Дирак ставит вопрос о существовании собственных значений каждого оператора, иными словами, физический вопрос о возможности однозначно определяемых значений «наблюдаемой» в собственных состояниях системы. Первоначально Дирак разбирает этот вопрос в предположении о конечном числе независимых состояний системы и соответственно для

n-мерного векторного пространства. Для этого случая доказывается теорема о разложении любого вектора ψ по собственным векторам. Далее теорема обобщается для более общего случая бесконечного числа собственных состояний системы. Когда собственным значением оператора являются все числа от p до q, разложение любого состояния, изображаемого вектором ψ, на собственные состояния ψ_a принимает вид интеграла

$$\psi = \int_p^q \psi_a \, da,$$

где a — собственное значение оператора.

Затем Дирак переходит к несобственным значениям операторов, рассматривая этот случай как более общий. Уравнение

$$\hat{\alpha}\psi = a\psi$$

имеет физический смысл даже тогда, когда a не обозначает собственного значения оператора α. В этом более общем случае a означает среднее значение «наблюдаемой» α. Из более общего тезиса, сопоставляющего все значения операторов средним значениям «наблюдаемой», можно вывести — и Дирак это делает,— частный тезис о *собственных* значениях операторов как определенных значениях «наблюдаемой». Соответственно, «состояние неопределенности» является общим случаем, а «состояние определенности» — частным.

Важным элементом теории преобразований Дирака является введенная им символика координатных представлений векторов, изображающих квантовые состояния. Вводя в n-мерном векторном пространстве различные системы, отличающиеся фундаментальными, ортогональными друг другу, единичными векторами, можно каждый вектор разложить по фундаментальным векторам, и тогда коэффициентами разложения будут координаты вектора. Обозначая фундаментальный вектор через ψ_r, где $r = 1, 2\ldots$, Дирак вводит особый символ для коэффициентов разложения — координат вектора в системе фундаментальных векторов ψ_r. Это известное дираковское скобочное изображение $(r|)$ и, в случае определенного вектора, ψ_x — $(r|x)$. При его применении разложение вектора в ряд единичных фундаментальных векторов, помноженных на коэффициенты разложения — координаты, приобретает вид:

$$\psi_x = \sum_{r=1}^{n} \psi_r \, (r|x).$$

Различные системы координат в векторном пространстве Дирак называет «представлениями», а координаты —«представи-

телями». Поскольку линейный оператор ξ имеет своими компонентами коэффициенты линейного преобразования ξ_{rs}, можно выразить и самый оператор через «представителя» и соответственно говорить о различных «представлениях» динамических переменных.

«Представитель»— координата $(\xi|)$ является функцией переменной ξ. Однако в случае непрерывного спектра собственных значений оператора требуется некоторое расширение понятия функции. В этом случае Дирак встретился с математическими затруднениями, из которых он вышел, введя представление о *несобственной функции*. Речь идет об известной δ-функции. Представим себе, что переменная, от которой «зависит» несобственная функция, это расстояние по оси x от начала координат. Несобственная функция равна нулю (именно поэтому слово «зависит» поставлено в кавычки) повсюду, кроме начала координат. Если взять некоторый отрезок ε, включающий начало координат, и ряд функций, равных нулю вне этого интервала ε, причем интеграл каждой функции, распространенной по ε, равен единице, то, последовательно стягивая ε к началу координат, мы получим в пределе $\varepsilon \to 0$ несобственную функцию, определяемую тем, что ее интеграл равен единице, а сама она равна нулю повсюду, кроме начала координат. Дирак нашел правила алгебраических действий, включающих δ-функцию. Указанное понятие, давшее толчок важнейшим математическим работам, относящимся к теории функций, позволило Дираку распространить понятие «представлений» на случаи непрерывного ряда значений оператора.

Выдвинутое Гейзенбергом в его матричной механике обоснование перестановочных соотношений получило в теории Дирака некоторую новую форму. Дирак считает, что коммутативность динамических переменных в классической физике должна быть представлена как частный случай более общего принципа некоммутативности. Соответственно, уравнения, выражающие некоммутативность — перестановочные соотношения, могут быть получены обобщением классических уравнений, выражающих коммутативность переменных. В классической физике пользуются скобками Пуассона $[\xi,\eta]$, где ξ и η — функции канонически сопряженных координат q_r и составляющих импульса p_r. Дифференцируя ξ по q_r, а η — по p_r и перемножая частные производные, затем дифференцируя ξ по p_r и η по q_r и также перемножая производные, вычитая второе произведение из первого и суммируя полученные для каждой оси r разности, мы приходим к выражению — скобкам Пуассона для ξ и η:

$$[\xi, \eta] = \sum_r \left\{ \frac{\partial \xi}{\partial q_r} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial p_r} - \frac{\partial \xi}{\partial p_r} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial q_r} \right\}.$$

Это выражение инвариантно при переходе к иной системе канонических координат и импульсов. Отсюда значение скобок Пуассона в классической механике.

Пуассон ввел ряд алгебраических правил для действий со скобками, вытекающих из их дифференциальной формы и не связанных с каким-либо физическим представлением. Правила эти выражаются уравнениями, в которых фигурируют произведения $\xi_1\,\xi_2$ и $\eta_1\,\eta_2$. Дирак предположил, что в общем случае эти правила соблюдаются, если порядок множителей в произведениях $\xi_1\,\xi_2$ и $\eta_1\,\eta_2$ не меняется. Тогда получаются обобщенные, квантовые скобки Пуассона, выражающие общую некоммутативность физических величин. Эти квантовые скобки Пуассона характеризуются тем, что изменение порядка сомножителей образует между произведениями ненулевую разность, равную в каждом случае скобке Пуассона, помноженной на некоторый числовой коэффициент. Такие чисто алгебраические соображения получают физический смысл при допущении, что числовой коэффициент равен $\frac{in}{2\pi}$

$$\xi\eta - \eta\xi = \frac{ih}{2\pi}\,[\xi, \eta]\,.$$

Таким образом, получаются перестановочные соотношения Гейзенберга.

Все это рассуждение в целом отчетливо показывает характерное соотношение между квантовой и классической механикой: классическая механика коммутирующих переменных представляет собой предельный случай квантовой механики, вообще говоря, некоммутирующих переменных, когда постоянная Планка стремится к нулю. Отсюда видно, что классическая механика является законным приближением во всех случаях, когда можно пренебречь конечными размерами кванта действия.

Теория «представлений» позволяет получить шредингеровское уравнение. Дирак пользуется при этом понятием трехмерных и четырехмерных состояний. Суперпозиция четырехмерного состояния, как уже говорилось выше, означает сохранение суперпозиции трехмерных состояний. Четырехмерные состояния выражаются в законах изменения трехмерного состояния. Если такое изменение непрерывно, то можно изобразить дифференциальным линейным оператором $\hat{H}$ изменение трехмерного состояния во времени. Дирак показывает, что оператором перехода от одного трехмерного состояния к другому при условии сохранения суперпозиции трехмерного состояния может быть лишь линейный самосопряженный оператор, совпадающий с оператором, представляющим гамильтоновскую функцию. Из такого предположения может быть выведено урав-

нение Шредингера. Производная по времени, фигурирующая в уравнении Шредингера, означает, что состояние с течением времени изменяется или, если пользоваться векторным представлением, вектор меняет свое направление в векторном пространстве. Можно, однако, представить себе, что вектор не меняет направления, но зато меняется направление координатных осей векторного пространства. Поэтому уравнение Шредингера эквивалентно другому, в котором состояние рассматривается неизменным, а меняется система координат.

Физическая интерпретация теории преобразований Иордана-Дирака содержалась в появившихся в 1927 г. работах Гейзенберга и Бора о принципе неопределенности. Как уже говорилось, Гейзенберг попытался построить квантовую механику на основе принципа неопределенности. Первоначально принцип неопределенности вытекал непосредственно из перестановочных соотношений и казался формальным выводом из применения некоммутативной алгебры матриц. Впоследствии, когда квантовая механика получила более общее математическое выражение в виде теории операторов, идея неопределенности выводилась из невозможности точного измерения динамических переменных, выраженных некоммутирующими операторами.

Как было показано в работах Иордана, Дирака и Гейзенберга, неопредленность может быть выведена из теории преобразований. Можно взять два дираковских «представления», соответствующие двум системам коммутирующих внутри каждой системы переменных: q-представление» и «p-представление». Если q-(x, y, z) — координаты, а p — составляющие импульса, то из теории преобразований вытекают соотношения неточностей Δx и Δp определения координат и импульсов:

$$\Delta x \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi},$$

$$\Delta y \Delta p_y \geqslant \frac{h}{4\pi},$$

$$\Delta z \Delta p_z \geqslant \frac{h}{4\pi}.$$

Смысл этих неравенств, согласно Гейзенбергу, состоит в том, что при увеличении точности измерений импульса соответственно уменьшается точность измерений координаты, и наоборот. Аналогичным образом были выведены соотношения неточности для второй пары некоммутирующих динамических переменных. Гейзенберг и вслед за ним Бор показали невозможность одновременного бесконечно точного измерения времени

и энергии. Соотношение неточности для этих переменных имеет

$$\Delta (E' - E)\, \Delta t \geqslant \frac{h}{2\pi},$$

где первый множитель представляет собой неопределенность в измерении приращения энергии, а второй — неопределенность момента, в который происходило измерение энергии — минимальный промежуток времени. Более общую трактовку соотношения неопределенности между энергией и временем дали впоследствии Л. И. Мандельштам и И. Е. Тамм[24].

В 1927 г., ознакомившись еще в рукописи с работой Гейзенберга о принципе неопределенности, Бор выступил с попыткой вывести этот принцип из более общего принципа. Основную мысль Бора Гейзенберг сообщил в дополнении при корректуре статьи. Развернутое изложение этой идеи содержится в статье Бора, опубликованной в 1928 г.[25] Бор считает неопределенность выражением *принципа дополнительности*, согласно которому в одном и том же эксперименте могут быть обнаружены либо волновые, либо корпускулярные свойства материи, но не могут быть обнаружены и те, и другие свойства одновременно. При помощи ряда мысленных экспериментов Бор стремился показать, что в каждом эксперименте заранее фиксируются элементы экспериментального устройства, связанные с определением лишь одной из сопряженных переменных. Поэтому волновые и корпускулярные свойства представляются не противоречащими друг другу, а дополняющими друг друга. Таким образом, Бор выводит физические закономерности из возможностей экспериментальных исследований. Этот операционалистский подход крайне характерен для принципа дополнительности в той форме, в которой его высказал Бор.

В обосновании принципа дополнительности метафизическая тенденция, стремление рассматривать принцип дополнительности как априорный общий принцип познания сплетается с некоторыми рациональными выводами из основных соотношений, установленных Планком, Эйнштейном, де Бройлем. В действительности в каждом акте измерения не создаются, а выявляются основные черты квантово-механических систем и объективные противоречия между корпускулярными свойствами частиц и их волновыми свойствами. Соотношения между теми и другими даны Планком:

$$E = h\nu,$$

---

[24] Изв. АН СССР, сер. физич., 9, № 1—2, 1945, стр. 122.
[25] Naturwissensch., 16, 1928, S. 245.

а также Эйнштейном и де Бройлем

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k},$$

где E — энергия, $\mathbf{p}$ — импульс, ν — частота и $\mathbf{k}$ — волновой вектор. Частицы локализованы в пространстве и времени, но их энергия и импульс выражаются через волну. Если попытаться локализовать волновой процесс в пространстве и времени, неизбежны некоторые ограничения. В свое время их в особенно четкой форме сформулировал Л. И. Мандельштам[26]: понятие частоты колебаний не может быть строго применено к волновому процессу, взятому в промежутке времени меньшем, чем период колебаний. Локализуя волновой процесс во времени и пространстве, мы неизбежно должны изменять его характер и соответственно отказаться от неограниченной точности определения энергии и импульса.

Рациональное, собственно физическое представление о дополнительности экспериментов, фиксирующих координаты и время, и экспериментов, фиксирующих импульс и энергию, позволяет физически интерпретировать «представления» Дирака. Одни приборы сортируют частицы, входящие в физическое множество по их координатам, другие — по импульсу. Таким образом, они разбиваются на группы, которым соответствуют «q-представление» и «p-представление». Однако здесь нет ничего нового по сравнению с обычными иллюстрациями принципа неопределенности. Тем не менее Бор — в этом выражается метафизическое понимание дополнительности — считает дополнительность общим априорным принципом, применяемым к любой области знания. Бор писал, что «гносеологический урок, полученный из нового развития физики, где проблемы допускают сравнительно краткую характеристику принципов, может подсказать в других областях знаний...»[27].

Бор, как и вся копенгагенская школа, представляет дополнительность незыблемым принципом познания. Из подобной трактовки дополнительности вытекает скептическое отношение к возможности дальнейшего коренного изменения оснований квантовой механики. В своих конкретных физических исследованиях копенгагенская школа подготовляет такие коренные изменения. Однако ее философские установки задерживают развитие физики в этом направлении и находятся в противоречии с конкретными позитивными достижениями Бора, Гейзенберга и других.

После работ Гейзенберга и Бора о неопределенности и допол-

---

[26] Л. И. Мандельштам. Полн. собр. трудов, т. V, Изд-во АН СССР, 1950, стр. 358—359.

[27] Dialectica, 7—8, 1948, p. 317—318.

нительности началась оживленная дискуссия об основных принципах квантовой механики и их философском смысле. Такая дискуссия происходила, в частности, на Сольвеевском конгрессе физиков в 1927 г. Здесь впервые Бор, Гейзенберг, Шредингер, Борн, Паули и Дирак выступили с концепцией беспричинности элементарных процессов, здесь впервые прозвучало слово «индетерминизм» применительно к квантовой механике.

Индетерминистская концепция встретила резкую критику со стороны Лоренца, Ланжевена, Эйнштейна и некоторых других теоретиков. Де Бройль также в этот период стоял на позициях детерминизма. Особенно следует отметить выступления Ланжевена. «Если природа, — говорил Ланжевен,— не дает точного ответа на поставленный ей вопрос об электроне, уподобляемом частице классической механики, то слишком претенциозно с нашей стороны заключить отсюда: детерминизм не существует в природе. Будет более правильно сказать: вопрос плохо поставлен, электрон не уподобляем частице классической механики»[28]. Эта мысль об объективном отличии электрона от классической частицы приобретала последовательно все более конкретный вид и доказывалась всем развитием физики вплоть до наших дней. Ланжевен отнюдь не стремился восстановить классический детерминизм, включающий одновременное и точное определение координат и составляющих импульса. Он не придавал неопределенности субъективного смысла, не считал ее простым результатом незнания скрытых динамических закономерностей. Ланжевен расширял понятие детерминизма, обогащал его новыми идеями и таким образом приходил к принципиальной возможности детерминистского истолкования квантовой механики.

С несколько иных позиций критиковал индетерминизм в своих выступлениях Эйнштейн. Он приводил очень остроумные примеры, которые должны были доказать неудовлетворительность вероятностной интерпретации квантовой механики, и, таким образом, направлял удар не только против философских, индетерминистских выводов копенгагенской школы, но и против тех физических идей, на которых паразитировал индетерминизм. В своем выступлении на Сольвеевском конгрессе Эйнштейн рисовал следующую схему. Частица проходит через отверстие в плоском экране, причем сопоставленные движению частицы, монохроматические волны расходятся за экраном и попадают на полусферический регистрирующий экран. Частица, попав на одну из точек этого полусферического экрана,

[28] П. Ланжевен. Избранные произведения. ИЛ, 1949, стр. 396—397.

вызывает сцинтилляцию или, если экран покрыт фотопленкой, потемнение пленки в этой точке. В других точках потемнение пленки не произойдет. Значит, сцинтилляция либо потемнение пленки автоматически уменьшают до нуля, т. е. уничтожают вероятность попадания частиц в другие точки. До попадания частицы, до регистрации ее в той или иной точке светящегося полусферического экрана вероятность в других точках не была равна нулю. Ее уничтожению не соответствует какой-либо реальный процесс, мы просто не знали действительной, вполне определенной траектории частицы. Только такая концепция, сводящая неопределенность к простому незнанию детерминирующих факторов, совместима, по мнению Эйнштейна, с пространственно-временной трактовкой микропроцессов. Таким образом, концепция Эйнштейна восстанавливала не вообще детерминизм, а классический детерминизм.

Отвечая Эйнштейну, Бор показывал, что пример, приведенный его оппонентом, не противоречит вероятностной трактовке квантовой механики. Рациональный смысл аргументации Бора терялся при этом в большом числе операционалистских рассуждений.

Следует подчеркнуть, что в сущности и Бор и Эйнштейн в дискуссии 1927 г. отказывали статистическим закономерностям в объективном характере и отождествляли динамические закономерности с объективными закономерностями вообще, классический детерминизм с детерминизмом вообще, рассматривая случайность как меру незнания, как чисто субъективную категорию. Исходя из этой концепции и принимая статистическую интерпретацию квантовой механики, Бор считал ее доказательством индетерминизма микропроцессов. Эйнштейн, также стоявший на позициях субъективного понимания вероятности, защищал детерминизм ценой отказа от статистической интерпретации. Вопрос об объективном характере статистических закономерностей давно решен философией марксизма и только игнорирование и незнание марксистской философии может объяснить идейные злоключения теоретиков, участвовавших в дискуссии 1927 г. и в последующих дискуссиях.

Индетерминизм, начиная с 1927 г., стал официальной платформой копенгагенской школы. Он подвергался более или менее систематической критике в работах советских ученых и примыкавших к ним по исходным идейным позициям передовых мыслителей Запада.

Следует заметить, что критика индетерминизма связана не только с рациональной интерпретацией принципов квантовой механики, сформулированных в 1925—1927 гг., но и с дальнейшим обобщением этих принципов. Такое обобщение последовательно демонстрировало строго каузальный характер

теории микромира и вместе с тем широкий, в общем случае неклассический смысл детерминизма, соответствующий марксисткому пониманию причинности.

Если нерелятивистская квантовая механика является во многих отношениях завершенной и во всяком случае цельной теорией, то в ином положении находятся релятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика. Эти теории, созданные в 1927—1928 гг., и выросшая позже общая теория квантованных полей, будут рассмотрены в следующем очерке, посвященном основным принципам физики элементарных частиц. Здесь мы коснемся только первых обобщений, положивших начало релятивистской квантовой механике.

Среди этих обобщений существенная роль принадлежит работам советских теоретиков. Выдвинув ряд концепций, в которых идеи нерелятивистской квантовой механики были применены к конкретным проблемам теории ядра, строения атомов, магнетизма, теории металлов и т. д., советские физики вместе с тем стремились к обобщению указанных идей.

Обобщение состояло в синтезе квантовой механики с теорией относительности. Оно включало новую трактовку проблемы неопределенности динамических переменных, связанную с учетом релятивистских эффектов (работы Л. Д. Ландау и Р. Е. Пайерлса и последующие исследования), и ряд других фундаментальных концепций. Исходным пунктом новых принципов квантовой механики было релятивистское обобщение волнового уравнения Шредингера. Последнее не обладает ковариантностью в отношении преобразований Лоренца. В этих преобразованиях существенная линейная связь пространства и времени:

$$x' = \gamma (x + vt),$$

$$t' = \gamma t + \frac{\gamma}{c^2} vx,$$

где

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Поэтому в случае преобразований Лоренца уравнение Шредингера перестает быть справедливым. В это уравнение входят первые производные по времени и вторые производные по пространственным координатам:

$$-\frac{h}{2\pi i} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}\right) + U\psi.$$

При линейном преобразовании времени и пространства части этого уравнения изменяются неодинаковым образом.

Еще в 1926 г. О. Клейн [29], В. А. Фок [30], В. Гордон [31] и др. получили волновое уравнение, в котором время и пространство равноправны. Если взять релятивистское соотношение между энергией E и импульсом $\mathbf{p}$

$$E^2 = c^2\mathbf{p}^2 + m_0{}^2 c^4,$$

то волновое уравнение может приобрести лоренц-ковариантную форму:

$$\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} - \frac{4\pi^2 m_0{}^2 e^2}{h^2} + U\psi.$$

Это — так называемое скалярное волновое уравнение Клейна—Гордона. Как выяснилось вскоре, оно описывает движение частиц, лишенных спина. Для электрона оно непригодно. Релятивистское уравнение для электрона нашел Дирак [32]. При этом Дирак получил уравнение первого порядка, которое раскрывает закономерности, ускользающие при описании движения электрона уравнением второго порядка.

Ход мысли Дирака был примерно следующим.

В написанном выше релятивистском волновом уравнении (в несколько измененном виде)

$$\frac{1}{c^2}\left(\frac{h}{2\pi i}\right)^2\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = \left(\frac{h}{2\pi i}\right)^2\cdot\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) + \mu_0{}^2 c^2\psi$$

фигурируют четыре оператора

$$\hat{p}_1 = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x};\quad \hat{p}_2 = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial y};\quad \hat{p}_3 = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial z};\quad \hat{p}_4 = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial t},$$

позволяющие записать релятивистское волновое уравнение в виде

$$\hat{p}_4{}^2\psi = (\hat{p}_1{}^2 + \hat{p}_2{}^2 + \hat{p}_3{}^2 + \mu_0{}^2 c^2)\psi,$$

или

$$(\hat{p}_4{}^2 - \hat{p}_1{}^2 - \hat{p}_2{}^2 - \hat{p}_3{}^2 - \mu_0{}^2 c^2)\psi = 0.$$

Дирак ищет уравнение, эквивалентное только что написанному, но линейное по отношению к $\hat{p}_1$, $\hat{p}_2$, $\hat{p}_3$, $\hat{p}_4$. Стоящий в

---

[29] O Klein. Z. f. Phys., 37, 1926, 895.
[30] В. А. Фок. Z. f. Phys., 39, 1926, 222.
[31] W. Gordon. Z. f. Phys., 40, 1926, 117.
[32] P. Dirac. Proc. Roy. Soc. A 117, 1928, p. 610; A 118, 1928, p. 341.

скобках действующий на ψ оператор он заменяет произведением двух операторов, не содержащих квадратов $\hat{p}_1$, $\hat{p}_2$, $\hat{p}_3$, $\hat{p}_4$, линейных по отношению к ним. Для этого вводятся вспомогательные операторы $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$, $\hat{\alpha}_3$, $\hat{\alpha}_4$. Виртуозно простым преобразованием, напоминающим элементарное разложение $a^2 + b^2 = (a + bi)(a - bi)$, Дирак получает искомое произведение

$$\hat{p}_4^2 - \hat{p}_1^2 - \hat{p}_2^2 - \hat{p}_3^2 - \mu_0^2 c^2 = (\hat{p}_4 + \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 + \\ + \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 + \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 + \hat{\alpha}_4 \mu_0 c)\ (\hat{p}_4 - \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 - \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 - \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 - \hat{\alpha}_4 \mu_0 c).$$

Умножению предшествует анализ проблемы коммутативности при перемножении операторов $\hat{p}_i$ и $\hat{\alpha}_i$. Оказывается, умножение этих операторов можно произвести по правилам обычной коммутативной алгебры. Получается уравнение:

$$(\hat{p}_4 + \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 + \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 + \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 + \hat{\alpha}_4 \mu_0 c)\ (\hat{p}_4 - \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 - \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 - \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 - \\ - \hat{\alpha}_4 \mu_0 c) = \hat{p}_4^2 - \hat{\alpha}_1^2 \hat{p}_1^2 - \hat{\alpha}_2^2 \hat{p}_2^2 - \hat{\alpha}_3^2 \hat{p}_3^2 - \hat{\alpha}^2{}_4 \mu_0^2 c^2 - \\ - (\hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 + \hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_1) \hat{p}_1 \hat{p}_2 - \\ - (\hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_3 + \hat{\alpha}_3 \hat{\alpha}_1) \hat{p}_1 \hat{p}_3 - \\ - (\hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_4 + \hat{\alpha}_4 \hat{\alpha}_1) \hat{p}_1 \mu_0 c - \\ - (\hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_3 + \hat{\alpha}_3 \hat{\alpha}_2) \hat{p}_2 \hat{p}_3 - \\ - (\hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_4 + \hat{\alpha}_4 \hat{\alpha}_2) \hat{p}_2 \mu_0 c - \\ - (\hat{\alpha}_3 \hat{\alpha}_4 + \hat{\alpha}_4 \hat{\alpha}_3) \hat{p}_3 \mu_0 c\ .$$

Правая и левая части этого уравнения тождественны, если квадраты операторов $\hat{\alpha}_i$ равны единице:

$$\hat{\alpha}_1^2 = \hat{\alpha}_2^2 = \hat{\alpha}_3^2 = \hat{\alpha}_4^2 = 1,$$

т. е.

$$\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_i = 1.$$

При сравнении обеих частей уравнения видно также, что оно превращается в тождество лишь при условии, что

$$\hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 + \hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_1 = 0,$$
$$\hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_3 + \hat{\alpha}_3 \hat{\alpha}_2 = 0,$$
$$\hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_3 + \hat{\alpha}_3 \hat{\alpha}_1 = 0,$$

или вообще

$$\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_j + \hat{\alpha}_j \hat{\alpha}_i = 0,$$

и, следовательно, между операторами $\hat{\alpha}_i$ существует отношение антикоммутативности, т. е. при перемене порядка умножения произведение меняет знак:

$$\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_j = -\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_j .$$

После этого можно вернуться к релятивистскому волновому уравнению второго порядка, выраженному через операторы $\hat{p}_i$

$$(\hat{p}_4^2 - \hat{p}_1^2 - \hat{p}_2^2 + \hat{p}_3^2 - \mu_0^2 c^2)\,\psi = 0,$$

и представить его левую часть в виде произведения двух линейных операторов

$$(\hat{p}_4 + \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 + \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 + \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 + \hat{\alpha}_4 \mu_0 c)\,(\hat{p}_4 - \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 - \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 - \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 - \hat{\alpha}_4 \mu_0 c)\,\psi = 0.$$

Это уравнение станет тождеством, если первый из операторов, заключенных в скобках и входящих в произведение, обращает ψ в нуль. Второй оператор отличается от первого только знаком $\hat{\alpha}_i$. Поэтому мы можем написать простое уравнение первого порядка, эквивалентное релятивистскому уравнению второго порядка, приравняв нулю результат действия первого из перемноженных операторов на функцию ψ:

$$(\hat{p}_4 - \hat{\alpha}_1 \hat{p}_1 - \hat{\alpha}_2 \hat{p}_2 - \hat{\alpha}_3 \hat{p}_3 - \hat{\alpha}_4 \mu_0 c) = 0.$$

Заменив сокращенные обозначения $\hat{p}_i$ написанными выше выражениями, можно прийти к релятивистскому уравнению первого порядка — уравнению Дирака:

$$-\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{h}{2\pi i}\left(\hat{\alpha}_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + \hat{\alpha}_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} + \hat{\alpha}_3 \frac{\partial \psi}{\partial z}\right) + \hat{\alpha}_4 m_0 c^2 \psi.$$

Его можно заменить четырьмя уравнениями, где в каждом имеется особая волновая функция ψ. Такое разделение ψ на четыре функции ψ_1, ψ_2, ψ_3 и ψ_4 позволяет сделать важные собственно физические выводы. Во-первых, каждое состояние электрона разделяется на два различных состояния. Этим можно хотя бы формально объяснить два состояния, соответствующие одним и тем же значениям x, y, z и t и различающиеся значением спина. Далее, каждое из двух состояний в свою очередь делится на два состояния. Это можно объяснить

двумя знаками энергии. В релятивистском случае энергия связана с импульсом соотношением

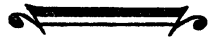
$$E^2 = c^2 \mathbf{p}^2 + \mu_0{}^2 c^4 .$$

Чтобы определить E, нужно извлечь корень из этого выражения. Поэтому E будет иметь два знака:

$$E = \pm \sqrt{E^2} .$$

Следовательно, каждому из двух состояний, различающихся значением спина, соответствуют два состояния: с положительной и отрицательной энергией. Этот вывод представил для физики существенное затруднение, но вместе с тем поиски физического эквивалента состояний с отрицательной энергией привели к таким важным выводам, как теория позитрона, и к концепциям, лежащим в основе современной теории элементарных частиц.

Нужно сказать, что общая теория элементарных частиц приводит физику к необходимости обобщения релятивистской квантовой теории. Эта теория представляет собой решение частных задач. Ее обобщение, быть может, совпадает с радикальным пересмотром физических принципов, которые последовательно развивались в классической, релятивистской и квантовой физике. Таким образом, релятивистская квантовая механика в той форме, какую она получила в 1927 г., окажется не только завершением рассмотренной в этой книге эволюции физических идей, но и началом новой эпохи в развитии физической картины мира.



Д. Д. Иваненко

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Вопросы физики элементарных частиц — электронов, протонов, нейтронов, мезонов, гиперонов и других — относятся к числу самых актуальных проблем физической науки. Вне всякого сомнения, именно здесь проходит сегодня передовая линия фронта физики, главнейшей целью которой всегда являлось исследование наиболее простых фундаментальных частиц материи и выяснение законов их движения и взаимодействия вместе с исследованием свойств пространства и времени. Хотя изучение атомных ядер, имеющее, как известно, огромные технические применения, начиная с 30-х годов, по-прежнему стоит в центре внимания науки и техники, но по причинам, которые будут указаны ниже, коренные вопросы строения вещества решаются ныне уже в области физики элементарных частиц, а не ядерной физики в собственном смысле. Точно так же принципиальные вопросы релятивистской квантовой теории, иначе говоря теории поля, все больше и больше связываются с изучением новых элементарных частиц: мезонов, гиперонов и т. д., поскольку квантовая механика и квантовая электродинамика, установленные первоначально для электронов и электромагнитного поля, в известной мере исчерпали свои возможности.

Последние, наиболее существенные, действительно принципиальные успехи релятивистской квантовой электродинамики, т. е. теории электронов, позитронов и фотонов, взаимодействующих друг с другом, были связаны с объяснением так называемого лэмбовского сдвига и дополнительного магнитного момента электрона при помощи теории вакуума в 1947—1948 гг. В дальнейшем, несмотря на разработку многих новых изящных мето-

дов, существенно новых физических результатов в этой области получено не было.

Бесспорная первостепенная актуальность проблем элементарных частиц связана прежде всего с тем обстоятельством, что здесь мы находим ответ на один из самых важных вопросов, всегда стоящих перед физикой и связанных с установлением строения вещества. Элементарные частицы являются простейшими, основными частями всего известного вещества. Вопрос о строении самих элементарных частиц в настоящее время также рассматривается физиками, но во всяком случае эти частицы не являются просто системами, составленными из каких-либо других известных частиц, сохраняющих свою индивидуальность, типа атомов, составленных из реальных электронов и ядер, или самих ядер, составленных из реальных протонов и нейтронов.

Если все известное вещество состоит, в конце концов, из элементарных частиц, то, естественно, возникает вопрос о сведении довольно большого числа частиц к одному или немногим их типам. Некоторые попытки в направлении осуществления подобной программы, «единой теории» середины XX в. будут указаны позднее.

После этих предварительных замечаний целесообразно перейти к основным историческим этапам исследования вещества и открытия элементарных частиц. Не уклоняясь далеко в глубь веков, напомним, что первая научная в современном смысле слова картина мира была создана в XVII—XVIII вв. на базе классической механики, связанной прежде всего с именами Галилея, Декарта, Гюйгенса, Ньютона, Эйлера, Лагранжа, Лапласа. Применимость ньютоновской классической механики к движению всевозможных известных в то время тел в земных и астрономических условиях породила ошибочное представление, что вообще все явления природы можно объяснить подобным образом. В дальнейшем, однако, выяснилось, что электрические и магнитные явления не подчиняются законам классической механики Ньютона, но описываются более сложными уравнениями Максвелла. Обнаружение в XIX в. нового вида вещества — электромагнитного поля, лишенного массы покоя, отличного от всех макроскопических известных тел, обладающих массами покоя, наиболее наглядно продемонстрировало ограниченность классической механики.

Огромные успехи электродинамики, построение электромагнитной теории света, синтез электрических, магнитных и световых явлений и необозримый поток технических приложений электротехники, — все это не могло не привести в конце XIX в. к выдвижению программы построения единой электромагнитной картины мира, иначе говоря, сведения всех явлений к электромагнитным и к взаимодействию электромагнит-

ного поля с зарядами. На этом пути были достигнуты весьма большие успехи.

Триумфальное шествие электромагнетизма после открытия электронов в 1897 г. и выяснения их фундаментальной роли в строении вещества привели в конце концов к смелой гипотезе, что даже сами носители электрических зарядов могут быть сведены к каким-то сгусткам электромагнитного поля. Так возникла идея электромагнитной полевой природы электронов (Дж. Дж. Томсон, Ми и др.). Поскольку специальная теория относительности по историческим причинам была подготовлена и установлена именно на базе электродинамики, а не механики, одно время существовало ошибочное представление, что теория относительности приводит к выводу об электромагнитной природе массы электрона. На самом же деле известный вывод теории относительности об изменении массы со скоростью относится к любой массе, в том числе и незаряженной (например, массе нейтрона), и сам по себе отнюдь не доказывает электромагнитной природы массы.

Гипотеза электромагнитной природы массы электрона оказалась весьма интересной и острой и до последних дней оживленным образом обсуждается в науке. Мы вернемся позднее к этому вопросу, но отметим сразу, что он еще далеко не разрешен.

Электромагнитное поле как вещество, лишенное массы покоя, в противоположность обычным телам не сконцентрировано в том или ином малом объеме, который часто можно приближенно принимать за точку, но, вообще говоря, распределено в пространстве. Уже по этой причине для его описания требуется отойти от обычной механики точки. Вместе с тем, как выяснилось позднее, в начале XX в., даже для частиц, обладающих массой покоя, обычная механика Ньютона (которую стали называть классической) также не является универсальным средством описания, пригодным во всех случаях. При больших скоростях, приближающихся к скорости света ($c = 299\ 786$ *км/сек*), законы классической механики оказываются непригодными, и их следует заменить законами более общей механики — релятивистской. Это имеет место, например, при точном описании движения электронов в атомах вблизи ядра, для трактовки электронов, приобретших большую скорость в ускорительных машинах или ускоренных каким-то неизвестным еще точно образом в потоке космических лучей. Релятивистскую механику следует применять аналогичным образом и для других быстрых частиц: позитронов, мезонов, протонов и т. д. Все обычные тела в технике и быту движутся с умеренными или малыми скоростями по сравнению со скоростью света, и для их описания достаточна классическая механика. Однако на другом полюсе материи

большие скопления вещества в виде планет и звезд также иногда движутся со столь большими скоростями, что для них релятивистские поправки становятся заметными.

Наряду с этим классическая механика оказалась непригодной для описания всех тех процессов, в которых величина «действия» за период при периодическом движении (или за характерный промежуток при непериодическом процессе) будет сравнима с наименьшей порцией — квантом действия $h = 6{,}6 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*. Для всех предметов техники или обыденной жизни или даже мельчайших объектов, видимых в микроскоп, ввиду их значительной, по атомным масштабам, массы, величины действия оказываются всегда очень большими. С другой стороны, при движении электронов, протонов и других элементарных частиц, а также простейших систем, составленных из них, типа атомных ядер и атомов — соответствующие выходы действия за характерные промежутки времени оказываются сравнимыми с квантом действия. Поэтому для электронов в атомах и молекулах, протонов и нейтронов в атомных ядрах и во многих случаях также для свободных электронов, протонов и других частиц необходимо применять не классическую, а квантовую механику. При этом в случае движения этих частиц с большими скоростями следует применять релятивистскую квантовую механику.

В качестве важного уточнения заметим, что релятивистская квантовая механика применяется не только при движениях с большими скоростями, но также во всех тех случаях, когда выход энергии в процессе сравним с собственной энергией частицы или системы, равной, как известно, $\mathcal{E} = mc^2$. Это всегда имеет место при так называемой аннигиляции частиц, например, при превращении электронов и позитронов в фотоны или протонов и антипротонов в π- мезоны: $e_- + e_+ \to 2\gamma$ или 3γ; $p + \bar{p} \to n\pi$.

Сторонниками построения электромагнитной картины мира, либо высказывавшими ее в наиболее отчетливом виде (Томсон, Ми), либо поддерживавшими эти идеи (Лоренц, Пуанкаре, Умов и др.) были большинство физиков конца XIX и начала XX в. Однако, подобно программе механической картины мира, попытка построения общей электромагнитной картины не удалась и не могла удасться, так как сейчас известны многие другие поля, наряду с электромагнитными, а именно, мезонное, нейтринное и другие поля, не говоря уже о поле гравитационном, которые никак не сводятся к электромагнитному.

Следующей попыткой построения единой картины мира явилась геометризованная теория поля, возникшая после успехов общей теории относительности Эйнштейна, которая связала поле тяготения с геометрической структурой пространства-времени (по недавней терминологии Дж. А. Уилера «гео-

метродинамика»). Поскольку для объяснения гравитации потребовалось перейти от евклидовой геометрии к римановой геометрии мира переменной кривизны, для добавочной интерпретации электромагнитного поля приходилось использовать обобщения самой римановой геометрии, переходя к пространству, обладающему не только кривизной, но и кручением (Картан), применять несимметричную метрику (Эйнштейн), обобщать закон параллельного переноса (Вейль, Эддингтон), вводить вспомогательную 5-ю переменную (Калуца) и т. д. Несмотря на математическую ценность и изящество многих этих работ и их некоторое значение для анализа ряда вопросов физики, буквально ни одна из них не привела к каким-либо реальным физическим результатам. Начиная с середины 20-х гг. нашего века, когда наука перешла к построению квантовой механики атома, затем теории ядра, эти попытки построения геометризованной единой теории поля были, за редкими исключениями, оставлены. Сейчас ясно, что современная объединенная картина вещества не может быть построена только на базе «классической» релятивистской квантовой теории поля, без учета всего богатства новейших данных об элементарных частицах, играющих роль «атомов» в современной картине вещества. Сейчас вопрос об окончательном объединении всех полей и частиц постепенно становится актуальным, поскольку как раз в последние годы физика элементарных частиц бурно обогащается многими новыми фактами, находится на замечательном подъеме, приближающем нас, очевидно, к новым, еще более фундаментальным достижениям, которые будут означать целый новый «атомно-квантово-релятивистский» этап в познании вещества. В этой связи выдвигаются уже гипотезы о сведении всех частиц, т. е. всего известного вещества к некоторому полю частиц полуцелого спина (де Бройль, Гейзенберг и др.); мы коснемся позднее этих попыток объединения. Нет сомнений, что проникновение в структуру элементарных частиц приведет также к каким-то новым, пока что еще неясным, техническим приложениям.

План дальнейшего изложения будет заключаться в описании свойств отдельных частиц в порядке их последовательного открытия. В заключение мы рассмотрим свойства всех частиц с общей точки зрения и остановимся на попытках построения системы частиц.

§ 1. ЭЛЕКТРОН

Основные этапы открытия электрона и его свойств хорошо известны, и нам достаточно здесь коротко напомнить о них. Ниже мы остановимся подробнее на известных теперь свойствах электрона. Существование элементарной порции электричества

было предсказано Гельмгольцем в 1881 г. на базе интерпретации законов электролиза Фарадея. Лоренц, Дж. Дж. Томсон и другие физики развивали теорию элементарных электрических зарядов и ионов в 80—90-е годы. Изучение электрического разряда в разреженных газах выдвинулось в середине 90-х гг. на первый план, и наконец, в начале 1897 г. Дж. Дж. Томсон, преемник Максвелла и Рэлея по Кэвендишевской кафедре в Кэмбридже, обнаружил электроны в потоке катодных лучей.

Это открытие и дальнейшие исследования свойств электрона и его роли в атомных процессах выдвинули лабораторию Томсона на первое место в мире в XIX в. и в начале XX в. Из его школы вышли многие выдающиеся ученые: Резерфорд, Ланжевен, Брэгг, Ричардсон, Вильсон и др. Отрицательно заряженные электроны оказались по массе гораздо меньше атомов. Масса электрона равна $m = (9{,}1083 \pm 0{,}0003)\ 10^{-28}\ г$; она в 1836,12 раза меньше массы протона (ядра самого легкого атома водорода). В ряду последовательных измерений заряда электрона важный этап был достигнут Р. Милликеном (1868—1953), получившим в 1911 г. уже весьма точный результат, $e = 4{,}774 \cdot 10^{-10}$ эл. ст. единиц, в который, после фундаментального анализа мировых констант, Р. Бэрджем в 1929 г. была внесена в основном лишь улучшенная поправка на учет вязкости воздуха[1]. Лучшее значение заряда электрона гласит $e = (4{,}80286 \pm 0{,}00009) 10^{-10}$ эл. ст. единиц.

Особая важность этого результата заключается в том, что все заряды элементарных частиц (позитрона, $\mu^{\pm}$-мезонов, $\pi^{\pm}$-мезонов, $K^{\pm}$-мезонов, протона, антипротона, заряженных гиперонов) оказались по абсолютной величине равными элементарному заряду электрона.

Никогда не были обнаружены частицы двойного, тройного и т. д. заряда, или подозревавшиеся Эренгафтом «субэлектроны» или частицы с зарядом, не равным e. Более глубокие причины существования частиц с зарядом, всегда равным e, еще неясны. Более того, до сих пор не удалось построить теорию заряда или, тем более, вывести точную его величину, сведя к другим фундаментальным мировым константам (c, h, $\varkappa$).

Для нас сейчас важно подчеркнуть, что в виде электрона была открыта не только часть любого атома, но и первая элементарная, простейшая, притом самая легкая частица. Со времени этого фундаментального открытия в течение 60 лет не было обнаружено ни частей электрона, ни каких-либо частиц с меньшей собственной массой.

---

[1] Один из последних обзоров мировых констант см. E. R. Cohen, Nuovo cimento, Suppl. vol. VI, 1957, p. 134.

В дальнейшем развитие теории электрона оказалось связанным с физикой атома. После открытия эффекта Зеемана и его интерпретации Лоренцом стало общепризнанным, что существование спектральных линий обязано движению атомных электронов.

Одной из первых атомных моделей была «динамидная» теория Ленарда, который представлял атом как в основном свободную от вещества систему, в которой находятся «динамиды», состоящие из положительно и отрицательно заряженных частей. Из опытов по рассеянию Ленард определил радиус объема, занятого «динамидами», равным $r = 10^{-11}$ *см*, что, впрочем, превышает известные ныне размеры ядра ($R \sim 10^{-12}$—10^{-13} *см*), если последнее как-то уподоблять ленардовскому объему, занятому динамидами. Положительной стороной этой весьма предварительной модели было признание, что доля объема атома, занятого веществом в виде частиц, ничтожно мала по сравнению с объемом всего атома, имеющим радиус порядка 10^{-8} *см*.

Следующей моделью атома явилась предложенная Дж. Дж. Томсоном картина атома, заполненного положительным электричеством, в котором движутся электроны. Все, что касается положительного электричества, носители которого тогда еще не были известны, оказалось неверным. В отношении же электронов Томсон правильно уловил, во-первых, наличие групп электронов, которые он представлял, правда, еще слишком грубо в виде колец. Здесь в зародыше лежало объяснение менделеевской периодической системы. Кроме того, Томсону уже удалось довольно точно определить число электронов в нейтральном атоме, или отношение заряда к массе (или атомному весу). У легких атомов оно оказалось $(Z/A) \sim \frac{1}{2}$. На современном языке это совпадает с отношением числа протонов в ядре атома к общему числу нуклонов (протонов и нейтронов). У тяжелых элементов, ввиду увеличения числа нейтронов, это отношение уменьшается.

Модель атома японского физика Нагаока без особых аргументов принимала планетарное строение с положительным зарядом в центре атома и электронами, расположенными на одной орбите. Следует напомнить, что идея планетарного строения атомов по образу солнечной системы носилась в воздухе еще в XIX в. Ее высказывал, например, Б. Н. Чичерин, также пытавшийся объяснить периодические закономерности наслоением некоторой материи в атоме. Однако подлинное доказательство планетарная модель получила только в работах Резерфорда (1911), который и считается по справедливости ее автором. Прямыми опытами было показано, что положительно заряжен-

ные α-частицы (как теперь известно, ядра гелия) рассеиваются атомами так, как если бы в центре последних была расположена положительно заряженная часть, т. е. ядро.

Электроны вращаются на расстояниях порядка 10^{-8} *см* вокруг положительно заряженного ядра, сосредоточенного в весьма малой области с размерами $\sim 10^{-13}$ *см*. После этого перед физикой возникла центральная задача объяснить устойчивость электронных движений в атомах, что, очевидно, требовало применения квантовой теории, начало которой было положено Планком в 1900 г. В самом деле, согласно классической электродинамике, электроны, вращающиеся на любых расстояниях вокруг ядер, быстро теряли бы свою энергию ввиду излучения при ускоренном движении и в конце концов падали бы на ядра. Почти 20 лет понадобилось науке для разработки квантовых законов движения атомных электронов.

Прежде чем перейти к характеристике развития атомной теории, отметим, что при исследовании естественно радиоактивных тел в конце XIX в. был открыт ряд тел самопроизвольно испускавших электроны (β-распад), например RaE, K_{19}^{40} и другие. Как выяснилось позднее, это было испускание электронов ядрами данных атомов. Интенсивное исследование β-распада, выяснившее интересные и важнейшие особенности, началось с развитием современной ядерной физики (с начала 30-х годов).

Главными этапами развития атомной теории были следующие.

1. Установление радиуса квантовой орбиты электрона в атоме водорода в предварительных работах Шидлова, Хааса; предварительная квантовая теория молекулярных вращательных спектров Бьеррума; работы Никольсона.

2. Квантование круговых движений атомных элементов и объяснение атомных спектров (Н. Бор, 1913). Записав условие равенства центробежной и кулоновой силы, взятое из классической механики вместе с новым дополнительным квантовым условием равенства действия за период целому кратному кванта действия h:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}, \quad 2\pi mvr = nh,$$

Бор получил отсюда значение возможных радиусов

$$r_n = \frac{n^2h^2}{4\pi^2 mZe^2},$$

скоростей

$$v_n = \frac{2\pi Ze^2}{nh}$$

и энергий атомного электрона, вращающегося вокруг ядра,

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{kin}} + \mathcal{E}_{\text{pot}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{Ze^2}{r} = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n^2 h^2} = -\frac{\text{const} \cdot Z^2}{n^2}.$$

Величина кванта энергии фотона, испускаемого при переходе с орбиты n_1 на орбиту n_2, равняется

$$h\nu = \frac{2\pi^2 mZ^2 e^4}{h^2}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right),$$

что объясняет формулу Бальмера и другие эмпирические соотношения для спектров.

Будучи приближенной, теория Бора сумела правильно схватить многие важнейшие стороны квантового движения и дала огромный толчок к пониманию атомных явлений, оптических, магнитных, химических и других свойств атомов. Теория Бора была развита во многих направлениях.

3. Крупный шаг был сделан Зоммерфельдом и Вильсоном, проквантовавшими эллиптические движения; при этом наряду с главным квантовым числом n, определяющим в основном значение энергии в данном стационарном состоянии, были введены другие квантовые числа: квантовое число l, определяющее величину момента количества движения, и магнитное квантовое число m, определяющее проекцию l на какое-либо направление. Наряду с этим вводится радиальное квантовое число n_r, связанное с n и l соотношением, которое мы запишем в современной форме

$$n = l + n_r + 1.$$

Эпштейну удалось дать объяснение штарк-эффекта, проявляющегося в своеобразном расщеплении уровней энергии и спектральных линий атомов в электрическом поле.

Применив к движению атомного электрона не классическую, а релятивистскую механику наряду с боровскими квантовыми условиями, Зоммерфельд вывел уточненное значение энергии электрона в каком-либо состоянии:

$$\mathcal{E} = mc^2\left\{-1 + \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{(n_r + \sqrt{(l+1)^2 - \alpha^2 Z^2})^2}\right]^{-\frac{1}{2}}\right\}.$$

Здесь n_r — радиальное квантовое число теории Дирака.

Оказалось, что при учете релятивизма сама орбита электрона будет медленно вращаться, что приводит к незначительному расщеплению спектральных термов и линий (тонкая структура). Величина расщепления зависит от зоммерфельдовской константы тонкой структуры

$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137{,}03}.$$

Н. Бор и Рубинович разработали «принцип соответствия», устанавливающий закономерную связь формул квантовой и

классической теорий. Эренфест указал на плодотворное понятие адиабатических инвариантов, т. е. величин, которые остаются неизменными при бесконечно медленных изменениях параметров системы.

4. Важный шаг был сделан в 1917 г. Эйнштейном, указавшим, что акты излучения и поглощения света атомными электронами имеют статистический характер. Например, электрон, находящийся в возбужденном состоянии n_2, имеет определенную вероятность A_{21}, самопроизвольно перейти в нижнее состояние n_1 с испусканием фотона $h\nu = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$. Аналогично этому вероятность поглощения фотона и перехода электрона в возбужденное состояние определяется коэффициентом B_{12}. Тем самым в физику атома были введены коренные статистические свойства. Коэффициенты Эйнштейна A вполне аналогичны значениям вероятностей λ для какого-либо возбужденного ядра перейти в более низкое энергетическое состояние с испусканием частиц, либо γ-лучей, либо электрона и нейтрино и т. д. Подобное статистическое толкование радиоактивных превращений было введено в 1903 г. Резерфордом и Содди.

5. В 1925 г. ученики Эренфеста—Гаудсмит и Уленбек на основе анализа спектров обнаружили у электрона собственный момент количества движения, так называемый «спин», по абсолютной величине равный

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi},$$

и связанный с ним собственный магнитный момент, равный боровскому магнетону (введенному еще румынским физиком Тенцейка):

$$\mu_0 = \frac{eh}{4\pi mc}.$$

В этой связи было введено четвертое квантовое число s, характеризующее одно из двух возможных значений компоненты спина, по заданному направлению, например, по оси z.

$$s_z = \pm \frac{1}{2}.$$

Точечный электрон оказался, наглядно говоря, «вращающейся частицей». Открытие спина позволило в основном объяснить мультиплетную, тонкую структуру атомных спектров.

6. В том же 1925 г. Паули эмпирически установил важный принцип запрета или исключения, воспрещающий находиться в одном и том же квантовом состоянии, характеризуемом числами n_r, l, m, s_z более чем одному электрону. Таким образом, в данном состоянии движения могут находиться не более двух элек-

тронов, но с противоположными направлениями спинов. Впоследствии принцип Паули был теоретически доказан для всех частиц с полуцелым (в долях $h/2\pi$) спином, на основе общих положений релятивистской квантовой теории. На базе принципа Паули и квантовой теории Бора уже удалось дать объяснение менделеевской периодической системы элементов. Суть его заключается в том, что электроны заполняют всевозможные орбиты, т. е. энергетические состояния, начиная с наинизших, по две частицы в каждом состоянии с данными n_r, l, m. Группы состояний, соответствующие всевозможным m при данном l и всевозможным l при данных n, образуют замкнутые оболочки с общим моментом количества движения, равным нулю. Следующие электроны обязаны заполнять состояния с высшими моментами или квантовыми числами l. Ряд новых орбит снова дает замкнутую оболочку; таким образом, аналогичные электронные структуры и, следовательно, аналогичные химические свойства будут повторяться. Инертные газы соответствуют заполненным оболочкам; у щелочных металлов имеется по одному электрону в s-состоянии ($l=0$) сверх заполненной оболочки и т. д.

Несмотря на свои огромные успехи, теория Бора столкнулась со многими трудностями, не сумев объяснить различий в спектрах орто- и пара-гелия и многих деталей в спектрах сложных атомов; многие формулы теории Бора пришлось эмпирическим путем переделывать, заменяя, например, значение момента количества движения l на $l + {}^1/_2$, l^2 на $l(l+1)$ и т. д.

В 1924 г. индийский физик Бозе, уточнив рассуждения Планка (1900), построил квантовую статистику, развитую затем Эйнштейном, пригодную для фотонов и систем, обладающих целочисленным (в долях $h/2\pi$) спином: 0,1, 2,... (например, для атомов гелия, π-мезонов и других «бозонов»). В 1925 г. Ферми и Дирак построили квантовую статистику для электронов и других систем с полуцелым спином ${}^1/_2$ («фермионов»), подчиняющихся принципу Паули. В пределе высоких температур все системы подчиняются классической статистике Максвелла — Больцмана. Позднее обе квантовые статистики были оправданы с точки зрения современной квантовой теории. Постепенно стало ясно, что нужно строить квантовую механику, базируясь на каких-то новых фундаментальных принципах, а не просто путем введения дополнительных квантовых условий, выбирающих дозволенные состояния из всего множества классических орбит, как это делалось в теории Бора.

7. Построение современной квантовой механики электронов и других частиц было достигнуто, с одной стороны, благодаря работам Л. де Бройля (1924) и Э. Шредингера (1926) и, с другой — группы Гейзенберга, Борна, Йордана и Дирака (1925).

Де Бройль предложил сопоставить движению электрона и других частиц волны таким же образом, как волны сопоставляются энергии и импульсу фотона

$$\mathcal{E}_\gamma = h\nu, \quad p_\gamma = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

откуда длина волны для электрона

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$

Таким образом, квантовые устойчивые орбиты в атоме, наглядно говоря, характеризуются как траектории, на которых волны укладываются целое число раз:

$$2\pi r = n\lambda = n \cdot \frac{h}{mv}.$$

Это соотношение совпадает с условием Бора; однако, оно заключает в себе широкие возможности дальнейших уточнений.

Следовательно, более точное описание поведения электронов и других частиц должно заключаться в исследовании поведения их волн (ψ-волн, как их стали называть). Нерелятивистское волновое уравнение было установлено Шредингером в виде

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(\mathcal{E} - V)\psi = 0,$$

где

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}.$$

Решение знаменитого уравнения Шредингера немедленно, одним ударом привело к результатам теории Бора, притом со всеми требуемыми поправками и уточнениями. Кроме того, изучение движения и распределения ψ-волн позволило выяснить многие важные стороны, совершенно чуждые теории Бора. Например, волновая (квантовая) механика дала возможность понять прохождение ψ-волн через потенциальные барьеры, что впервые позволило объяснить радиоактивный α-распад. Была открыта дифракция электронов при рассеянии на кристаллах (Дэвиссон и Джермер), объясняемая дифракцией ψ-волн. Позднее была обнаружена дифракция нейтронов и других частиц. Отсылая читателя за всеми подробностями к соответствующей литературе, подчеркнем, что квантовая механика дала самое полное и прекрасно согласующееся с опытом описание поведения атомных и свободных электронов, протонов, нейтронов и всех других частиц. На базе волновой механики Гайтлер и Лондон объяснили образование гомополярной

молекулы водорода H_2 и заложили основы квантовой химии, имеющей многочисленные применения.

8. С другой стороны, независимо от идей де Бройля, Гейзенберг, а затем Борн, Йордан и Дирак установили матричный, или операторный, вариант квантовой механики, согласно которому уравнения классической механики сохраняют свой вид, но уже не для обычных величин, а для операторов p, q, H:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \qquad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial q};$$

к ним присоединяется квантовое соотношение:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} = -i\hbar.$$

Дальнейшее исследование показало тождественность квантовой механики и механики матричной.

9. Важное соотношение неопределенности, связывающее возможные минимальные ошибки при одновременном определении кординаты и импульса, было установлено Гейзенбергом в 1927 г.:

$$\Delta p\, \Delta q > h.$$

Из него явствует невозможность одновременного определения координаты и импульса электрона и любых других частиц с абсолютной точностью. Иначе говоря, становится ясным, что движение электрона не может трактоваться по классической механике. Простое по математической формулировке соотношение Гейзенберга послужило толчком для широкой философской дискуссии.

10. До сих пор речь шла о нерелятивистской квантовой механике, основное шредингеровское уравнение которой пригодно для любых частиц. При больших скоростях частиц необходимо построить релятивистское квантовое уравнение, которое при малых скоростях переходило бы в шредингеровское.

Уравнение Шредингера является операторным обобщением классического соотношения между энергией и импульсом

$$\mathcal{E} = \frac{p^2}{2m} + V_{\text{pot}}.$$

Действительно, при подстановке

$$\hat{p}_x = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x}; \quad \hat{p}_y = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial z}; \quad \hat{p}_z = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial z};$$

в выражение $\hat{p}^2 = \hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2$

и умножении на ψ-функцию получим уравнение Шредингера

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}+\frac{8\pi^2 m}{h^2}(\mathcal{E}-V_{\text{pot}})\psi=0\,.$$

Если ψ зависит от времени, то нужно сделать замену

$$\mathcal{E}\to-\frac{h}{2\pi i}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\,.$$

Естественно поэтому взять за основу обобщения классическое (неквантовое) релятивистское соотношение между энергией и импульсом:

$$\mathcal{E}^2=c^2p^2+m^2c^4\,,$$

исходя из которого приходим при тех же подстановках к квантовому релятивистскому уравнению Клейна — Гордона

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}-\frac{m^2c^2}{\hbar^2}\psi=0\quad\left(\hbar=\frac{h}{2\pi}\right).$$

11. Наряду с квантовой механикой развивалась квантовая теория электромагнитного поля. Подвергнув уравнения Максвелла, являющиеся волновым обобщением геометрической оптики, «вторичному квантованию», мы получим строгое сопоставление волн и фотонов (Дирак, Гейзенберг и Паули). Вторичное квантование ψ-функций поля электронов (в свою очередь явившихся обобщением классической, «лучевой» механики в результате «первичного»квантования) было произведено Йорданом и Вигнером.Существенным явилось получение для электронных функций соотношений, приведших к принципу Паули и фермиевской статистике.

Релятивистское квантовое уравнение второго порядка было получено О. Клейном в 1926 г. (затем в ряде случаев оно рассматривалось Гордоном), исходя из идеи о 5-мерном пространстве —времени, выдвинутой в 1926 г. Калуца в целях построения объединенной теории гравитации и электромагнетизма.

В дальнейшем, однако, выяснилось, что уравнение Клейна — Гордона пригодно только для «бозонов» — частиц целого спина, притом равного нулю, описываемых скалярными или псевдоскалярными волновыми функциями, т. е., например, для π-мезонов.

Релятивистское квантовое уравнение для волновых функций электрона и других фермионов спина $^1/_2$, было установлено Дираком в 1928 г. Он исходил при этом из непригодности для электронов уравнения Клейна-Гордона, дававшего, в частности, неверную формулу тонкой структуры уровней электрона в атоме водорода. Впрочем, Дирак вначале ошибочно полагал, что клейн-гордоновское уравнение вообще неверно, а новое,

полученное им уравнение, — универсально. С открытия дираковского уравнения начинается новый важнейший этап современной физики элементарных частиц.

Квантово-релятивистская теория электрона, установленная Дираком, описывает поведение электрона и всех других «фермионов» (т. е. частиц со спином $^1/_2$) при помощи волновой ψ-функции с четырьмя компонентами, подчиняющейся особым законам преобразования, отличным от законов трансформации векторов и тензоров. Наглядно говоря, можно назвать дираковскую (спинорную) электронную функцию «полувектором» или тензором половинного ранга. Дело в том, что компоненты вектора, тензора или скаляра можно составить билинейным образом из компонент спинорной функции.

Например, компоненты вектора плотности тока равны

$$\boldsymbol{j} = \psi^* \boldsymbol{\alpha} \cdot \psi, \quad j_4 = \psi^* \psi,$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ — три 4-рядные матрицы Дирака; величина $S_0 = \psi^* \cdot \beta\psi$ является инвариантом, т. е. скаляром при всех вращениях координатной системы, инверсиях координат и преобразованиях Лоренца.

Отсылая за всеми подробностями к обширной литературе, напишем для придания некоторой наглядности изложению уравнение Дирака сперва в наиболее принятой матричной форме

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} + \sum_{r=1}^{3} \alpha_r \frac{\partial \psi}{\partial x_r} + \frac{imc}{\hbar} \beta\psi = 0.$$

Умножая слева это уравнение на

$$\left(\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} - \sum \alpha_r \frac{\partial}{\partial x_r} - \frac{imc}{\hbar} \beta \right),$$

получим прежнее уравнение Клейна — Гордона, если матрицы α_r и β подчиняются соотношениям

$$\alpha_r^2 = \beta^2 = 1; \quad \alpha_r \alpha_s + \alpha_s \alpha_r = 2\delta_{rs}$$

$$\begin{pmatrix} \delta_{rs} = 0 \text{ при } r \neq s, \\ \delta_{rs} = 1 \text{ при } r = s. \end{pmatrix}.$$

Тем самым оператор уравнения Дирака является своеобразным корнем квадратным из клейн-гордоновского оператора.
Матрицы α и β можно представить в виде

$$\alpha_r = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_r \\ \sigma_r & 0 \end{pmatrix} \qquad \beta = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix},$$

где

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ +i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

— матрицы Паули, введенные для описания спина электрона. Волновая функция ψ представляется в виде матрицы-столбца:

$$\psi = \begin{vmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{vmatrix}.$$

Производя перемножение матриц, можно записать дираковское уравнение в виде четырех дифференциальных уравнений для компонент ψ_ν. Спиноры были открыты еще в 1913 г. французским математиком Картаном; но на них не обратили никакого внимания ни в математике, ни в физике, и они были вновь независимо открыты Дираком в 1928 г. Не останавливаясь на деталях математического формализма, укажем, что, во-первых, при помощи уравнения Дирака удалось непосредственно показать, что собственный момент количества движения электрона (спин) равен $s = \frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$. (Лучше сказать, наоборот, что частицы спина $\frac{1}{2}$ описываются спинорными дираковскими функциями.) Во-вторых, было показано, что собственный магнитный момент электрона равен боровскому магнетону

$$\mu_0 = \frac{e}{mc} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi} = \frac{eh}{4\pi mc}.$$

Кроме подобного истолкования основных свойств электрона, уравнение Дирака оказалось способным, в замечательном согласии с экспериментом, объяснить всевозможные детали поведения свободных и атомных электронов, дало возможность весьма точно вычислить положение энергетических уровней электронов в атомах и их расщепление типа тонкой структуры, обусловленной влиянием спина и магнитных взаимодействий. Кроме того, на основе дираковского уравнения было объяснено взаимодействие свободных электронов с электромагнитным полем, рассеяние света на электроне (эффект Комптона), описываемое формулой Клейна-Нишина, всевозможные детали рассеяния электронов на атомных ядрах и т. д. Знаменитое квантовое релятивистское уравнение Дирака, описывающее поведение электрона, по праву считается самым точным законом движения, значительно обобщающим классические уравнения Ньютона, релятивистские классические уравнения движения частиц и квантовое, но не релятивистское, уравнение Шредингера.

§ 2. ПОЗИТРОН

В установленном Дираком в 1928 г. релятивистском квантовом уравнении движения электрона, прекрасно описывавшем всевозможные тонкие его свойства и детали поведения, оставалась загадочной возможность отрицательной энергии электрона. Согласно релятивистскому соотношению между энергией и импульсом, энергия может принимать не только положительные, но и отрицательные значения

$$\mathcal{E}^2 = c^2p^2 + m^2c^4; \qquad \mathcal{E} = \pm c\sqrt{p^2 + m^2c^2}\,.$$

Последние в неквантовой теории отбрасывались, так как нельзя было непрерывным образом перейти от наименьшего положительного значения $\mathcal{E}_0 = +mc^2$ к ближайшему отрицательному $\mathcal{E}_0' = -mc^2$. Однако квантовая теория допускает переходы с изменением энергии скачком, в данном случае равным $2mc^2$. Некоторые авторы (Паули, Шредингер, Фок и др.) стали даже сомневаться в правильности самого уравнения Дирака. Отбрасывая предложения об исключении отрицательных решений, Дирак смело решил интерпретировать их как связанные с существованием новой частицы — позитрона. Обычное состояние мира представляет собой океан полностью заполненных отрицательных, самых низких уровней энергии. Тогда наши приборы показывают нуль, отсутствие каких-либо частиц и зарядов. Электрон является частицей, расположенной на положительном уровне энергии; например, покоящийся электрон обладает наинизшей энергией $\mathcal{E}_0 = mc^2$. Если убрать один из электронов отрицательной энергии, то оставшаяся «дырка» в океане заполненных уровней будет соответствовать античастице — „позитрону," являющемуся частицей положительной энергии и положительного заряда (ведь для того, чтобы вновь получить нуль, нужно добавить единичный отрицательный заряд). Переход электрона в незанятое состояние среди отрицательных уровней приведет к исчезновению пары электрон— позитрон. При этом освободится энергия покоя обеих частиц $2mc^2$, которая вместе с их кинетической энергией перейдет в энергию γ-лучей. Замечательным образом Дирак сумел подсчитать вероятность подобной «аннигиляции» частиц. Позднее был рассчитан обратный процесс порождения пары частиц при столкновении γ-кванта с ядром. Все эти предсказания полностью подтвердились в экспериментах, в которых наблюдалось порождение пар (e^-— e^+) при столкновениях γ-фотонов с ядрами и с электронами, а также аннигиляция пары ($e^- + e^+ \to 2\gamma$) при ее превращении в γ-фотоны.

Первое наблюдение позитрона имело место в космических лучах. В принципе пара (e^-— e^+) может возникнуть также при столкновении двух фотонов, но вероятность подобных процессов очень мала, и существующие интенсивности потоков γ-лу-

чей не позволили еще наблюдать их. Подобно электрону, позитрон описывается спинорными функциями, подчиняющимися уравнению Дирака. Свойства e^+ во всем подобны электронным. Позитрон имеет спин $s = (1/2)h/2\pi$ и подчиняется фермиевской статистике. Его магнитный момент, однако, будет положительным, т. е. параллельным спину, в противоположность моменту электрона.

Теперь становится понятной интерпретация космических ливней Блэккета и Оккиалини (Манчестер, 1933 г.): γ-фотон высокой энергии из потока космических лучей при столкновении с ядром может породить пару $(e^+—e^-)$; вероятность таких процессов при высоких энергиях очень велика. Пролетая мимо других ядер, электрон и позитрон, в свою очередь будут излучать новые «тормозные» γ-фотоны; при высоких энергиях другие процессы потери энергии не играют роли. Новые фотоны второго поколения в свою очередь будут порождать пары частиц и т. д. Иногда на вильсоновских фотографиях видны каскады, содержащие тысячи частиц. Оже (Париж) обнаружил широкие космические ливни, покрывающие площади в тысячи квадратных метров.

При понижении энергии начинают играть роль процессы ионизации атомов, которые также можно закономерно учесть. Разработка теории каскадных ливней была начата Гайтлером и Баба, Оппенгеймером и Карлсоном и в известной мере завершена советскими физиками (Ландау и Румер, Иваненко и Соколов, Тамм и Беленький). Создание ее явилось важным этапом изучения космических лучей, позволив, в частности, выделить процессы, трактуемые по квантовой электродинамике от иных, в то время значительно менее ясных явлений, также приводивших к образованию добавочных электронов и позитронов в космических лучах и связанных, как позднее выяснилось, с образованием и распадом μ-мезонов.

Открытие позитрона и ливней выдвинуло изучение космических лучей на передний план и привлекло к ним общее внимание. Как незамедлительно выяснилось, позитроны, легко получавшиеся в лабораторных условиях при облучении вещества γ-лучами, оказались важными участниками различных ядерных процессов.

В 1934 г. супруги Жолио-Кюри сумели получить искусственно радиоактивные атомные ядра, которые испускали позитроны. На этом вопросе мы остановимся в параграфе, посвященном ядерной физике.

Остановимся теперь коротко на открытии «позитрония», атомо-подобной системы, состоящей из электрона и позитрона, вращающихся вокруг общего центра тяжести. Размеры атома позитрония будут в два раза больше, чем атомы водорода,

а энергия связи — в два раза меньше. В конце концов электрон и позитрон в позитронии, движущиеся под влиянием кулоновых электрических сил, все же упадут друг на друга и аннигилируют в γ-фотоны. Возможность образования позитрония, так же как возможность аннигиляции позитрония или свободной пары не в два, но в три фотона, была упущена в первых работах по исследованию позитрона и обнаружена лишь в конце 40-х гг. Сам позитроний был открыт М. Дейчем (США) в 1950 г. Превращение электрона и позитрона в два либо в три фотона зависит от взаимной ориентации спинов частиц. При антипараллельной ориентации (пара-позитроний) получится, согласно законам сохранения, два фотона, при параллельной (орто-позитроний)— три фотона. Среднее время жизни пара-позитрония $\tau_p = 1{,}25 \cdot 10^{-10}$ *сек.*, орто-позитрония — $\tau_0 = 1{,}4 \cdot 10^{-7}$ *сек.* Теория этих интересных систем, своеобразных атомных «гибридов», находится в прекрасном согласии с опытами.

В связи с открытием позитрона, являющегося «античастицей», зарядовосопряженной по отношению к электрону, следует отметить, что релятивистская квантовая теория предсказывает наличие античастиц прежде всего по отношению ко всем другим заряженным частицам. В частности, было предсказано существование антипротона, частицы с отрицательным зарядом и с отрицательным магнитным моментом, во всем остальном подобного протону. Антипротоны были открыты группой Сегре осенью 1955 г. (Беркли, Калифорния). Более того, теория предсказывает наличие античастиц даже в случае нейтральных частиц, описываемых комплексными функциями, например, в случае нейтронов и K^0-мезонов. Антинейтроны, отличающиеся от нейтронов знаком магнитного момента, были открыты в 1956 г. Античастицы по отношению к K^0-мезонам, лишенным, вероятно, магнитного момента, отличаются значением «странности», как будет пояснено ниже; во всяком случае, различные типы K^0-мезоны существуют. С другой стороны, для фотонов, π-мезонов и других систем и частиц, описываемых вещественными волновыми функциями, не существует отличных от них античастиц.

Важный шаг в теории электрона, значение которого выяснилось позднее, был сделан в 1927 г. Йорданом и Вигнером, подвергшими поле дираковских частиц, описываемое волновыми функциями, так называемому «вторичному» квантованию. Тем самым этому полю были сопоставлены кванты поля — частицы (электроны и позднее позитроны). Аналогичным образом при вторичном квантовании электромагнитного поля ему были сопоставлены фотоны. Поскольку благодаря наличию заряда электроны в первую очередь взаимодействуют с электромагнитным полем, теория электромагнетизма и теория электронов —

позитронов развивались в теснейшей связи друг с другом. Дальнейшие сведения об электронах и позитронах будут даны позднее в связи с ядерной физикой и новейшим развитием релятивистской квантовой теории поля.

§ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ФОТОНЫ

Так как история установления теории электромагнитного поля и открытия фотонов и их «старых» свойств общеизвестна, то мы можем здесь ограничиться кратким напоминанием.

Знаменитые максвелловские уравнения, объединившие электрические и магнитные явления и заложившие основы электромагнитной теории света, были установлены около 1870 г. Наибольший вклад был внесен в дальнейшем Лоренцом, уточнившим, во-первых, вид источников и токов, порождающих поле. Сейчас ясно, что в конце концов источниками поля являются всевозможные заряженные элементарные частицы, как свободные, так и входящие в состав ядер, атомов, молекул. Во-вторых, Лоренц установил вид силы, действующей со стороны поля на заряд. В-третьих, Герц, Лармор, Лоренц и другие физики с большим трудом подошли к установлению вида уравнений электромагнитного поля не в покоящейся системе, но в системе, движущейся равномерно и прямолинейно. Этим был подготовлен переход к установлению специальной теории относительности.

В конце концов теория относительности была создана трудами Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна, Минковского в 1904—1909 гг. и означала, в отношении электромагнитного поля, дальнейшее объединение его электрической и магнитной части в виде единого антисимметричного тензора 2-го ранга. С точки зрения современной теории, электромагнитное поле описывается векторной волновой функцией A_ν (четырехмерным вектором-потенциалом: три компоненты вектор-потенциала A и скалярный потенциал φ). На его базе образуется тензор поля

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x_\nu},$$

или в трехмерной векторной записи

$$\boldsymbol{H} = \operatorname{rot} \boldsymbol{A}; \quad \boldsymbol{E} = -\nabla\varphi - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}.$$

В векторных обозначениях уравнения Максвелла имеют вид

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{H} - \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}, \quad \operatorname{div} \boldsymbol{E} = 4\pi\rho,$$

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = 0, \qquad \operatorname{div} \boldsymbol{H} = 0.$$

В четырехмерной записи имеем

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = \frac{4\pi}{c} j_\mu, \qquad \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\lambda} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu} = 0.$$

Здесь j_μ — обозначает плотность зарядов и токов, порождающих электромагнитное поле. Отметим, что с точки зрения инвариантности базирующиеся на векторной волновой функции линейные уравнения без высших производных могли бы содержать добавочные члены по сравнению с максвелловскими уравнениями. Подобные обобщенные уравнения были получены в начале 30-х гг. де Бройлем и Прока. В пустоте они имеют вид:

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{G} - \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial t} - k_0^2 \boldsymbol{A} = 0, \qquad \operatorname{div} \boldsymbol{F} + k_0^2 \boldsymbol{A} = 0,$$

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{F} + \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial t} = 0, \qquad \operatorname{div} \boldsymbol{G} = 0.$$

Здесь константа k_0 играет роль массы, связанной с элементарной волной или квантом поля $k_0 = \frac{2\pi mc}{h}$. В случае $k_0 = 0$, а также при вещественности всех величин, получаем обычные уравнения Максвелла для $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{G}$, вполне аналогичных, но отличающихся по физической природе от электромагнитных $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$.

Максвелловские уравнения электродинамики описывают распределение, распространение и порождение электромагнитного поля, представляющего собою вид материи, лишенной массы покоя.

Изложение всего огромного богатства выводов из уравнений Максвелла, описывающих оптические явления, распространение радиоволн и другие явления в радиофизике, электростатические, магнитные явления, выходят за рамки нашего краткого обзора. Все экспериментальные данные и формальная структура электродинамики указывают, что масса покоя, связанная с электромагнитным полем или фотоном, в точности равна нулю. Это формально связано с тем, что уравнения электродинамики инвариантны по отношению к калибровочным преобразованиям потенциалов:

$$A_r' = A_r + \frac{\partial f}{\partial x_r}, \qquad \varphi = \varphi - \frac{1}{c}\frac{\partial f}{\partial t}.$$

При наличии добавочных членов уравнения Прока не будут, очевидно, калибровочно инвариантными.

Другое направление обобщения и уточнения классической максвелловской электродинамики связано с применением к нему квантования. После предварительных работ В. А. Михельсона, Б. Б. Голицына, Вина, М. Планк в 1900 г. развил теорию теплового равновесного электромагнитного излучения при помощи нового понятия — дискретного кванта действия h, равного $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*, и по существу допустил прерывность испускания поля. Важный с исторической точки зрения шаг сделал в 1905 г. Эйнштейн, указавший, что свет не только испускается и поглощается, но и распространяется в виде порций — фотонов, обладающих энергией $\varepsilon = h\nu$ и импульсом $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$. Подобным путем удалось объяснить фотоэффект, заключающийся в вырывании электрона из тел под действием света. Энергия электрона равняется энергии фотона минус работа вырывания:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - V.$$

Противоречия между волновой и корпускулярной картиной света обострились в начале 20-х годов, после открытия комптон-эффекта и его интерпретации как столкновения фотона с электроном. Разрешение противоречий было достигнуто созданием квантовой теории, согласно которой электроны и фотоны характеризуются как корпускулярными, так и волновыми свойствами. Последовательное, так называемое «вторичное» квантование электромагнитного поля, в котором производится сопоставление корпускулярных и волновых свойств, было проделано Дираком (1927) и развито Гейзенбергом и Паули.

Позднее было указано на наличие у фотона спина $s = 1 \cdot (h/2\pi)$. Момент количества движения электромагнитного поля был теоретически изучен еще Садовским в начале XX в. Лучше сказать, наоборот, что уравнения Максвелла электромагнитного поля и их квантовое обобщение являются уравнениями частиц спина 1, описываемых векторной волновой функцией $A_\nu = (\mathbf{A}, \varphi)$ и лишенных массы покоя. В дальнейшем теория электромагнитного поля и теория электронов — позитронов, порождающих друг друга и взаимно превращаемых, развивались совместно под названием квантовой электродинамики, или спинорной электродинамики, поскольку электроны и позитроны описываются спинорными функциями. Позднее, в 1947—1950 гг. теория квантования электромагнитного и электронного поля была значительно развита в работах Фейнмана, Швингера, Дайсона и других авторов в связи с открытием лэмбовского сдвига и дополнительного магнитного момента электрона.

Квантование электромагнитного поля получило название «вторичного», поскольку переход от геометрической, лучевой оптики к волновой, т. е. к уравнениям Максвелла, уже дает описание волновых свойств электромагнитного поля. Аналогичным образом установление нерелятивистского уравнения Шредингера (или квантово-релятивистских уравнений Клейна — Гордона и Дирака) является процессом первичного квантования, при котором частицам сопоставляются волновые свойства, и их поведение описывается ψ-функциями. Дираковские волновые ψ-функции, так же как клейн-гордоновские φ, можно рассматривать как компоненты «потенциалов» некоторого поля, аналогично обычным потенциалам A_ν, или $(\mathbf{A}, \varphi)$, максвелловского поля и подвергнуть их вторичному квантованию. Квантами электронно-позитронного поля будут электроны — позитроны.

§ 4. ЛЭМБОВСКИЙ СДВИГ И ТЕОРИЯ ВАКУУМА

Открытие позитрона и взаимных трансмутаций частиц и фотонов было огромным достижением релятивистской квантовой механики электрона и квантовой электродинамики. В дальнейшем, однако, штурм атомного ядра в течение десятилетия 1932—1942 гг. занял основное внимание науки, и теория электрона — позитрона развивались главным образом в связи с ядерными процессами β-распада и K-захвата. В области же собственно теории электрона и электромагнитного поля никаких существенных успехов в этот период достигнуто не было. Напротив, поскольку анализ трудностей теории поля, связанных с бесконечной полевой энергией точечного заряда, не привел к каким-либо способам их устранения, казалось, что квантовая электродинамика зашла в тупик.

Существенный шаг вперед был сделан только в 1947 г. в связи с окончательным открытием некоторого незначительного сдвига энергетического уровня электрона $2S_{1/2}$ по отношению к уровню $2P_{1/2}$ в атоме водорода. Эти уровни, по теории Дирака, должны были бы совпадать. Несколько неуверенное открытие сдвига было сделано еще до второй мировой войны оптическими методами, но не было правильно теоретически объяснено и осталось без достаточного внимания.

Применив весьма точные радиоспектроскопические методы, при помощи приборов, созданных в военное время, сотрудники лаборатории Раби (Колумбийский университет, Нью-Йорк), Лэмб и Ризерфорд окончательно открыли сдвиг энергетических уровней электрона, равный в атоме водорода $\Delta E_L = 1057{,}77$ *Мц/сек* и в дейтерии $\Delta E_L = 1059{,}00$ *Мц/сек*. Этот сдвиг соответствует длине волны излучения, равной около 21 *см* (т. е. не видимого света, но радиоволн), испускаемого атомами. Как

вскоре выяснилось, дело заключается в том, что электрон взаимодействует не только с реальным внешним кулоновским полем протона или другими внешними полями, но также с так называемыми флуктуациями, т. е. случайными колебаниями «вакуумного» электромагнитного поля. Хотя в вакууме (бывшей «пустоте»), определяемой как наинизшее энергетическое состояние системы, среднее электромагнитное поле равняется нулю, в нем, однако, имеют место флуктуации, которые сообщают электрону дополнительную кинетическую энергию, тем самым ослабляя энергию притяжения к протону. В результате энергетические уровни оказываются несколько сдвинутыми вверх. Эта смелая интерпретация лэмбовского сдвига по существу явилась открытием своеобразных дополнительных взаимодействий частиц с вакуумом электромагнитного поля, т. е. фотонов. Таким образом, оказалось, что вакуум обладает различными физическими свойствами.

Начало теории вакуума было положено еще Дираком. Однако только после открытия лэмбовского сдвига, а также дополнительного магнитного момента электрона, были сделаны надлежащие выводы из этой концепции. Как это часто бывало в истории науки, все формальные математические средства были развиты довольно давно. Однако последний смелый шаг в признании новых физических свойств вакуума был сделан лишь под влиянием эксперимента, хотя на самом деле лэмбовский сдвиг, обнаруженный еще ранее оптически, мог быть предсказан теоретически за несколько лет до его окончательного открытия. Вместо этого в теоретической физике предыдущих лет нередко имелись, напротив, обратные, глубоко ошибочные тенденции — исключить из теории нулевые флуктуации фотонов, а также электронно-позитронного поля как ненаблюдаемые и ведущие к бесконечным значениям различных величин.

Дополнительное взаимодействие электрона с нулевыми флуктуациями «нерожденных» вакуумных фотонов, согласно первому подсчету Бете (1947), хотя и объясняет основную долю эффекта Лэмба, однако не исчерпывает его полностью. При этом речь идет не только о более точном проведении расчета в высшем приближении теории возмущений, но оказывается необходимым учесть несколько качественно новых важных обстоятельств. Прежде всего необходимо учесть взаимодействие электрона не только с вакуумными фотонами, но также с вакуумом пар электронов — позитронов. Действительно, хотя в среднем заряд вакуума равняется нулю (все уровни отрицательной энергии заполнены электронами), однако в этом распределении возможны случайные флуктуации заряда; иначе говоря, вакуум может быть поляризован. При воздействии

высокочастотного поля электроны — позитроны, грубо говоря, не только раздвигаются, приводя к поляризации, но и раскачиваются настолько сильно, что электрон может покинуть состояние отрицательной энергии и перейти на положительный уровень. В результате рождается реальная пара частиц (электрон — позитрон).

Поляризация вакуума вносит примерно 1/25 величины наблюдаемого лэмбовского сдвига, причем она эквивалентна вкладу обратного знака по отношению к основному сдвигу, т. е. эквивалентна некоторому дополнительному притяжению электрона к протону. Кроме того, следует обратить внимание на то, что магнитный момент электрона несколько превышает значение боровского магнетона и равен, согласно новейшим измерениям Куша, а также Франкля и Либеса,

$$\mu = 1{,}001165 \cdot \mu_0, \quad \left(\mu_0 = \frac{eh}{4\pi mc}\right).$$

При этом добавка к боровскому магнетону в свою очередь объясняется дополнительным взаимодействием электрона с вакуумом, которым раньше пренебрегали. Теоретическое значение магнитного момента электрона, находящееся в прекрасном согласии с опытом, имеет ныне вид

$$\mu = \frac{eh}{4\pi mc}\left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} + 0{,}7\,\frac{\alpha^2}{\pi^2}\right),$$

где $\alpha = \dfrac{2\pi e^2}{hc}$ — постоянная тонкой структуры.

При подсчете лэмбовского сдвига следует учесть видоизмененное значение магнитного момента. В частности, тем самым подтверждается наличие эффекта поляризации вакуума электроннопозитронного поля наряду с подтверждением флуктуаций вакуума фотонов.

В заключение этой краткой характеристики теории лэмбовского сдвига следует отметить, что небольшие дополнительные поправки порядка 1 *Мц/сек* и меньше должны быть учтены в в лэмбовском сдвиге, благодаря следующим, пока что относительно незначительным, но по существу важным обстоятельствам. К ним относятся, во-первых, учет содвижения ядра (т. е. в данном случае протона), которое до сих пор предполагалось бесконечно тяжелым, т. е. покоящимся. При этом речь идет не только об известном из классической механики эффекте движения электрона и протона вокруг общего центра тяжести. В релятивизированной задаче двух тел нужно учесть, как было подчеркнуто Бете и Сальпетером, разные отсчеты времени для каждой частицы. В результате получим некоторую поправку для лэмбовского сдвига.

Во-вторых, следует учесть, в случае лэмбовского сдвига в дейтерии, тот факт, что заряд ядра последнего, т. е. дейтрона, не является точечным, как принимали до сих пор, но распределенным по объему дейтрона. В результате получается небольшая поправка (около 0,7 *Мц/сек*), сдвигающая вверх уровни электронов (работы Швингера и Сальпетера, наши работы с Н. Колесниковым и Э. Теодоровичем). Наконец, в этой же связи нами было обращено внимание на необходимость учета неточечного характера протона, заряд которого, согласно недавним экспериментам Хофштадтера, распределен в некотором объеме с радиусом $r_p = 0{,}8 \cdot 10^{-13}$ *см*. Учет размазанности протонного заряда приводит к небольшому вкладу в лэмбовский сдвиг в водороде, равному около 0,1 *Мц/сек*, что еще больше улучшает согласие с экспериментом. В результате учета всех поправок получается полное согласие теории с экспериментом, указывающее, в частности, что вклад высших приближений теории возмущений, как и вклад возможного объема электрона, является крайне незначительным.

§ 5. ПРОТОН

Ядро атома водорода, названное позднее протоном, было открыто при установлении планетарной модели атома Резерфордом в 1911 г. Масса протона равняется $1{,}6 \cdot 10^{-24}$ *г*; он в 1836,12 раза тяжелее электрона. После открытия сверхтонкой структуры атомных спектров и указания Паули (1924), что последняя обязана наличию спина и магнитного момента у атомных ядер, выяснилось, что протон имеет спин $s = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$, подобно электрону. Протоны, являющиеся тем самым фермионами, подчиняются принципу Паули и статистике Ферми — Дирака. В атомных ядрах на одном уровне, характеризуемом данным набором квантовых чисел (радиального, орбитального, магнитного), могут находится не более двух протонов с противоположными значениями спинового числа: $s_1 = \pm\frac{1}{2}$. Как частица спина $^1/_2$ протон описывается четырехкомпонентной спинорной функцией, подобно электрону подчиняющейся уравнению Дирака.

Первоначальные измерения магнитного момента протона, произведенные Штерном в 1934 г. и уточненные Раби при помощи радиочастотных методов, дали неожиданный результат: магнитный момент оказался превышающим соответствующее частице спина $^1/_2$ значение ядерного магнетона $\mu_0 = \frac{eh}{4\pi Mc}$ и равным $\mu_P = +\,2{,}79275\ \mu_0$.

Этот фундаментальный результат, указывающий на наличие у протона и нейтрона какой-то структуры, был расшифрован качественно еще Виком на базе картины β-распада и электронно-нейтринной теории ядерных сил. Позднее были произведены подсчеты магнитных моментов протона и нейтрона на базе мезонной теории в удовлетворительном, хотя еще не совсем полном согласии с опытом. Речь идет о том, что протон неразрывно связан с π-мезонным полем заряженных и нейтральных π-мезонов. Можно сказать, что протон пульсирует по схеме $p \rightleftarrows n + \pi^+$, превращаясь в нейтрон и π^+-мезон. Магнитное поле будет действовать в первую очередь на π-мезон, который обладает меньшей массой и, следовательно, магнитным моментом большей величины. Поэтому в конце концов момент протона будет равен дираковскому кинематическому моменту в течение долгого времени (~80%) и моменту π-мезона в течение периода диссоциации (τ~20% времени). Поэтому можно написать:

$$\mu_p = (1 - \tau)\,\mu_0 + \tau \cdot \mu_\pi.$$

Аналогичным образом объясняется отрицательный магнитный момент нейтрона, который виртуально диссоциирует по схеме

$$n \rightleftarrows p + \pi^-.$$

Протон и нейтрон близки по своей массе, имеют одинаковый спин и весьма подобны по многим другим свойствам. Естественно, согласно Гейзенбергу, считать их двумя «изотопическими» состояниями одной и той же частицы — нуклона, отличая их значениями проекций изотопического спина $\tau_p = +\frac{1}{2}$, $\tau_n = -\frac{1}{2}$. Незначительная разность масс нейтрона и протона, по всей видимости, обусловлена электромагнитными силами, именно смешанными взаимодействиями между зарядами и магнитными моментами. Первоначальные подсчеты разности масс Фейнмана и Шпейзмена, содержавшие некоторые неточности, были исправлены. Кроме электромагнитного поля, протон наиболее сильно связан с π-мезонным полем, о котором будет речь идти ниже, а также с полем электронов (позитронов) — нейтрино (антинейтрино). Поглощая электрон, протон превращается в нейтрон с испусканием нейтрино

$$p + e_- \to n + \nu.$$

Позитронный распад ядер сводится к превращению протона в возбужденном ядре в нейтрон, согласно схеме

$$p \to n + e^+ + \nu.$$

Свободный протон легче нейтрона и превратиться в него не может. При поглощении антинейтрино протон переходит в нейт-

рон с испусканием позитрона: $p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$. Эта реакция наблюдалась Коуэном, использовавшим поток антинейтрино из ядерного реактора.

В 1955 г. Сегрэ с сотрудниками были открыты античастицы по отношению к протону: отрицательно заряженные антипротоны ($\bar{p}$), которые при столкновении с протоном аннигилируют, переходя в π-мезоны. Протон, антипротон, как нейтрон и все другие тяжелые частицы(барионы), обладают еще одним свойством, характеризуемым барионным зарядом: + 1 для протона, —1 для антипротона. При всех реакциях барионный заряд сохраняется.

В известной нам части Вселенной имеется преимущественная концентрация протонов, нейтронов, электронов, а не соответствующих им античастиц. Космологические причины этого еще не известны. При этом в известной части Вселенной преобладают атомы водорода и других легких элементов. Синтез четырех ядер водорода (протонов) с образованием ядра гелия, идущий путем промежуточных реакций в недрах Солнца и других аналогичных звезд при весьма высокой температуре, является основной термоядерной реакцией, обеспечивающей пополнение энергии Солнца.

§ 6. НЕЙТРОН И ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Перейдем к третьей элементарной частице — нейтрону. Сейчас представляется удивительным, что нейтрон был открыт столь поздно, в 1932 г., тогда как по массе более половины всей известной материи состоит из нейтронов. Объяснение заключается, очевидно, в том, что нейтроны, будучи практически всегда скрытыми внутри атомных ядер, не проявляли своих свойств в химических, магнитных, оптических и других обычных, «старых» свойствах материи. Свободные же нейтроны довольно быстро распадаются, обладая средним временем жизни около 12 *мин.* или чаще всего еще до распада захватываются атомными ядрами тех или иных атомов. Кроме того нейтроны, будучи лишенными электрического заряда, непосредственно не регистрируются обычными электрическими приборами и не дают следов в камере Вильсона и в фотопластинках, но детектируются косвенными методами.

Существование нейтрона было довольно точно предсказано Резерфордом (сообщено во 2-й Бэкерианской лекции, опубликованной в конце 1920 г.). Здесь Резерфорд указал на возможность тяжелого изотопа водорода с массой 2 (дейтерия, открытого только через 12 лет) и возможность нейтральной частицы с массой порядка протона, т. е. с массой нейтрона. Смело предвидя свойства нейтрона, Резерфорд еще в 1920 г. говорил о его

большой проникающей способности при прохождении через вещество и возможности поглощаться ядрами. При этом он еще, конечно, имел ввиду некоторую тесную комбинацию протона и электрона. Первые эксперименты, проведенные вскоре в Кэвендишевской лаборатории в Кэмбридже (Глэссон, Робертс, 1921), в которых исследовался разряд в водороде, так же как неоднократные попытки Чадвика обнаружить нейтроны при радиоактивном распаде, не дали никакого положительного ответа на вопрос о существовании нейтронов, но мысль о них здесь сохранилась [2]. Не случайно в той же лаборатории через 12 лет идея нейтронов была привлечена сотрудником Резерфорда Чадвиком для интерпретации экспериментов Боте и супругов Жолио-Кюри.

Цепь событий, приведших непосредственно к открытию нейтрона, в кратких чертах представляется в следующем виде. После открытия планетарной модели атома и обнаружения ядер в 1911 г., фундаментальные исследования ядер оказались сосредоточенными в манчестерской и позднее в кэмбриджской лаборатории Резерфорда. В немногих других лабораториях, в которых исследовалась радиоактивность и тем самым — ядерные свойства (радиевый институт Кюри в Париже, Венский радиевый институт и некоторые другие), речь шла об открытии и изучении тех или иных радиоактивных изотопов и их излучений. От экспериментов с рассеянием α-частиц на ядрах Резерфорд постепенно переходил к расщеплению ядер быстрыми ядрами гелия. Уже в конце своих вашингтонских лекций 1914 г. Резерфорд упоминает о возможности превращения элементов путем расщепления ядер α-частицами, электронами или γ-лучами, либо благодаря прилипанию протонов или α-частиц к ядрам.

Начавшаяся первая мировая война во многом задержала намеченные работы. Осенью 1918 г. Резерфорд возобновил эксперименты по рассеянию α-частиц и 11 сентября впервые заметил, что α-частицы при прохождении через воздух вызывают какие-то частицы большого пробега. Позднее он доказал, что эти длиннопробежные частицы являются ядрами водорода, т. е. протонами, выбиваемыми из ядер азота α-частицами. Иными словами, Резерфорду впервые удалось наблюдать превращение химического элемента, происходящее не путем самопризвольного радиоактивного распада, но вызванное быстрыми частицами, направленными руками человека на ядра.

---

[2] Любопытно, отметить, что недавно советские физики И. В. Курчатов, Л. А. Арцимович и др. наблюдали возникновение нейтронов в результате еще неясных процессов при разряде в водородной плазме, через которую проходил ток около $10\frac{6}{a}$.

Поразительно простыми средствами Резерфорд сумел заложить фундамент ядерной физики. Фарадэевской простотой дышит его доказательство расщепления азота α-частицами.

Рассматриваемая реакция может быть записана в виде

$$N_7^{14} + He_2^4 \rightarrow H_1^1 + O_8^{17}.$$

Так была осуществлена идея средневековых алхимиков. Излишне подчеркивать, что попытки алхимиков, хотя и базировавшиеся на правильной идее о каком-то единстве вещества и, следовательно, возможности превращения элементов, предпринимались с совершенно недостаточными средствами, были ошибочны и в конце концов приобрели крайне реакционный характер в науке. Сам Резерфорд, однако, подчеркнул преемственность идей, озаглавив свою последнюю книгу 1937 г.: «Новейшая алхимия».

Кэмбридж продолжал еще более десятилетия оставаться столицей ядерной и радиоактивной физики. Отсюда вплоть до 1932 г. исходили самые важные открытия в области строения вещества. Продолжая эксперименты с α-частицами, Резерфорд и Чадвик сумели расщепить все легкие элементы по калий включительно, за исключением гелия, лития, бериллия, углерода и кислорода.

На конец 20-х гг. приходится первое, весьма удачное и в сущности единственное в донейтронный период применение квантовой механики к атомному ядру. Речь идет о теории α-распада и расщепления ядер протонами и α-частицами, разработанной в 1928 г. Гамовым, а также Кондоном и Герни. Самый факт самопроизвольного вылета α-частиц из ядер без каких бы то ни было внешних воздействий представлялся по классической теории непонятным и парадоксальным. Либо α-частица, обладая достаточной энергией, должна была весьма быстро покидать ядра, чему противоречили весьма большие средние времена жизни у многих ядер, вплоть до миллиардов лет у урана (U_{92}^{238}) и тория (Th_{90}^{232}). Либо, в случае недостаточной энергии, α-частицы, казалось, вообще не могли преодолеть силы притяжения и выйти из ядра. С другой стороны, снаружи от ядер положительно заряженная α-частица отталкивается от положительно заряженных ядер. Таким образом, график потенциальной энергии имеет вид кулоновой гиперболы снаружи от ядра и потенциальной ямы какой-то формы внутри ядра (рис. 4). Эти две области разделены потенциальным энергетическим барьером. Однако, согласно квантовой механике, не существует непроницаемых барьеров конечной высоты. Как световые волны и радиоволны проходят через любые поглощающие среды, пусть значительно ослабляясь, точно так же де-брой-

левские волны вероятности не могут быть изолированы в какой-либо области. Иначе говоря, частица, находящаяся внутри какого-либо барьера, всегда имеет вероятность прохода наружу, как бы сквозь «туннель», даже если у нее не хватает энергии для преодоления барьера по старым, недостаточно точным, классическим представлениям. Подсчеты вероятности α-распада в зависимости от ширины и высоты барьера, определяемых радиусами ядер и, в конце концов, их атомным весом и зарядом, оказались в полном согласии с опытными данными и позволили уточнить известное с 1912 г. эмпирическое соотношение, установленное сотрудниками Резерфорда Гейгером и Нэтоллом, связывавшее вероятность распада с энергией α-частиц. Конечно, никаких сведений о строении ядер или о внутриядерных силах теория α-распада дать не могла. Теория α-распада попрежнему формулировалась на основе старой модели ядра, представлявшегося состоящим из электронов и протонов. Сама α-частица считалась составленной из четырех протонов и двух электронов. В дальнейшем выяснилось, что ни состав, ни строение α-частицы несущественны для основных выводов теории, связанной с квантовым «туннельным» эффектом. Однако детали теории α-распада, преимущественный распад тех или иных ядер, испускание частиц в тех или иных направлениях, конечно, существенно определяются структурой ядра, т. е., по современным данным, оболочечными эффектами и деформациями ядер.

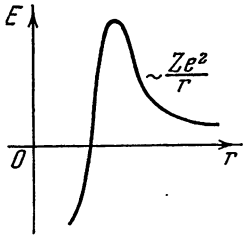


Рис. 4

На базе теории α-распада стало ясно, что бомбардировка ядер протонами, частицами единичного, а не двойного заряда будет более эффективной в смысле возможности проникновения частиц внутрь ядра и тем самым — вероятного расщепления ядер. Внимание физиков было привлечено поэтому к созданию ускорителей, способных разгонять протоны до больших энергий.

Подходя в цепи исторических событий к 1932 г., явившемуся переломной датой, мы должны сосредоточить внимание на обстоятельствах, подготовивших окончательное открытие нейтрона. Обстреливая ядра бериллия (изотоп Be^{9}_{4}) α-частицами, немецкий физик Боте в 1928 г. заметил возникновение нейтрального проникающего излучения, которое было вначале принято за γ-лучи. Однако эксперименты Фредерика и Ирен Жолио-Кюри показали, что лучи Боте обладают способностью сообщать заметный импульс протонам при столкновении, что было бы возможно лишь для γ-лучей огромной энергии, около 1 миллиарда электронвольт, сравнимой с энергией покоя протонов.

Испускание подобных γ-лучей ядрами, конечно, совершенно исключается: энергии γ-лучей, как и других ядерных излучений, лежат в области сотен тысяч и миллионов электронвольт. Даже такой мощный процесс, как деление ядер урана (U_{92}^{235}) освобождает энергию только около 150 *Мэв*.

Парадоксальность эффекта Жолио-Кюри была разъяснена в начале 1932 г. Чадвиком, который допустил, что «лучи Боте» являются отнюдь не γ-лучами, но нейтральными частицами, нейтронами сравнимыми по массе с протонами. Несомненно, смелая интерпретация Чадвика была наиболее естественной именно в Кэмбридже, где, как мы указывали, давно уже была высказана гипотеза о возможности существования нейтронов. Анализ столкновений нейтронов с протонами действительно привел Чадвика к определению массы новых частиц, оказавшейся порядка массы протона. Было выяснено, что нейтрон тяжелее протона и разность их масс больше массы электрона. Лучшими значениями масс являются сейчас величины $M_n = 1{,}0089\ 861$, $M_p = 1{,}0075\ 964$ (в атомных единицах массы; за единицу принята $^1/_{16}$ массы главного изотопа кислорода O_8^{16}). По отношению к массе электрона масса протона равна 1836,12, а масса нейтрона — 1838,65.

Вскоре было обнаружено возникновение нейтронов из других ядер, и возник вопрос об их роли в строении всех атомных ядер, а также об их природе. Первоначальные схемы строения ядер после открытия нейтрона попросту добавляли эти частицы к протонам и электронам, из которых, как тогда предполагали, построены ядра. Выдвигались гипотезы, согласно которым либо нейтрон предполагался состоящим из протона и электрона, либо протон из нейтрона и позитрона (Оже, Ф. Перрен). Ф. Перрен и Оже предложили считать наличие электронов в ядрах K_{19}^{40} сверх протонов и нейтронов ответственным за β-распад. Дирак присоединился к этому предложению. С другой стороны, нами в первой половине 1932 г. была выдвинута гипотеза, что атомные ядра состоят только из тяжелых частиц (нуклонов) — протонов и нейтронов, без всякого участия легких частиц (лептонов): электронов или позитронов. Испускание же электронов при β-распаде было предложено истолковывать как порождение этих частиц. Кроме того, мы указали, что как протон, так и нейтрон являются элементарными частицами и не состоят один из другого либо из других частиц в форме, сохраняющей их индивидуальность. В дальнейшем все эти предположения подтвердились и легли в основу современных представлений о составе атомного ядра.

Установление нейтронно-протонного состава атомного ядра было подготовлено анализом противоречий, к которым

приводила предыдущая протонно-электронная модель ядер. Действительно, комбинируя ядра из протонов и электронов, не удавалось получить правильные значения спина, т. е. собственного момента количества движения ядер, а также объяснить их статистические свойства (бозевские или фермиевские) и понять малые значения их магнитных моментов. Постепенно стало складываться представление (Гайтлер, Герцберг), что электроны в ядрах как бы теряют ряд своих свойств (спин, магнетизм, статистические свойства). Со своей стороны, мы заметили, что электроны и другие подобные легкие частицы вообще не могут существовать в ядрах, в условиях весьма интенсивных силовых полей, и должны терять здесь не просто некоторые свойства, но вообще полностью лишаться своей индивидуальности. В конце концов критерием является оценка энергии связи $\mathscr{E}_{\text{pot}}$ по сравнению с собственной энергией частицы: mc^2. Если $mc^2 \ll \mathscr{E}_{\text{pot}}$, то частица теряет индивидуальность в данных условиях. Поскольку энергия связи в атомах и молекулах гораздо меньше $m_e c^2$, равной $0{,}5 \cdot 10^6$ *эв*, то электроны являются здесь реальными частицами; точно так же протоны и нейтроны с их собственной энергией около 930 *Мэв* сохраняют свою индивидуальность в ядрах, где энергия связи на одну частицу не превосходит 10 *Мэв*. Вместе с тем $m_e c^2 \ll 10 \cdot 10^6$ *эв*, что запрещает электронам находиться в ядрах.

Завершая этот предварительный анализ периода до открытия нейтрона, мы указали, что электроны должны быть как-то «приписаны» протонам. Дальнейшие размышления могли бы привести теоретиков к предсказанию нейтрона также и с этой стороны. Наиболее парадоксальным следствием нейтронно-протонного строения ядра показалось толкование испускания электронов при β-распаде как порождения этих частиц. Не забудем, что в то время еще не были открыты образование пар электронов — позитронов γ-лучами и обратная аннигиляция пар частиц с их превращением в γ-фотоны. Неудивительно поэтому, что при истолковании подобных взаимных превращений электронов, позитронов и фотонов, открытых в начале 1933 г. Блэккет и Оккиалини непосредственно ссылались на протонно-нейтронное строение ядра.

Вместе с тем вызвало споры также утверждение об элементарности нейтрона. Однако допущение наличия «внутри» нейтрона электрона вновь привело бы нас к прежним трудностям с электронами внутри ядер. Гейзенберг, первым из крупных западных физиков присоединившийся к нуклонной модели ядер, вскоре оставил свое ошибочное допущение о сложном характере нейтрона и, в частности, попытки расчета рассеяния света на ядрах как взаимодействия фотонов с «внутринейтронными» электронами.

Следует пояснить, что новая модель ядра непосредственно объясняет общие закономерности спинов, магнитных моментов и статистики ядер. Действительно, число нуклонов равно в круглых числах атомному весу (массовому числу) A, следовательно, при четном A ядро будет удовлетворять, в согласии с опытом, статистике Бозе и иметь целый спин; при нечетном A мы будем иметь статистику Ферми и полуцелый спин ядер, так как протон и нейтрон обладают спинам $^1/_2$ с компонентами спина $s_z = \pm\, ^1/_2$ каждый и подчиняются каждый статистике Ферми. Так как число протонов равняется заряду ядра, то число нейтронов определяется разностью $N = A - Z$. Поскольку N вообще порядка Z или чаще всего превышает его, то ясно, что первый донейтронный период ядерной физики следует рассматривать как в значительной степени предварительный. Из него в свою очередь, разумно выделить период от обнаружения естественной радиоактивности до открытия ядра (1896—1911).

После массы и спина, важным свойством нейтрона, как и протона, являются магнитные моменты. Косвенные определения последних из магнитных моментов ядер не очень точны ввиду отсутствия завершенной теории ядерных сил и приближенного характера расчетов структуры ядер. Различные весьма точные прямые измерения магнитных моментов протона и нейтрона привели к значениям $\mu_p = +\,2{,}792743\ \mu_0$, $\mu_n = -\,1{,}913138\ \mu_0$ где ядерный магнетон $\mu_0 = eh/4\,\pi Mc$ (M — масса нуклона). Весьма существенна нестабильность нейтрона, самопроизвольно превращающегося в протон с порождением электрона и нейтрино (точнее говоря, антинейтрино) с вероятностью, характеризуемой средним временем жизни около 12 *мин.* Процесс распада свободного нейтрона: $n \to p + e^- + \bar{\nu}$ будет рассматриваться позднее в параграфе, посвященном нейтрино. Распад свободного нейтрона наблюдается в прямых экспериментах. Нейтроны в радиоактивных, возбужденных ядрах также переходят в протоны, согласно такой же реакции, хотя время жизни радиоактивных ядер, конечно, определяется структурой ядер, а не временем жизни свободных нейтронов. Как для всех частиц полуцелого спина $s = (^1/_2)(h/2\pi)$, поведение нейтрона описывается спинорными волновыми функциями, удовлетворяющими уравнению Дирака, так же как для электрона и протона. С электромагнитным полем нейтрон взаимодействует благодаря своему магнитному моменту. С полем π-мезонов нейтрон, как и протон, взаимодействует благодаря наличию у него особого мезонного квазизаряда g. Этого вопроса мы коснемся позднее в параграфе о мезонных и ядерных силах. Наконец, отметим, что близость протона и нейтрона по массам, по характеру взаимодействия с π-мезонами, взаимная их пре-

вращаемость при β-распаде и другие свойства заставляют предположить глубокое внутреннее родство обоих нуклонов. Ныне они рассматриваются как два «изотопических» состояния одной и той же частицы — нуклона. Изотопических свойств частиц мы еще коснемся несколько подробнее в отдельном параграфе.

Хотя нас здесь интересуют прежде всего свойства нейтрона как одной из элементарных частиц, но, поскольку нейтрон по преимуществу является ядерной частицей, необходимо хотя бы совсем кратко осветить современное понимание атомного ядра. Таким образом мы подойдем также к предсказанию и открытию других элементарных частиц: нейтрино и частиц мезонного типа.

Возвращаясь к ситуации 1932 г., укажем, что кроме принципиального перелома в ядерной физике, связанного с открытием нейтрона и установлением его роли в ядре, в это же время были созданы новые мощные средства исследования ядер в виде ускорительных установок. Весной 1932 г. сотрудники Резерфорда Кокрофт и Вольтон построили ускоритель типа каскадного генератора постоянного напряжения, используя систему трансформаторов, конденсаторов и кенотронов. С его помощью удалось впервые ускорить протоны до энергий порядка многих сотен тысяч электронвольт и впервые расщепить ими ядра лития согласно реакции

$$\mathrm{Li}_3^7 + \mathrm{H}_1^1 \rightarrow 2\mathrm{He}_2^4 .$$

Эта реакция интересна своим большим энергетическим выходом, так как α-частицы разлетаются с энергией около 17 *Мэв*. В конце 1931 г. Ван де Грааф сконструировал электростатический высоковольтный генератор. Однако обе указанные системы не позволяют далеко продвинуться вверх по шкале энергий. Решительный успех принесла идея Лоуренса ускорения частиц в циклических машинах — циклотронах (1932). Ускорение производится здесь переменным электрическим полем, под действие которого попадает частица, совершающая движение по круговой орбите в постоянном магнитном поле. С помощью циклотронов удалось в конце 30-х годов достичь энергии около 45 *Мэв* для α-частиц и более 20 *Мэв* для дейтронов — ядер тяжелого водорода, что позволило исследовать громадное число ядерных реакций. На долю циклотронов выпала львиная доля работы по расщеплению ядер в первое десятилетие современной ядерной физики. В дальнейшем были построены циклические ускорители электронов (бетатроны, синхротроны) и ускорители нового типа для протонов (синхроциклотроны, протонные синхротроны), а также линейные ускорители для легких и тяжелых частиц.

§ 7. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНОВ

Обратим теперь внимание на то, что ядерная физика и физика элементарных частиц, начиная с того же замечательного 1932 г., оказались связанными самым тесным образом с исследованием космических лучей, в которых разыгрываются процессы огромной энергии. Примерно за двадцатилетие с 1932 г. до начала 50-х гг. именно в космических лучах были открыты все новые элементарные частицы: позитрон (e^+), заряженные $\mu^{\pm}$-мезоны (мюоны), заряженные и нейтральные π^+-,π^--,π^0-мезоны (пионы), некоторые тяжелые K-мезоны и первые гипероны, (Λ,Σ,Ξ), превышающие по массе нуклоны. Лишь в середине 50-х гг., т. е. в наши дни, постройка весьма мощных ускорителей позволила открыть новые элементарные частицы в земных лабораторных условиях: антипротон ($\bar{p}$), антинейтрон ($\bar{n}$), новый мезон из группы K-мезонов — долгоживущий θ_2^0-мезон. Напомним также, что первые три элементарные частицы — электрон (e^-), протон (p) и нейтрон (n) были также открыты в лабораторных условиях.

Для того чтобы понять события второй половины 30-х годов в области космических лучей, необходимо коротко напомнить об их истории. Еще в первые годы исследования естественной радиоактивности были замечены излучения, не связанные с радиоактивными элементами. Постепенно выяснилось наличие потока какого-то ионизирующего излучения, идущего из высших слоев атмосферы. Измерения, проделанные Гессом в 1909 г. при подъемах на воздушных шарах, позволили с окончательной достоверностью заключить о существовании космических, или «высотных», как тогда говорили, лучей, падающих на землю из мирового пространства. Эти наблюдения по справедливости считаются рубежом в открытии нового излучения. Следует признать, что никакого особого впечатления это — как выяснилось впоследствии — весьма фундаментальное открытие не произвело. Долго еще, вплоть до 1932 г., изучение космических лучей находилось вдали от фронта науки и никак не было связано с коренными вопросами того времени, т. е. установлением модели атома, разработкой его квантовой теории, теорией излучения и другими.

Изучение космических лучей, производившееся сперва только при помощи ионизационных камер, скорее относилось к особой главе метеорологии. Даже самый факт наличия космических лучей неоднократно подвергался сомнениям, например таким крупным ученым, как Милликен (США), в 20-х гг., когда после первой мировой войны были возобновлены научные работы в этой области. Открытие барометрического эффекта, т. е.

влияния давления на интенсивность космических лучей и изучение последних на разных глубинах под водой, проделанные Л. В. Мысовским в Ленинграде, сыграли заметную роль в своеобразном вторичном переоткрытии космических лучей. Существенный шаг вперед в их изучении был сделан применением для регистрации счетчиков на совпадение (Боте и Кольхерстер) и получением первых фотографий космических лучей в вильсоновой камере (Д. В. Скобельцын, 1928).

О природе космических лучей шли большие споры. Высказывались без достаточных оснований идеи о том, что это есть поток γ-лучей (Милликен), или поток быстрых электронов. Об энергии первичных космических лучей также имелись самые неопределенные сведения. Удачная попытка голландского физика Клэя обнаружить изменение интенсивности космических лучей под влиянием магнитного поля Земли, производя измерения на разных широтах, осталась без внимания ввиду противоречивости других наблюдений. Все же в 1932—1933 гг. удалось, наконец, благодаря ряду новых работ вывести физику космических лучей из этого, довольно неопределенного состояния.

Во-первых, организованные под руководством А. Комптона многочисленные экспедиции в различные места земного шара с бесспорностью подтвердили геомагнитный эффект, проявляющийся в уменьшении интенсивности в экваториальных широтах по сравнению с полярными примерно на 10%. Этим было доказано наличие в первичном космическом потоке заряженных частиц, отклоняющихся под действием магнитного поля Земли. Этот геомагнитный эффект более ярко выражен на полярных сияниях, связанных с гораздо более медленными электронами и резко концентрирующихся на северных широтах. В дальнейшем был открыт восточно-западный эффект, указывающий на преобладание положительных частиц, и обнаружено влияние локальных магнитных аномалий и магнитного поля Солнца.

Во-вторых, усовершенствуя исследование космических лучей с помощью счетчиков, ионизационных камер и камер Вильсона, удалось накопить обширный материал, касающийся взаимодействия космических лучей с веществом. В особенности эффективным оказалось применение систем счетчиков на совпадение, регистрировавших прохождение заряженных частиц, и камеры Вильсона, помещенной в сильные магнитные поля, например до 20 000 *эрстед*. Английский физик Блэккет вместе с итальянским ученым Оккиалини (Манчестер) сконструировали камеру Вильсона, управляемую счетчиками, иначе говоря, стали получать фотографии не наудачу, а лишь в случае прохождения реальных заряженных космических частиц.

Новые технические средства не замедлили принести фун-

даментальные результаты. Осенью 1932 г. Андерсон заметил на фотографиях в камере Вильсона следы частиц, во всем подобные электронным, но отклонявшиеся в магнитном поле в обратную сторону, т. е. принадлежавшие положительно заряженным частицам (позитронам). Несколько неуверенные выводы Андерсона (не опубликовавшего сперва даже фотографий) были полностью подтверждены Блэккетом и Оккиалини в начале 1933 г., открывшими многочисленные случаи прямого порождения пар электронов и позитронов при взаимодействии космических γ-фотонов с ядрами. Название «позитрон» получила новая элементарная частица, во всем подобная электрону, но положительно заряженная. Блэккет и Оккиалини получили замечательные фотографии целых «ливней» электронов и позитронов. Оказалось, что подобные каскадные ливни являются характерным признаком прохождения электронов — позитронов и фотонов через вещество. Работа Блэккета и Оккиалини вызвала сенсацию в научном мире, редкую даже для нашей эпохи, богатой крупными открытиями. Впоследствии старший автор П. А. М. Блэккет получил за нее Нобелевскую премию. Дело заключалось не только в обнаружении нового явления, воочию продемонстрированного на фотографиях. Речь шла вместе с тем о подтверждении первого весьма точного предсказания новой частицы, сделанной Дираком за два года до этого на основе релятивистской квантовой механики. При этом наиболее поразительным оказалось предсказанное новое свойство электрона и позитрона, заключающееся в их способности порождаться за счет энергии γ-лучей и уничтожаться с превращением в γ-фотоны. В науку окончательно было введено новое фундаментальное свойство всех частиц, связанное с их способностью к превращениям. Напомним, что в теории ядра β-распад был уже истолкован, как порождение электрона; однако в то время не существовало еще теории β-распада.

§ 8. СТРОЕНИЕ ЯДРА И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Возвращаясь к ядерной физике 1932—1933 гг. прежде всего коротко отметим дальнейшие этапы ее развития. После открытия нейтрона и установления состава ядер фундаментальным событием явилось открытие искусственной радиоактивности и позитронного распада некоторых ядер. В обычных стабильных ядрах соблюдается закономерное соотношение между числом нейтронов и протонов. Избыток нейтронов побуждает ядро увеличить число протонов, т. е. избавиться от отрицательного заряда путем порождения электрона, иначе говоря, приводит к обычному β-распаду. С другой стороны, избыток про-

тонов, или недостаток нейтронов должен привести к испусканию ядром положительного заряда. Супруги Жолио-Кюри в начале 1934 г. действительно обнаружили позитронный радиоактивный распад некоторых вновь полученных изотопов, обладавших избытком протонов по сравнению с нормальными. Например, путем бомбардировки бора α-частицами было получено ядро азота N_7^{13}, в котором недоставало нейтрона по сравнению со стабильными изотопами N_7^{14}, N_7^{15}. Подобные ядра азота N^{13} распадались со средним временем жизни около 13 *мин.* по реакции

$$N_7^{13} \rightarrow e^+ + \nu + C_6^{13}.$$

Справа мы приписали новую частицу нейтрино (ν), о которой будет идти речь позднее. У тяжелых ядер с позитронным распадом конкурирует другая возможность для ядер уменьшить свой заряд, связанная с захватом внешних атомных электронов. Открытый Альварецом захват ядрами электронов чаще всего происходит с ближайшей *K*-оболочки и носит поэтому название *K*-захвата.

С другой стороны, бомбардируя ядра нейтронами, можно создать изотопы с их избытком. Многие подобные ядра действительно были получены Ферми и его сотрудниками (Сегре, Разетти, Амальди, Понтекорво и др.) в Риме в 1934 г. За эти работы супругам Жолио-Кюри, а также Ферми были присуждены Нобелевские премии.

Расщепление ядер разными способами путем бомбардировки их протонами, нейтронами, дейтронами, α-частицами, γ-лучами, позднее мезонами и гиперонами позволило получить огромное число новых изотопов и приготовить последние недостающие элементы периодической системы Менделеева с атомными номерами: $Z = 43$ (технеций, Сегре и сотр.), $Z = 61$ (прометий, Сегре и сотр.), $Z = 85$ (астатин, Сегре и сотр.), $Z = 87$ (франций, Пере). Нейтронная бомбардировка урана — последнего из известных тогда элементов — дала сложную картину разнообразных продуктов и была расшифрована лишь в самом начале 1939 г. на базе работ групп Ферми, И. Кюри и Савича, Л. Мейтнер и, главным образом, решающих экспериментов Хана и Штрассмана (Берлин), открывших в продуктах деления криптон и барий. Последний шаг в интерпретации был сделан Мейтнер и Фришем, заметившими, что речь идет здесь о делении ядра урана на две примерно равные части.

Вскоре Ф. Жолио обнаружил испускание примерно 2,5 нейтронов в каждом акте деления изотопа U^{235}; Г. Н. Флеров и К. А. Петржак в ленинградской лаборатории И. В. Курчатова открыли самопроизвольное деление ядер урана, происходящее

с весьма малой вероятностью, соответствуя среднему времени жизни около 10^{16} лет (тогда как по отношению к α-распаду среднее время жизни урана всего около 10^9 лет).

Кроме урана, удалось обнаружить деление многих изотопов протактиния, тория и новых трансурановых элементов, как спонтанное, так и происходящее под действием бомбардировки нейтронами, протонами, α-частицами, γ-лучами, мезонами, электронами.

Один из возможных процессов деления на более легком изотопе урана идет по схеме

$$U_{92}^{235} \rightarrow Ba_{56} + Kr_{36} + (2 \div 3)\, n.$$

Осколки деления, в данном случае ядра Kr и Ba, разлетаются с огромной кинетической энергией (около 150 *Мэв*). Основы теории деления были разработаны Я. И. Френкелем, Н. Бором и Дж. А. Уилером на базе феноменологической трактовки ядра. Таким образом, каждый затраченный на деление нейтрон не только восстанавливается, но и дает добавочные нейтроны, которые в свою очередь могут вызвать деление у соседних ядер урана. Это возбудило надежду осуществить в подходящих условиях самоподдерживающуюся ядерную цепную реакцию. Первые расчеты ее были проделаны Ф. Перреном, а также Я. С. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном в 1939—1940 гг. Начавшаяся вторая мировая война задержала развитие работ по осуществлению цепной ядерной реакции в лаборатории Ф. Жолио и его сотрудников Коварского и Альбана. Первый ядерный реактор, в котором была осуществлена подобная реакция, был построен в Чикаго в начале декабря 1942 г. под руководством Э. Ферми.

В дальнейшем эти фундаментальные исследования привели к прямому использованию ядерной энергии, в частности, на первой атомной электростанции, мощностью 5000 *квт*, построенной в Советском Союзе в 1954 г., на построенной впоследствии английской атомной электростанции в Колдер-Холл, мощностью около 100 000 *квт*, на пущенной в 1958 г. в СССР новой атомной электростанции (проектная мощность 600 000 *квт*), на подводных лодках, ледоколах и т. д.

Летом 1945 г. в США были осуществлены также ядерные взрывы в так называемых атомных, точнее ядерных, бомбах, в которых используется процесс деления. В дальнейшем ядерные бомбы были изготовлены в СССР и позднее в Англии. Важнейший этап технических применений ядерной энергии начнется с осуществления в земных условиях термоядерных реакций, в которых используются не процессы деления тяжелых ядер, а синтез легких ядер. Подобные процессы, как было выяснено ранее, идут в недрах Солнца и других аналогичных звезд, где в результате последовательных реакций из четырех ядер

водорода, т. е. протонов, образуется ядро гелия и выделяется энергия около 30 *Мэв* на каждую α-частицу.

В странах передовой ядерной техники ведутся важные и чреватые огромными техническими последствиями работы по получению регулируемых термоядерных процессов. Поскольку здесь «горючим» являются легкие элементы типа протонов (водород, тяжелый водород и другие), решение подобной задачи означало бы подлинную энергетическую революцию.

Однако даже пройденный к настоящему времени начальный этап технической ядерной физики (1942—1957) с ее прямым использованием энергии деления и получением различных ценных изотопов, дающих разнообразные излучения, применяемые в медицине, сельском хозяйстве, технике, науке, наряду с взрывными реакциями, во многих отношениях продвигает развитие производительных сил. Конечно, сколько-нибудь подробный анализ или изложение этих важнейших технических проблем выходят за рамки нашего обзора, посвященного принципиальным вопросам строения вещества, атомных ядер и элементарных частиц.

Наряду с делением урана, которое вызывается медленными нейтронами (на изотопе U_{92}^{235}), был исследован захват нейтронов более распространенным в естественных условиях изотопом U_{92}^{238}. Образованный подобным путем изотоп U_{92}^{239} испытывает β-распад и переходит в первый трансурановый элемент, нептуний (Мак-Миллан и Абельсон):

$$U_{92}^{239} \rightarrow e^- + \bar{\nu} + Np_{93}^{239}.$$

Нептуний опять-таки самопроизвольно превращается в новый элемент — плутоний:

$$Np_{93}^{239} \rightarrow e^- + \bar{\nu} + Pu_{94}^{239}.$$

Бомбардируя уран и вновь полученный элемент плутоний, обладающий долгоживущими изотопами, Сиборг с сотрудниками (Беркли, Калифорния) сумел получить подряд все трансурановые элементы вплоть до элемента с $Z = 101$ ($Z=95$— америций, $Z = 96$—кюрий, $Z = 97$— берклий, $Z=98$— калифорний, $Z = 99$ — эйнштейний, $Z = 100$ — фермий, $Z = 101$ — менделевий).

В 1958 г. Сиборг и сотр., продолжая эксперименты, начатые группой американских, английских и шведских ученых в 1957 г. в Нобелевском институте (Швеция), синтезировали элемент с $Z = 102$. Этот элемент удалось приготовить путем бомбардировки кюрия ($Z = 96$) ядрами углерода ($Z = 13$).

Изотоп U^{235} оказался наиболее подходящим для получения цепных ядерных реакций. Все без исключения изотопы транс-

урановых элементов оказались радиоактивными. Среди них многие испытывают спонтанное деление.

Исследование группы трансуранов показало, что электроны в их атомах заполняют оболочку $5f$, поэтому химические свойства их весьма близки друг к другу и подобны свойствам атомов редких земель (оболочка $4f$).

Интенсивная радиоактивность трансуранов сделала актуальным вопрос о границах менделеевской периодической системы элементов.

Остановимся коротко на этом вопросе, имеющем принципиальное значение. С одной стороны, у тяжелых элементов внешнеатомные, планетарные элементы подойдут слишком близко к ядру, что сделает возможным порождение пар электронов — позитронов.

Более важными являются чисто ядерные причины, препятствующие стабильности системы протонов и нейтронов. При увеличении заряда ядер кулоновское отталкивание протонов растет примерно как Z^2 и даже добавление новых нейтронов недостаточно, чтобы препятствовать нестабильности ядер. Со своей стороны лишние нейтроны приводят к β-радиоактивности и, находясь в ядрах в слишком большом количестве, приводят даже к нейтронному распаду. От излишнего заряда ядро стремится избавиться либо путем β^+-распада, K-захвата, либо путем столь частого среди естественно радиоактивных элементов α-распада. Среди самых тяжелых элементов весьма грозную опасность представляет спонтанное деление ядер на две, чаще всего сравнимые друг с другом части. Склонность к спонтанному делению определяется в основном отношением $f=Z^2/A$. Если $f \gtrsim 50$, то ядро спонтанно делится с большой вероятностью. Среднее время жизни у наиболее тяжелых из известных изотопов по отношению к делению уменьшается до нескольких дней и часов, даже для изотопов с наилучшей пропорцией нейтронов и протонов. Поэтому трудно ожидать приготовления сколько-нибудь стабильных ядер элементов с числом протонов Z больше 140—150.

§ 9. БЕТА-РАСПАД И НЕЙТРИНО

Набросав общую схему развития ядерной физики (открытие нейтрона в 1932 г., искусственной радиоактивности в 1934 г. и деления урана в 1939 г., создание уранового реактора и переход к техническим применениям, 1942 г.), мы должны сейчас остановиться на следующих принципиальных вопросах:

1) теория β-распада и предсказание нейтрино;

2) структура ядер, проблема ядерных сил и предсказание мезонов.

Можно сказать, что в первый свой период физика элементарных частиц была физикой атомной, квантовой (теория электрона). Во второй период элементарные частицы оказались связанными с ядрами (протон, нейтрон, нейтрино, позитрон, отчасти мезоны) и с космическими лучами (позитрон, мезоны, гипероны). Лишь в последние годы происходит своеобразное перемещение центра интересов, когда проблемы элементарных частиц, в узком смысле, выдвинулись на первый план, а собственно физика ядра и космических лучей стала играть в некотором смысле побочную роль, в том, что касается принципиальных вопросов строения вещества.



Рис. 5

Испускание ядрами β-частиц (как электронов, так и позитронов) есть весьма частое явление. Впервые β-распад был обнаружен у естественно радиоактивных элементов, у которых Резерфорд выделил α-, β- и γ-лучи. Затем с открытием искусственно наведенной радиоактивности удалось получить β-радиоактивные («ядерно-возбужденные») модификации, т. е. изотопы у всех без исключения химических элементов, начиная с водорода. Например, известно, что, кроме наиболее распространенного изотопа водорода с атомным весом около 1,008 (ядро представляет собой протон), существует стабильный тяжелый водород — дейтерий с весом около 2 (ядро — дейтерон — состоит из протона и нейтрона) и радиоактивный тритий с весом около 3 (ядро состоит из протона и двух нейтронов), распадающийся по схеме:

$$H_1^3 \equiv T_1^3 \rightarrow e^- + \bar{\nu} + He_2^3.$$

Еще до 1932 г. было замечено, что электроны из β-радиоактивных ядер данного сорта, например RaE, вылетают с разнообразными скоростями, в противоположность α-частицам, испускаемым всегда со строго определенными энергиями. Это обстоятельство даже дало повод предположить отсутствие сохранения энергии при β-распаде (Н. Бор). Однако, обнаружение верхнего предела допустимых для каждого изотопа энергий β-частиц нанесло удар гипотезе неограниченного несохранения, оставив, впрочем, вопрос о сохранении энергии внутри указанной области открытым. Попытка развить теорию процессов, основанных на несохранении энергии, и применить ее к свечению звезд оказались совершенно неплодотворными. Выход был найден Паули, выдвинувшим в 1931 г. гипотезу об испускании, наряду с электроном и, очевидно, позитроном, в случае β^+-распада, новой нейтральной частицы — *нейтрино* («маленький нейтрон»), которая, благодаря отсутствию

заряда и малой массе, крайне трудно наблюдаема и действительно до самого последнего времени ускользала от прямого наблюдения. Напомним, что нейтральные частицы непосредственно не регистрируются счетчиками, фотопластинками и не дают следов в камере Вильсона. Нейтроны легко обнаруживаются по их столкновениям с протонами или ядрами, в которых они вызывают известные реакции. Вероятность же захвата ядром нейтрино крайне мала, и нейтрино проходят большие толщи вещества, практически не взаимодействуя с ним. Вместе же электрон и нейтрино, точнее, антинейтрино, всегда уносят строго определенную энергию, соответствующую β-переходу данного ядра. После установления состава атомного ядра выяснилось, что испускание электронов или позитронов, согласно предыдущему — вместе с нейтрино, следует рассматривать как рождение новых частицу, согласно схемам превращения:

$$n \to e^- + \bar{\nu} + p,$$
$$p \to e^+ + \nu + n.$$

Здесь символом $\bar{\nu}$ обозначено антинейтрино, сопровождающее β^--распад, в отличие от нейтрино (ν), которое сопровождает β^+-распад; вопрос об отличии $\bar{\nu}$ от ν оставляем пока что открытым.

Конечно, позитронный распад может испытывать лишь возбужденный протон, находящийся в атомном ядре, тогда как электроны испускаются как свободными, так и возбужденными нейтронами. Из написанных реакций видно, что введение нейтрино необходимо также для выполнения закона сохранения момента количества движения, поскольку оба нуклона — протон и нейтрон — и оба лептона — электрон и позитрон — обладают спинами $^1/_2$ (в долях $\frac{h}{2\pi}$), и проекции спина на любое направление могут принимать значение $\pm^1/_2$. Позднее в опытах Аллена было показано, что K-захват атомных электронов ядрами, сопровождаемый отдачей ядер, также должен быть связан с испусканием нейтрино, без чего нельзя удовлетворить закону сохранения импульса. Все же подобных косвенных аргументов, связанных с законами сохранения, конечно, недостаточно, поскольку следует считаться с возможностью тех или иных модификаций обычных законов в области ядер или элементарных частиц.

Решающий успех гипотезе нейтрино принесло развитие теории β-распада, основанной на идее испускания в этом процессе двух частиц. Прежде всего Ф. Перрен показал, что самый факт порождения двух частиц качественно объясняет общую форму β-спектров; иначе говоря, вероятность испускания электронов той или иной энергии вплоть до максимальной. При переходе возбужденных ядер данного элемента в низшее состояние

в каждом акте испускается одна и та же энергия $E_{макс}$. Однако то или иное индивидуальное ядро испускает электроны различной энергии E по закону случая (рис. 5). Остаток же энергии $E_\nu = E_{макс} - E$ уносится нейтрино. Полная теория β-распада в основном была построена Э. Ферми в 1934 г. Ферми ввел понятие энергии взаимодействия нуклонов с электронно-нейтринным полем, характеризуемой новой константой связи g_F. Оператор энергии взаимодействия имеет вид:

$$U = g_F(\bar{\chi}\Omega\chi)(\bar{\psi}_\nu\Omega\psi_e) + \text{эрмит. сопр.},$$

где χ — обозначают волновые функции нуклонов,

ψ — волновые функции электронов (позитронов), нейтрино (антинейтрино),

Ω — некоторые матричные операторы.

Это выражение является обобщением привычной по форме энергии связи заряда с электростатическим полем:

$$U = e\varphi.$$

В данном случае константа g_F, оказавшаяся равной по экспериментальным данным $\sim 10^{-48}$ *эрг·см*^{3}, играет роль «заряда», а вместо скалярного потенциала φ стоит произведение волновых функций электрона (ψ_e) и нейтрино (ψ_ν), поскольку речь идет о взаимодействии с парами частиц; наконец, для точечного покоящегося нуклона $\chi^+\chi$ заменяется по существу единицей (точнее δ-функцией). Не входя в детали, напомним, что волновое дираковское уравнение электрона на самом деле описывает также позитроны, а волновая функция нейтрино одновременно учитывает также антинейтрино $\bar{\nu}$, сопоставляемое нейтрино аналогично тому как позитроны сопоставляются электронам (операция зарядового, или, лучше сказать, «античастичного» сопряжения). Вопрос о возможном отличии частиц и античастиц в случае нейтральной частицы нейтрино оказался весьма тонким. Напомним, что для нейтрона теория предсказала античастицу — антинейтрон $\bar{n}$, совпадающую по массе с нейтроном, но отличающуюся знаком магнитного момента. Однако никаких указаний на наличие магнитного момента у нейтрино нет. Ввиду этого итальянский физик Майорана некоторое время назад выдвинул предложение считать антинейтрино частицей, тождественной с нейтрино. Однако, это предложение, приводит к ряду неверных следствий (например, возможности безнейтринного двойного β-распада со значительной, до сих пор не наблюдавшейся вероятностью). Примером двойного β-распада, энергетически возможного явления, до сих пор с достоверностью не обнаруженного, могла бы служить реакция:

$$Ca_{20}^{48} \rightarrow Ti_{22}^{48} + 2e^- + (2\nu).$$

В последнее время (конец 1956 г. и начало 1957 г.) Ли и Янг, Салам и Ландау указали на возможность того, что у нейтрино спин будет всегда ориентирован параллельно направлению движения, а у антинейтрино — антипараллельно. С этим находятся в согласии новейшие эксперименты по β-распаду ориентированных ядер и распаду π- и μ-мезонов. Таким образом, обе частицы ν и $\bar{\nu}$ будут различимы. Следует отметить, что выражение Ω может быть составлено пятью разными способами из так называемых матриц Дирака, образуя скаляр, вектор, тензор, аксиальный вектор и псевдоскаляр. Выбор Ω для β-распада и распада π- и μ-мезонов до сих пор не произведен с полной достоверностью, хотя здесь в самое последнее время достигнуты значительные успехи.

Ли и Янг предложили дополнить каждый из пяти возможных членов, например, скалярный

$$C_S(\bar{\psi}_n\rho_3\psi_n)(\bar{\varphi}_\nu\rho_3\psi_e),$$

соответствующим членом, учитывающим несохранение четности, т. е. в данном случае псевдоскалярным:

$$C'_S(\bar{\psi}_n\rho_3\psi_n)(\bar{\psi}_\nu\rho_2\rho_3\psi_e).$$

Положив в основу указанное выражение энергии взаимодействия нуклонов с лептонами, оказалось возможным построить теорию β-распада электронного и позитронного, а также K-захвата в замечательном согласии с экспериментом; дать удачное объяснение различных деталей формы β-спектров, в частности вблизи границы и при малых энергиях; удалось также связать детали β-процесса с оболочечной структурой атомных ядер. Были объяснены правила отбора при β-распаде и обнаружено существование изомеров (метастабильных состояний), открытых Ханом среди естественно радиоактивных элементов и советскими физиками И. В. Курчатовым, Л. В. Мысовским, Л. И. Русиновым и Б. В. Курчатовым — среди искусственно радиоактивных.

Все перечисленные и другие достижения теории β-распада полностью основаны не только на самом факте существования нейтрино, но подразумевают его точную характеристику при помощи дираковских волновых, так называемых спинорных функций. Сравнение теории с опытом указывает, что масса покоя нейтрино весьма мала, во всяком случае не превышает 0,001 массы электрона и, скорее всего равна нулю.

В 1956 г. группе американских физиков (Коуэн и др.) удалось впервые обнаружить поглощение нейтрино (точнее, антинейтрино) веществом, используя мощный поток антинейтрино, которые, согласно предположению, искускаются вместе с элек-

тронами при разнообразных процессах, происходящих в ядерных реакторах. После экранирования нейтронов, γ-лучей и других нейтральных излучений Коуэну удалось наблюдать на детекторе ядерные реакции, совпадающие с теми, которые ожидались при поглощении антинейтрино. В опытах Коуэна (сотрудники Рейнес, Харрисон, Крузе и Макгайр) [3] использовался поток антинейтрино из реактора с U^{235} в качестве расщепляемого материала и наблюдалась реакция захвата антинейтрино протонами с последующим образованием нейтрона и позитрона

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+.$$

Эффективное сечение оказалось равным $\sigma \approx 10^{-44}\,см^2$, т. е. наименьшим из всех когда-либо обнаруженных на опыте. Эти тонкие эксперименты можно считать наиболее прямым доказательством существования частиц нейтринного типа, именно — антинейтрино.

С другой стороны, не удалось наблюдать реакции захвата антинейтрино ядром Cl^{37}_{17} с ожидаемым образованием аргона и испусканием электрона, которое сводилось бы к поглощению антинейтрино нейтроном. В случае окончательного подтверждения этот результат со своей стороны покажет отсутствие тождественности нейтрино и антинейтрино.

Несовпадение нейтрино и антинейтрино имеет место не только в обычной четырехкомпонентной теории, но также в предложенной Ли и Янгом, Саламом и Ландау двухкомпонентной теории нейтрино с массой, равной нулю.

В последнее время (1956 — 1957 гг.) удалось обнаружить нарушение пространственной зеркальной симметрии при β-распаде. Например, в опытах Ву с сотрудниками, в согласии с предсказанием Ли и Янга, была обнаружена асимметрия в количестве электронов распада от ориентированных ядер Co^{60}, наблюдаемых под углом φ и $180° - \varphi$, где φ — угол между ориентацией магнитного момента ядра и импульсом электрона. При этом большая часть электронов вылетает в направлении, противоположном ядерному спину. Значительная величина наблюдаемой асимметрии указывает, согласно теоретическим расчетам Ли — Янга — Эме, как на нарушение инвариантности относительно зеркальных отражений при β-распаде, т. е. на несохранение так называемой пространственной четности волновых функций, так и на нарушение инвариантности относительно зарядового сопряжения, т. е. на несохранение так называемой зарядовой четности. С другой стороны, при всех преж-

[3] См. Science, 124, 1956, стр. 103; перевод см. УФН, 62, 1957, стр. 391.

де известных электромагнитных процессах или ядерных явлениях, обязанных «сильному» взаимодействию с π-мезонами, имеет место сохранение как пространственной, так и зарядовой симметрии (четности). За фундаментальные работы, приведшие к открытию несохранения четности, китайские физики Ли и Янг получили в 1957 г. Нобелевскую премию.

Различают пространственную и временную четность. При инверсии координат ψ-функция или не меняется (четная функция), или меняет знак (нечетная функция). В этой связи различают обычные, трехмерные полярные вектора, компоненты которых меняют знак при инверсии координат, и аксиальные вектора, не меняющие при этом знака (псевдовектора или аксиальные вектора типа векторных произведений, которым можно сопоставить антисимметричный тензор 2-го ранга). При вращениях и лоренцовых преобразованиях вектора и псевдовектора преобразуются одинаково. Аналогично следует различать скаляры или инварианты от псевдоскаляров, меняющих знак при инверсиях. Волновые функции π-мезонов, например, оказались псевдоскалярами. Впервые на возможность псевдоскалярных мезонов указал Н. Кеммер.

Опыты Ледермана и Телегди с сотрудниками, которые обнаружили асимметрию в угловом распределении электронов распада от μ-мезонов, доказывают, что спин μ-мезона, возникшего при распаде π-мезона, был поляризован относительно направления движения и что четность и зарядовая четность в этих реакциях $\pi \to \mu \to e$, также обязанных «слабому» взаимодействию, не сохраняются. Одновременно в этих опытах было найдено, что значение магнитного момента положительных и отрицательных μ-мезонов равно в основном боровскому магнетону μ-мезона; при этом было также подтверждено значение спина μ-мезонов $s = {}^1/_2$ $(\mu_\mu = (1{,}0026 \pm 0{,}0009)\mu_0$.

Заметим, что вместе с тем относительно сохранения временной четности, еще нет достаточно определенных экспериментальных данных. Произведение пространственной и зарядовой четностей по-видимому сохраняется. Отметим, что при распаде гиперонов, например $\Lambda^0 \to p + \pi^-$, четность также не сохраняется, что доказывает ее несохранение при всех процессах, обязанным слабым взаимодействиям, независимо от участия в них нейтрино.

В трактовке, предложенной Ли и Янгом, внутренним свойством четности обладают сами частицы или характеризующие их волновые функции. В трактовке Кейза за несохранение четности ответствен характер взаимодействия частиц. Вместе с тем не исключено, как отметил, в частности, И. С. Шапиро, что несохранение четности связано со свойствами пространства на весьма малых расстояниях порядка длины, характерной для β-распада:

$$r_\beta = \sqrt{\frac{g_F}{hc}} \sim 10^{-16}\,см.$$

Так или иначе, было сделано фундаментальное открытие несохранения так называемой «четности». Речь идет сейчас о впервые обнаруженной неравноправности правой и левой стороны в пространстве.

Мы закончим краткое изложение предсказания, открытия и теории нейтрино ссылкой на значительную роль, которую эта частица играет в общем энергетическом балансе Вселенной. Можно подсчитать, например, что около 10% энергии Солнца, внутри которого идут термоядерные реакции, сопровождаемые β-распадом, уносится нейтрино и пока что, по-видимому, бесследно уходят за границы известной части Вселенной.

§ 10. ПРОБЛЕМА ЯДЕРНЫХ СИЛ. ПРЕДСКАЗАНИЕ И ОТКРЫТИЕ МЕЗОНОВ

После установления модели атомного ядра возник вопрос о структуре ядер, иначе говоря, о том или ином распределении нуклонов и силах, действующих между ними. Для ясности напомним, что вопрос о структуре атомов решался следующим образом.

После открытия наличия электронов во всех атомах и рассмотрения ряда предварительных моделей Ленарда, Нагаока и других, была предложена модель Дж. Дж. Томсона, в которой электрон считался погруженным в положительно заряженное вещество, разлитое по всему атому. Делались предположения о наличии магнитных сил в атомах (Ритц). В конце концов, как известно, прямыми экспериментами Резерфорд показал, что основная масса атома сосредоточена внутри атома в относительно малом объеме порядка $\sim 10^{-13}$ *см*, т. е. в атомном ядре. Электроны же движутся на значительных расстояниях ($\sim 10^{-8}$ *см*) вокруг ядра, притягиваемые к последнему электростатическими кулоновскими силами. Оказалось, что магнитные силы играют совершенно побочную, хотя и важную для выяснения деталей строения атома роль. Наиболее трудным в теории атома оказался вопрос о квантовых законах движения электронов. Как известно, после ряда предварительных работ Хааса, Шидлова, Никольсона и весьма удачной приближенной квантовой теории Бора (1913), лишь в 1926 г. была построена последовательная нерелятивистская квантовая механика, а в 1928 г. Дираком было установлено квантово-релятивистское уравнение движения электрона, объяснившее самые тонкие детали в поведении атомных и свободных электронов.

Развитие физики ядра шло иным путем. После установления его состава наиболее трудным оказался вопрос о силах, действующих между нуклонами, поскольку сомневаться в применимости к ним квантовых законов движения не было и нет оснований.

Свойства ядерных сил, выяснившиеся главным образом на основании анализа структуры простейшего ядра дейтрона, состоящего из протона и нейтрона, а также более сложных ядер и опытов по рассеянию протонов и нейтронов друг на друга, можно резюмировать следующим образом.

1) Ядерные силы являются короткодействующими, они резко обрываются на расстояниях порядка 10^{-13} *см*. 2) Ядерные силы являются спиновыми и вместе с тем нецентральными, зависящими не только от расстояния, но и от ориентации спина относительно радиус-вектора. 3) Ядерные силы после вычитания электромагнитных кулоновых сил оказались одинаковыми для любой пары нуклонов, находящихся в одинаковых спиновых состояниях. Иначе говоря, ядерные силы являются зарядовонезависимыми. Руководствуясь требованиями релятивистской инвариантности и опираясь на выводы полевой теории, можно удовлетворить всем указанным требованиям, подобрав некоторую феноменологическую форму ядерной потенциальной энергии. Кроме того, следует учесть наличие так называемой спин-орбитальной связи, которая оказывается существенной для объяснения структуры сложных ядер. Наконец, на самых малых расстояниях следует учесть наличие значительных сил отталкивания между нуклонами, обнаруженных впервые Ястровым при анализе рассеяния нуклонов.

В центральном вопросе современной ядерной физики — отыскании законов ядерных сил — сразу же наметилось два направления: 1) феноменологическое, вначале представленное, главным образом, Гейзенбергом и другими немецкими и американскими авторами, и 2) полевое направление, в первое время представленное главным образом советскими и японскими теоретиками.

Поскольку нейтрон не заряжен и является элементарной частицей, вопрос об обычных электрических силах между нейтроном и протоном отпадает. С другой стороны, кулоновское отталкивание протонов в ядрах играет весьма существенную роль. Хотя протон и нейтрон обладают магнитными моментами, однако магнитные силы далеко не достаточны для обеспечения энергии связи; кроме того, магнитные силы могут играть лишь вспомогательную роль, но сами по себе не в состоянии обеспечить стабильность какой-либо системы. Гравитационные силы между нуклонами несомненно имеют место, но ничтожно малы и могут не приниматься в расчет. Как известно, так назы-

ваемые химические силы, ван-дер-ваальсовские силы, силы трения, сцепления и т. д. — все в конце концов сводятся к электрическим взаимодействиям, уточняемым квантовой теорией, приводящей к эффективным обменным и статистическим силам.

Таким образом, в атомном ядре мы сталкиваемся с необходимостью допущения каких-то совершенно новых взаимодействий. С современной точки зрения мы обязаны ввести поле ядерных сил и отыскать единичные кванты или частицы этого поля, реализующие притяжение между протонами и нейтронами, подобно тому как кванты электромагнитного поля осуществляют кулоновское и другие электромагнитные взаимодействия. Физики, стоявшие на полевой точке зрения, начали настойчиво отыскивать подобное поле. Советскими физиками (Тамм, Иваненко, 1934) была предложена одна из первых полевых теорий ядерных сил. Эти работы были продолжены А. Соколовым, Вейцзекером, Вентцелем и др.

Согласно первой теории ядерных сил, ядерное поле реализуется через обмен лептонами: электронами и антинейтрино (или позитронами и нейтрино). Испущенные нейтроном электроны — антинейтрино могут поглотиться протоном; и обратно — нейтроны могут поглотить позитроны и нейтрино, испущенные протоном. В результате между нуклонами возникает взаимодействие, быстро убывающее с расстоянием (пропорционально r^{-5}). В дальнейшем была получена спиновая часть и предсказана нецентральная часть ядерных сил. Роль электронно-нейтринной теории, сыгравшей заметную роль как в ядерной физике, так и в общей теории взаимодействий и впервые показавшей возможность реализации силового поля частицами, обладающими массой покоя, оказалась весьма существенной. Однако полученные парные силы, хотя и обладавшие многими требуемыми свойствами ядерных сил, оказались по величине крайне незначительными, по крайней мере на обычных ядерных расстояниях порядка 10^{-13} *см*. Таким образом, вопрос об истинных свойствах ядерного поля оставался открытым.

Решающий шаг был сделан японским физиком Юкава, который продолжил упомянутые работы советских авторов и в известной мере предложил объединить пару частиц, выдвинув смелую идею о переносе ядерных сил новой, неизвестной еще в то время частицей — мезоном. Предварительные оценки Юкава давали для мезона массу порядка 200 масс электрона. Спин новой частицы предсказывался целым, благодаря чему оказывался возможным обмен единичными квантами. Предсказание Юкава получило известное подтверждение, когда в 1937 г. Андерсон вместе с Недермейером, а также Стрит и Стивенсон, обнаружили на вильсоновских фотографиях в проникающей компоненте космических лучей следы новых положи-

тельно и отрицательно заряженных частиц, названных мезонами, а позднее оказавшихся частным видом мезонов, именно μ-мезонами (или мюонами). Как μ^+-, так и μ^--мезоны являются радиоактивными частицами со средним временем жизни $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ *сек*. Их масса равна $m_\mu = 206\ m_0$ (m_0 — масса электрона).

Нейтральные мюоны до сих пор не обнаружены. Распад мюонов идет по схеме:

$$\mu^+ \to e^+ + \nu + \bar{\nu},$$
$$\mu^- \to e^- + \nu + \bar{\nu}.$$

Дальнейшее исследование свойств подобных «легких» мезонов показало, что они ни в коем случае не могут являться квантами ядерного поля. Действительно, спин μ-мезона оказался равным половине: $s = (1/2)\,(h/2\pi)$; следовательно, μ-мезоны не могут рождаться по одиночке и сами по себе не могут переносить ядерных взаимодействий.

Мюоны подчиняются уравнению Дирака подобно электронам и описываются спинорными функциями.

Как отмечалось, Ледерманом и Телегди недавно было обнаружено нарушение пространственной изотропии в распределении электронов распада от μ-мезонов, что, в согласии с предсказанием Ли и Янга, подтверждает несохранение пространственной и зарядовой четности в этих процессах, обязанных так называемым слабым взаимодействиям. Окончательная невозможность рассматривать μ-мезоны в качестве переносчиков ядерных сил была выяснена после экспериментов итальянских физиков Конверси, Панчини, Пиччони (1946), которые обнаружили весьма слабое взаимодействие μ-мезонов с атомными ядрами и сравнительно малую вероятность их поглощения нуклонами. Тем самым μ-мезонный «заряд» нуклонов оказывался слишком малым и неспособным обеспечить большую энергию связи нуклонов через мюоны. Для выхода из этого затруднения Саката и его сотрудники (Япония), с одной стороны, Бете и Маршак (США), с другой стороны, выдвинули идею существования иных мезонов, способных переносить ядерные силы в соответствии с гипотезой Юкава. Подобные «ядерные» π-мезоны (пионы) (π^+, π^-) были в самом деле обнаружены, опять-таки при исследовании потока космических лучей, английским физиком Пауэллом (Бристоль) в 1947 г. При этом впервые с большим успехом при анализе частиц с массой меньше нуклонной, был применен метод регистрации частиц в специальных фотоэмульсиях. Следует подчеркнуть, что применение специальных фотопластинок для регистрации редких явлений означало огромный технический прогресс в физике космических лучей, ядра и элементарных частиц и за последнее десятилетие позволило сделать

ряд крупных открытий. За открытие заряженных π-мезонов Пауэллу была присуждена Нобелевская премия. Несколько позднее (1950) были обнаружены нейтральные π^0-мезоны.

Существенные успехи принесло последующее исследование π-мезонов в ускорительных установках, позволившее получить интенсивные потоки частиц. Пионы рождаются при столкновении нуклонов друг с другом, а также, как позднее выяснилось, при распаде некоторых элементарных частиц (тяжелых мезонов и гиперонов). Являясь радиоактивными частицами, пионы распадаются. Заряженные пионы, превращающиеся в μ-мезоны согласно схемам $\pi^+ \to \mu^+ + \nu$, $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}$, обладают средним временем жизни $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ *сек*. Нейтральные пионы живут в среднем гораздо меньше (около 10^{-15} *сек*) и превращаются в электромагнитное излучение, т. е. γ-фотоны по схеме: $\pi^0 \to 2\gamma$. Эти γ-лучи при столкновении с ядром могут породить пару электрон — позитрон в потоке космических лучей; это косвенным образом помогло в советских и американских исследованиях навести на след непосредственно не регистрируемой нейтральной частицы. Масса заряженного π^+-мезона равна 273 m_0. Нейтральный пион имеет массу, равную 264 m_0. Спин всех пионов оказался равным нулю.

Весьма фундаментальным свойством всех π-мезонов является так называемый превдоскалярный характер их волновых функций. При всех преобразованиях переноса, вращениях, лоренцовых преобразованиях псевдоскаляры ведут себя подобно скалярам, т. е. не изменяются. С другой стороны, при зеркальных отражениях, или инверсиях координат ($x \to -x$; $y \to -y$; $z \to -z$) псевдоскаляр меняет знак. Аналогичным образом псевдовекторы отличаются от обычных векторов. Уравнения свободного псевдоскалярного и скалярного поля совпадают; для обоих типов функций в пустоте будет иметь место уравнение Клейна — Гордона. При наличии источников поля, например нуклонов, справа в уравнение нужно включить член типа $4\pi g\rho$, где g — квазизаряд, ρ — скалярная или псевдоскалярная плотность частиц, порождающих поле.

Таким образом, открытие π-мезонов явилось открытием не только первичных космических мезонов, дающих при последующем распаде начало μ-мезонам и фотонно-электронно-позитронному каскаду, но и квантов ядерного поля.

В противоположность μ-мезонам, электронам, позитронам, π-мезоны обнаруживают сильное взаимодействие с нуклонами. Они легко поглощаются нуклонами и относительно легко испускаются при подходящих условиях. Действительно, нуклоны всегда окружены π-мезонным полем, подобно тому как заряженная частица окружена электрическим полем, а магниты — магнитным полем. Как известно, при столкновении электронов,

например с ядром или в условиях рентгеновской трубки с атомами антикатода, электромагнитное поле, окружающее электрон, частично отрывается от него и излучается в виде γ-квантов, рентгеновских лучей или видимого света. Аналогичным образом, при столкновении нуклонов друг с другом или с ядрами поле π-мезонов также «отрывается» от нуклонов и излучается в виде квантов поля, являющихся, однако, частицами, обладающими массой покоя.

Если записать энергию связи нуклонов с π-мезонами в виде

$$U = g\Gamma\varphi,$$

(опуская несущественные сейчас для нас детали), где Γ — соответствующая матрица Дирака и φ — волновая функция мезона, то π-мезонный заряд нуклонов g оказывается большим, и при измерении в одинаковых единицах значительно превышает элементарный электрический заряд электронов и других элементарных частиц. Удобно вместо зарядов частиц или констант связи ввести соответствующие безразмерные величины. Вместо заряда электрона удобно рассматривать безразмерную постоянную, так называемую зоммерфельдовскую константу тонкой структуры

$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137{,}03}.$$

С другой стороны, соответствующая π-мезонам безразмерная константа

$$\beta = \frac{2\pi g^2}{hc} \sim 15.$$

Таким образом, π-мезоны, переносящие ядерные силы, действительно сильно связаны с нуклонами и способны обеспечить огромную величину ядерных взаимодействий, значительно превосходящих по интенсивности электромагнитные, гравитационные и все другие известные в природе силы.

В настоящее время принято различать четыре класса взаимодействий: 1) сильные, обусловленные π-мезонным полем (безразмерная константа, характеризующая силу связи, равна $(2\pi g^2/hc) \approx 15$; 2) электромагнитные, осуществляемые квантами электромагнитного поля (соответствующая константа $(2\pi g^2/hc) = (1/137{,}03)$; 3) слабые, обусловленные полем электронов — нейтрино. Они проявляются при β-распаде или распаде π-мезонов, μ-мезонов или в других аналогичных случаях с участием нейтрино, а также и без участия нейтрино, как, например, при распаде гиперонов и K-мезонов. Соответствующие безразмерные константы связи будут все очень малы ($\sim 10^{-11}$), притом практически совпадают друг с другом во всех случаях слабых взаимодействий; 4) гравитационные взаимодействия, являющиеся еще ме-

нее интенсивными, чем слабые взаимодействия; они определяются гравитационным «зарядом» $\sqrt{\varkappa}\, m$, где m — масса частицы, $\varkappa$ — гравитационная постоянная. Для самых тяжелых известных частиц, т. е. гиперонов, соответствующая безразмерная константа $(2\pi\varkappa M^2_Y/hc)$ будет порядка 10^{-48}.

§ 11. МЕЗОАТОМЫ

Различие в свойствах π-мезонов, сильно взаимодействующих с нуклонами, и ядерно-неактивных μ-мезонов ярко проявляется в поведении мезоатомов. Эти весьма интересные атомы содержат, кроме электронов на внешних оболочках, π- или μ-мезон. π-мезоатомы были открыты в 1952 г. Камаком и др.; μ-мезоатомы открыты Фитчем и Рэйнуотером. Наблюдались μ-мезоатомы различных химических элементов вплоть до μ-мезосвинца, а также многие π-мезоатомы.

Ввиду значительно большей массы мезонов по сравнению с электронами, их орбиты находятся гораздо ближе к ядру. В тяжелых атомах, где к тому же велики объемы ядер, π-мезоны движутся частично сквозь само ядро. При переходах из возбужденного состояния в нормальное мезоатомы испускают не видимый свет, но характеристические лучи, лежащие в рентгеновской области. Благодаря движению вблизи ядра, π- или μ-мезон в мезоатоме служит прекрасным средством исследования размеров и формы ядра. При этом μ-мезон, благодаря слабому взаимодействию с нуклонами, чаще всего распадается до захвата ядром, тогда как π-мезон, напротив, имеет большие шансы захватываться ядром до распада. Этот вывод непосредственно подтверждается большой шириной уровней π-мезонных атомов. Недавно Альварец с сотрудниками обнаружил возможность образования μ-мезомолекул и своеобразную каталитическую роль μ-мезонов, связывающих, например, протон и дейтрон в подобной молекуле, что позволяет заставить H^1_1 и D^2_1 прореагировать ядерным путем, без всякого «подогрева», необходимого при термоядерном синтезе легких элементов.

Осветив основные моменты открытия мезонов, вернемся к атомному ядру и проблеме ядерных сил. На первый взгляд казалось бы, что обнаружение агента, реализующего поле сил и его основных свойств, позволяет при мощных теоретических и математических средствах современной физики весьма быстро решить задачу вывода закона сил между нуклонами, осуществляемых π-мезонами. С принципиальной стороны, действительно, задание энергии связи нуклонов с полем заряженных и нейтральных мезонов в «симметричном» виде, требуемом соображениями инвариантности

$$U = g\gamma_5\tau\varphi$$

достаточно для вывода сил. Здесь g — константа связи, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = \varphi$ — псевдоскалярная волновая функция π-мезонов, т. е. три функции заряженных и нейтральных мезонов; τ — три матрицы так называемого изотопического спина, γ_5 (или ρ_2) — псевдоскалярная матрица Дирака. При этом, конечно, необходимо использовать уравнение для мезонных волновых функций в виде уравнения Клейна—Гордона:

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi} - \varkappa_0^2\varphi = 4\pi g\tau\rho,$$

где $\varkappa_0 = \frac{2\pi mc}{h}$ (m — масса мезона), ρ — плотность нуклонных источников, а также учесть бозевский характер статистики, которой подчиняются π-мезоны как частицы целого спина, равного нулю. На пути вывода ядерных сил стоит однако ряд существенных трудностей. Большое значение константы связи g делает не очень оправданным применение здесь обычного метода возмущений. Метод разложения по числу мезонов (метод Тамма — Данкова) также не дал ничего существенно нового. Кроме того, при испускании виртуального («закулисного») мезона, переносящего взаимодействие, одним нуклоном и его поглощении другим, нуклоны должны испытывать отдачу, т. е. начать двигаться. Тем самым задача теряет статический смысл и требует введения релятивистских поправок.

Проблеме ядерных сил было посвящено громадное число работ как до выяснения существенной роли пионов, так и после их открытия. Результаты можно коротко охарактеризовать следующим образом. На сравнительно больших (по ядерным масштабам) расстояниях между нуклонами $\sim 10^{-13}$ *см* результаты полевой теории сил, вычисленной на базе мезодинамики пионов, в основном соответствуют данным опыта.

Существенным является то, что вместо закона силы ньютоновского типа с потенциальной энергией $V_N = -\frac{\varkappa mM}{}$, где $\varkappa$ — гравитационная конспекта, mM — массы тел, или кулоновского типа $V_C = \frac{e_1e_2}{r}$, где e_1 и e_2 — заряды, r — расстояние между телами или частицами, получаются короткодействующие силы с энергией, определяемой в основном формулой

$$V \approx g^2\frac{e^{-\varkappa_0 r}}{r}\cdot F(r, \sigma),$$

резко убывающие на расстояниях $r > \frac{1}{\varkappa_0}$, превышающих комптоновскую длину волны мезона $h/2\pi mc \approx 10^{-13}$ *см*. Заметим,

что этот «юкавский» потенциал является решением статического уравнения Клейна — Гордона $\Delta\varphi - \varkappa_0^2\varphi = 4\pi g\rho$, где вместо распределения плотности ρ взят точечный нуклон $\rho = \delta(r)$.

Теория позволяет вычислить также требуемые опытом спиновые и нецентральные части ядерных сил, т. е. вид функции $F(r, \sigma)$.

Однако при сближении нуклонов начинают играть релятивистские эффекты, связанные со скоростью нуклонов, высшие поправки теории возмущений, нелинейные эффекты мезодинамики, и, по всей видимости, начинает давать себя знать структура самых нуклонов, которые на больших расстояниях можно было еще считать точечными, возможно начинает играть роль перенос сил K-мезонами. На самых близких расстояниях трудно или невозможно будет уже говорить о потенциале между нуклонами в обычном смысле. Все эти сложные обстоятельства до сих пор еще недостаточно учтены.

Очевидная сложность ядерных сил и некоторые трудности на пути построения законченной мезодинамики, частью свойственные также квантовой электродинамике, привели к необходимости временно вновь прибегнуть к установлению приближенных феноменологических моделей в теории ядерных сил, учитывающих полностью результаты полевой теории. В первые годы ядерной физики построение феноменологической теории представлялось более естественным, ввиду полного неведения относительно основного переносчика ядерных сил, т. е. π-мезонов. Тогда было выполнено большое число работ с пробными потенциалами, которые отражали наиболее ярко выраженные качества ядерных сил, в особенности их короткодействующий характер.

В заключение важно подчеркнуть, что проблема ядерных сил, являющаяся центральной во всей физике атомного ядра, не может быть решена без существенного привлечения новейших данных из физики элементарных частиц.

§ 12. МОДЕЛЬ ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ ОБОЛОЧКИ

Хотя нашей задачей сейчас не является сколько-нибудь подробное изложение различных вопросов ядерной физики, все же мы должны коротко остановиться на структуре атомных ядер. Независимо от общего интереса этой проблемы, она связана с вопросом о ядерных силах. Несмотря на отсутствие окончательных сведений о ядерных силах между двумя нуклонами, заведомая их сложность делает выяснение вопроса о распределении многих протонов и нейтронов в ядрах также очень сложным. Ввиду этого необходимо прибегнуть к каким-либо приближенным моделям, которые, по-видимому, сохранят свою

ценность даже после выяснения вопроса о ядерных силах. Напомним, что структура атомов является значительно более простой, поскольку в них имеется центральное тело в виде атомного ядра, в котором практически сосредоточена вся масса, а движение электронов регулируется в основном кулоновским законом.

Вскоре после установления состава атомного ядра были предложены две модели его структуры: 1) капельная и 2) оболочечная модель, согласно которой протоны и нейтроны движутся по некоторым индивидуальным орбитам и заполняют энергетические уровни, начиная с самых низших возможных, по две частицы с противоположными направлениями спинов на каждом уровне. Подобное заполнение уровней и целых групп уровней или оболочек весьма сходно заполнению энергетических уровней атомными электронами. Более того, подобно тому как заполнение целой оболочки электронами приводит к инертным газам He, Ar, Kr Xe, Rn, определяющим границы периодов менделеевской системы, мы вправе ожидать появления каких-то периодов и периодических свойств при заполнении протонами и нейтронами ядерных оболочек. Конечно, ввиду отличия ядерного поля, в котором движутся нуклоны, от атомного кулоновского поля длины периодов и номера изотопов, соответствующих инертным газам будут совсем иными. Только что изложенные идеи были высказаны уже в 1932 г. в зарубежных и советских работах. Тогда же были указаны значения Z и N для первых периодов, которым соответствует α-частица и ядро кислорода O_8^{16}. В пользу приведенных соображений говорило наличие периодичностей в виде явно выраженных максимумов на кривой энергии связи. Эти соображения были успешно развиты Эльзассером (1934), обнаружившим, на основании анализа энергий α-распада, новые границы периодов или, как их еще стали называть, новые «магические» числа, одинаковые для протонов и нейтронов: $N_m = Z_m = 50$, 82 и для нейтронов $N_m = 126$.

Постепенно выяснилось также магическое число $N = Z = 20$.

Вполне наглядно, без всяких добавочных пояснений можно отметить роль числа 82, которое соответствует ядрам Pb_{82} (свинца), на котором, как известно, кончаются каскадные естественно радиоактивные превращения всех трех семейств. Ясно, что ядро Pb_{82}^{208} отличается своей особой устойчивостью, свойственной заполнению оболочек протонов ($Z = 82$) и нейтронов ($N = 126$).

К сожалению, все эти идеи и, как выяснилось позднее, установление совершенно правильных магических чисел не вызвали в науке должного внимания. Ядерные периодичности относительно не так ярко выражены, как атомные, и аргументы в их пользу не казались сперва достаточно убедительными. Только

в 1948 г., благодаря накоплению огромного эмпирического материала, удалось с бесспорностью установить наличие ядерных периодичностей не только в кривых энергии связи и энергий распада, но также в кривой распространенности изотопов, в магнитных и спиновых моментах ядер, в энергиях α-распада, β-распада, в значениях электрических квадрупольных моментов ядер, в значениях изотопических смещений, в вероятности захвата нейтронов ядрами и т. д. и т. д.

Можно сказать, что в той или иной степени ядерные периодичности сказываются на всех свойствах атомных ядер. При этом, кроме главных магических чисел, одинаковых для нейтронов и протонов: 2, 8, 20, 50, 82 и для нейтронов 126, были обнаружены менее ярко выраженные магические числа, например, 14, 64, 152 (для нейтронов) и другие, исследование которых еще продолжается.

Наряду с эмпирическими исследованиями, важный шаг был сделан в связи с предложением учесть сильное взаимодействие между спиновым и орбитальным моментом (Гепперт-Майер, Йенсен, 1948). В конце концов оказалось, что даже простая модель эффективной потенциальной ямы (прямоугольной или параболической) дает правильный порядок уровней заполнения нуклонов, если учесть дополнительные сдвиги, обусловленные спин-орбитальной связью.

В общепринятых спектроскопических обозначениях для ядер имеем порядок уравнений: $1s$, $2p$, $3d$,... вместо атомного порядка для уровней электронов $1s$, $2s$, $2p$,..., где буквы s, p, d... обозначают квантовые числа момента количества движения $l=0$, 1 2..., а числа 1,2,3,... дают главные квантовые числа.

Представление об оболочечной структуре лежит в основе современной модели ядра. Однако ряд более тонких деталей, связанных с объяснением магнитных и квадрупольных моментов и положением энергетических уровней требует учета деформаций, в особенности, связанных с поверхностью ядер. Тем самым приходится в некоторой мере вернуться к другой приближенной модели ядер — жидко-капельной, которая также была выдвинута в первые годы ядерной физики и долгое время занимала основное место в научных дискуссиях. Речь идет о модели ядра как некоторой «капли жидкости», в которой происходит хаотическое движение нуклонов. Хотя, как мы видели, движение протонов — нейтронов в значительной степени является упорядоченным, все же представление о ядре, как капле жидкости, схватывает часть истины, подчеркивая роль деформаций. Модель капли особенно пригодна, а учет деформаций необходим для описания не основных, но возбужденных состояний ядер. Например, Я.И. Френкелю, Н. Бору и Дж. А. Уилеру удалось на подоб-

ной основе дать теорию важного процесса деления ядер урана.

Объединенная, или коллективная, модель ядра, учитывающая оболочечную структуру, а также деформации, была развита в последнее время О. Бором, Рэйнуотером, Уилером и др. Для более точного понимания ядерных процессов необходимо будет, по всей видимости, учесть наличие в ядрах некоторое число квазидейтронов, «α-частиц» и, возможно, других систем нуклонов. Недавно выяснилась желательность учета некоторого влияния «сверхтекучего» состояния, осуществляемого парами нуклонов, подобно тому, как «сверхтекучесть» пар электронов реализует сверхпроводимость в металлах, согласно Бардину — Куперу — Боголюбову. Резюмируя, можно сказать, что понимание ядерных сил и структуры ядер находится ныне в удовлетворительном состоянии. Даже менее точные сведения, имевшиеся лет 10—15 назад, оказались достаточными для того, чтобы осуществить контролируемые и взрывные цепные ядерные реакции на базе деления урана и плутония и перейти к техническому использованию ядерной энергии. Однако отыскание более точного закона ядерных сил остается важной проблемой.

§ 13. МИРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В настоящее время, как известно, конструирование ядерных реакторов разного типа достигло высокого уровня, и энергия, выделяемая при делении ядер, главным образом в виде кинетической энергии осколков деления, может быть использована технически для нагревания тех или иных теплоносителей и далее превращена в электрическую энергию обычным путем.

После первой советской ядерной электростанции был построен ряд более мощных станций и проектируются и строятся станции в сотни тысяч киловатт (СССР, США, Англия, Франция). Отдельные реакторы построены с помощью СССР в Чехословакии, Китае строятся в Польше, Югославии, Румынии, Болгарии, с помощью США в Италии, а также других странах. Ядерный реактор служит в основном следующим задачам. 1) В разнообразных научных целях используется интенсивный поток нейтронов и, в последнее время, поток нейтрино (точнее, антинейтрино) из реактора. 2) Нейтроны внутри реактора используются для возбуждения ядер всевозможных элементов, т. е. приготовления искусственно радиоактивных изотопов. Последние, в свою очередь, широко применяются в качестве меченых атомов в научных физических, химических, биологических, медицинских исследованиях, используются в качестве контрольных

средств и служат медицинским лечебным целям. Отметим непосредственное приготовление ценного элемента плутония в реакторах. 3) Те или иные типы реакторов используются в качестве тепловых установок.

Важным шагом явилось в начале 50-х годов нашего века осуществление взрывных реакций, основанных не на делении тяжелых ядер урана, плутония, а на огромном выделении энергии при синтезе ядер самых легких элементов: водорода, тяжелого водорода и других — в виде так называемой водородной бомбы (Советский Союз, США, Англия). Ввиду отталкивания положительно заряженных ядер для обеспечения синтеза применяется их «подогревание» при весьма высокой температуре, достигаемой с помощью взрыва затравочной обычной ядерной бомбы.

Важнейшей задачей новой ядерной техники является освоение контролируемых термоядерных реакций. Ввиду изобилия водорода в природе это означало бы энергетическую революцию невиданного масштаба. Как было выяснено, аналогичные реакции идут в недрах Солнца и других подобных ему звезд. К концу 1958 г., сначала в советских, а затем в других лабораториях, уже были получены путем пропускания мощного разряда через плазму, содержащую водород, температуры свыше миллиона градусов; при этом наблюдались нейтроны (И. В. Курчатов, Л. А. Арцимович и др.). Отсылая читателя за всеми подробностями к литературе, отметим лишь, что переход к техническому использованию ядерной энергии представляет собой замечательный пример быстрого внедрения научных достижений в технику. Если техника XVIII в. была основана на механике и учении о тепле, а в XIX в. успехи электромагнетизма привели к электротехнике и радиотехнике, то самые передовые области техники XX в. основаны на атомной и ядерной технике.

Остановимся кратко на основных технических средствах ядерной физики. Снача ла перечислим основные средства регистрации частиц.

1) Ионизационные камеры, в которых отмечается ионизация, вызванная заряженными частицами. Счетчики разных типов (Гейгера и др.) и батареи счетчиков, при прохождении которых заряженные частицы вызывают своеобразный разряд.

2) Камеры Вильсона разных типов, в которых заряженные частицы регистрируются по следам, состоящим из капель, осевших из пересыщенного пара в камере на ионах, образованных при прохождении частицы. Широко применяются непрерывно действующие диффузионные камеры, камеры перегороженные пластинками, в которых наблюдается взаимодействие

частиц с веществом. Камеры могут управляться счетчиками, прохождение частиц через которые служит сигналом для срабатывания (расширения) камеры. Применяется также стереоскопическое фотографирование следов в камере.

3) Для наблюдения элементарных частиц и ядерных процессов при больших энергиях недавно были применены изобретенные в 1953 г. Глэзером пузырьковые камеры, в которых следы частиц в виде пузырьков, вызванные прохождением частицы через камеру с перегретой жидкостью, регистрируются визуально или фотографически. В качестве рабочей жидкости применяется, например, пропан или жидкий водород.

4) Кроме газовых (вильсоновских) и жидкостных (пузырьковых) камер, для регистрации частиц используется способность частиц вызывать сцинтилляции (вспышки) в различных твердых телах. Затем фотоны попадают на фотоумножитель, который усиливает полученный сигнал.

5) Следы частиц непосредственно фотографируются в специальных крупнозернистых эмульсиях с большим содержанием чувствительного вещества.

Этот метод, который разрабатывали Л. В. Мысовский и А. П. Жданов (Ленинград), Блау и Вамбахер (Вена) был значительно усовершенствован в лаборатории Пауэлла (Бристоль, 1947) и в настоящее время является одним из основных способов регистрации. Его преимуществом является простота экспозиции, не требующей никаких добавочных приспособлений или механизмов. Частицы буквально сами себя фотографируют. Однако длина следов в эмульсии измеряется всего микронами, десятками и сотнями микрон, и их анализ требует тщательного кропотливого просмотра под микроскопом.

Перечислим теперь коротко основные средства ускорения частиц.

Каскадный трансформатор Кокрофта — Уолтона (1932) пригоден только для ускорения частиц в области до нескольких миллионов электронвольт. Его преимуществом является относительная простота; он применяется ныне в качестве вспомогательного средства для предварительного ускорения частиц при инжекции.

2) Электростатический ускоритель Ван де Граафа (1932) ускоряет частицы до нескольких миллионов электронвольт; его преимуществом является монохроматичность по энергиям.

3) Наибольшее распространение ныне получили циклические ускорители протонов и электронов. В ядерной физике наибольшее число работ в 30-е и 40-е годы было выполнено с циклотроном Лоуренса (1932), удостоенного за свое изобретение Нобелевской премии. Протоны, двигающиеся в специальной

камере, заворачиваются магнитным полем и подвергаются периодическим «толчкам» ускоряющего переменного электрического поля. Период обращения частиц постоянен, ибо из соотношения между центробежной силой и лоренцовской силой имеем

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e}{c} vH; \quad v = \omega r = \frac{erH}{mc}; \quad \omega = \frac{eH}{mc}.$$

Однако при увеличении скорости масса эффективно растет согласно релятивистскому соотношению

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

и частицы начинают запаздывать по сравнению с фазой электрического поля. Фактически в циклотронах была достигнута энергия до ~50 *Мэв*.

4) Выход из указанной трудности был предложен В. И. Векслером (Москва) и несколько позже Мак-Милланом (Калифорнийский университет), которые предложили применить в циклотроне переменное электрическое поле с медленно меняющейся частотой или магнитное поле, медленно меняющееся во времени. В подобных синхроциклотронах (или фазотронах) ускорению будет подвергаться не весь поток частиц, но зато некоторая доля частиц, которая благодаря своеобразной «автофазировке» сумеет попасть в правильный момент под толчки ускоряющего поля, будет ускорена до весьма высоких энергий. На этом принципе работают машины в области сотен миллионов электронвольт (США, СССР, Англия и др.). При его помощи удалось прорваться в мезонную область, получить в лабораторных условиях π- и K-мезоны, изучить их рассеяние, поглощение и образование мезоатомов.

5) Первый успешный ускоритель электронов (бетатрон) был сконструирован Керстом (США, 1941) после предварительных работ Видероэ, Я. П. Терлецкого и др. Здесь применяется переменное магнитное поле, а возникающее, согласно закону Фарадея, электрическое поле ускоряет электроны, инжектированные в вакуумную камеру. Специальный закон убывания магнитного поля с расстоянием от оси обеспечивает стабильность движения ускоренного электрона в течение сотен тысяч оборотов. В бетатронах удалось достичь энергии ~100 *Мэв* и использовать γ-лучи, возникающие при столкновении электронов с мишенью, для изучения фотоэффекта на ядрах, фоторождения мезонов и для целей дефектоскопии.

Бетатроны также имеют некоторый потолок работы, ибо быстро движущиеся, практически со скоростью света, притом с огромными ускорениями электроны будут интенсивно излучать электромагнитные волны (Иваненко, Померанчук, Соколов). Например, при энергии ~1 *Мэв* на один оборот потери энергии будут равны 25 *кэв*. При энергии в десятки миллионов электронвольт максимум излучения будет приходиться на видимую область, и оно может быть обнаружено даже визуально. Суть этого парадоксального видимого излучения, испускаемого электронами не атомными, а движущимися по орбитам с большим радиусом, в десятки сантиметров, заключается в релятивистском характере движения. Видимое излучение электронов, обусловленное отрывом поля при движении электронов, а не их столкновениями, наблюдалось в лаборатории Поллока в 1947 г. Следует заметить, что бетатроны в настоящее время изготовляются серийным путем и широко используются в научных, технических и медицинских целях.

6) Для того чтобы скомпенсировать потери на излучение, быстро растущие с энергией, необходимо включить добавочный радиочастотный промежуток и с его помощью сообщить ускоряемой частице дополнительную энергию. Модифицированный, в основном подобным путем, бетатрон, названный синхротроном, был предложен В. И. Векслером и Мак-Милланом и является в настоящее время эффективной машиной для ускорения электронов вплоть до области свыше 1 *Бэв* (два работающих ускорителя в США, строящиеся машины в Италии и других странах). В синхротронах, как и в синхроциклотронах, действует принцип автофазировки. Для продвижения к еще более высоким энергиям применяется магнитное поле особого вида («жесткая фокусировка»). При этом следует учесть также своеобразные квантовые эффекты, обусловленные отдачей, испытываемой электроном при излучении, разработанные, главным образом, советскими физиками (А. Соколов с сотрудниками и др.).

7) Синхротроны, как и бетатроны, в которых частицы ускоряются в течение огромного числа оборотов, оказались применимыми не только для ускорения электронов, но и протонов (протонные синхротроны). На этом принципе были построены рекордные для настоящего времени огромные дорогостоящие машины, ускоряющие протоны до энергий в 2,6 *Бэв* («Космотрон», США) (1 *Бэв* $=10^9$ *эв*) и 6,5 *Бэв* («Беватрон», США). С их помощью удалось изучить важнейшие процессы в области физики π-мезонов, K-мезонов и гиперонов, а также открыть новые частицы — антипротон, антинейтрон, θ_2^0-мезон. В 1957 г. в г. Дубна закончено сооружение ускорителя протонов до рекордной энергии 10 *Бэв*, который несомненно позволит продвинуться еще дальше в понимании структуры частиц. Осуществ-

ляются проекты аналогичных машин на 25 *Бэв* (Женева, Западно-Европейский ядерный центр), 30 *Бэв* (США) и 50 *Бэв* (СССР).

8) Наконец, следует упомянуть о классе линейных ускорителей, в которых частицы (электроны, протоны) могут ускоряться, например, «бегущей» электромагнитной волной. Наибольший из работающих ускорителей подобного рода в лаборатории Хофштадтера (Стэнфорд, США) позволил ускорить электроны до нескольких сотен миллионов электронвольт; при этом ускоренные электроны, легко выводимые наружу, в противоположность циклическим ускорителям, были применены для исследования структуры ядер и даже протона и нейтрона.

В настоящее время разрабатывается большое число новых остроумных проектов ускорения частиц в области десятков миллиардов электронвольт.

Перечислим вкратце основные события замечательного в истории физики 1947 года. В Колумбийском университете (Нью-Йорк) Лэмбом и Ризерфордом был открыт незначительный сдвиг атомных уровней электрона в атоме водорода по отношению к положению, предсказываемому теорией ($\Delta E_L = 1057,77$ *Мц/сек*). В той же лаборатории Куш и Фоли радиоспектроскопическим методом обнаружили небольшую «аномальную» добавку к магнитному моменту электрона, принимавшемуся ранее за боровский магнетон ($\mu_0 = eh/4\pi m_0 c$). Интерпретация этих открытий сдвинула с мертвой точки квантовую теорию поля и привела к созданию современной теории вакуума, значительно уточнив представления о взаимодействии частиц и полей, прежде всего заряженных частиц, с электромагнитным полем. Впрочем, бурное развитие теории поля (квантовой электродинамики) продлилось несколько лет, после чего здесь снова наступило известное затишье.

С другой стороны, физика элементарных частиц обогатилась в том же 1947 г. двумя открытиями новых элементарных частиц, сделанных в английских лабораториях. Как уже отмечалось, Пауэлл открыл π-мезон. Благодаря этому мезодинамика стала на твердую почву, и последующие годы были посвящены успешному исследованию взаимодействия пионов с нуклонами, в частности, рассеянию π-мезонов на ядрах и фоторождению π-мезонов. В том же 1947 г. Батлер в сотрудничестве с Рочестером (Манчестер, лаборатория Блэккета) открыл методом регистрации космических лучей в камере Вильсона первую сверхтяжелую частицу, или гиперон, именно — нейтральную Λ^0-частицу с массой около 2182 m_0, т. е. более тяжелую, чем протон и нейтрон. Указанные открытия, широкое применение метода специальных фотоэмульсий для регистрации

частиц и использование новых мощных ускорителей протонов и электронов, позволявших получать интенсивные пучки новых частиц,— все это привело в последующие годы к обнаружению и исследованию свойств других гиперонов и целого семейства «тяжелых», так называемых K-мезонов. Ввиду своих необычных свойств, потребовавших введения особой характеристики — числа S («странности»), K-мезоны и гипероны были названы странными частицами. К гиперонам относятся: Λ^0-частица (1947), Σ^+-частица с массой 2327 m_0 (открыта в 1953 г. Леви-Сетти и др.), Σ^--частица с массой 2340 m_0 (открыта в 1953 г. Леви-Сетти и др.). Наконец, сюда относятся также Σ^0-частица с массой порядка масс заряженных Σ-частиц (открыта в 1955 г.), Ξ^--каскадный гиперон с массой около 2586 m_0 (открыт в 1952—1954 гг.).

Все гипероны являются нестабильными частицами, обладающими средним временем жизни порядка 10^{-10} *сек* и распадающимися по схемам:

$$\Lambda^0 \to p + \pi^-,$$

$$\Sigma^- \to n + \pi^-.$$

$$\Sigma^+ \to n + \pi^+, \quad \Sigma^+ \to p + \pi^0,$$

$$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma,$$

$$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-.$$

Спин Λ^0-частицы и, по всей видимости, всех других гиперонов равняется $s=(1/2)$ $(h/2\pi)$; таким образом, гипероны описываются дираковскими спинорами. Другие сведения о гиперонах вместе с попытками построения их теории будут сообщены ниже.

Важным фактом явилось открытие возможности для Λ^0-гиперона находиться внутри атомного ядра, заменяя в известном смысле один из нейтронов (как было выяснено польскими физиками Данишем и Пниевским в 1953 г.). Дальнейшее изучение подобных гиперядер, или, как их еще называют, имея в виду образование этих систем как осколков при ядерных столкновениях, «гиперфрагментов», показало, что Λ^0-частица связывается в ядрах силами, по-видимому, близкими к обычным ядерным, хотя энергия связи ее меньше, чем энергия, приходящаяся на один нуклон в обычных ядрах. Были открыты гиперядра необычного типа: ${}_{\Lambda}H_1^4$ (сверхтяжелый изотоп водорода), ${}_{\Lambda}He_2^5$, наряду с тяжелыми ядрами, в которых нейтрон просто заменен гипероном, например ${}_{\Lambda}H_1^3$, и другие. Пока что известны гиперядра вплоть до азота.

Обратимся теперь к K-мезонам. После единичного наблюдения тяжелого мезона с массой около 900 m_0, сделанного Лепренс-Ренге в 1941 г. (Париж), начиная с 1949 г. в основном лабораторией Пауэлла был открыт ряд частиц с подобными массами. Позднее выяснилось замечательное обстоятельство равенства масс всех K-мезонов в пределах экспериментальной точности, вопреки первоначальным более грубым оценкам масс. Лучшее значение их масс можно считать равным 966 m_0. Отсюда, а также из близости других свойств K-мезонов возникла гипотеза, что здесь мы имеем дело с одной и той же частицей, которая, однако, способна распадаться различными способами.

Все K-мезоны радиоактивны и распадаются на две или три частицы (π, μ, e, ν), чаще всего со временем жизни порядка 10^{-8} *сек*. Лишь время жизни θ_1^0-частицы порядка 10^{-10} *сек*. Лучше всего изучены распады τ- и θ-частиц из группы K-мезонов:

$$K_{\pi 3}^{+} \equiv \tau^{+} \to 2\pi^{+} + \pi^{-},\ \tau^{-} \to 2\pi^{-} + \pi^{+};\ K_{\pi 2}^{0} \equiv \theta^{0} \to \pi^{+} + \pi^{-}.$$

Вообще же, как и следовало ожидать, лучше исследованы K^{+}-частицы, так как K^{-}-частицы сильно поглощаются ядрами. Известны далее следующие распады на две и три частицы:

$$K_{\pi 3}^{+} \to \pi^{+} + 2\pi^{0},\ K_{\pi 2}^{+} \equiv \theta^{+} \equiv \chi^{+} \to \pi^{+} + \pi^{0};$$
$$K_{\mu 3}^{+} \equiv \varkappa^{+} \to \mu + \nu + \pi^{0};\ K_{\mu 2}^{+} \to \mu^{+} + \nu;\ K_{e3}^{+} \to e^{+} + \nu + \pi^{0}.$$

Известны также аналогичные распады отрицательных частиц $K_{\pi 3}^{-}, K_{\pi 2}^{-}, K_{e2}^{-}$ и, по-видимому, также $K_{\mu 2}^{-}$, $K_{\mu 3}^{-}$. Наконец, недавно открытый группами Ледермана — Чиновского и Фрая θ_2^0-мезон из той же K-группы распадается на три частицы согласно реакции $K_2^0 \equiv \theta_2^0 \to \pi^{\pm} + \mu^{\mp} + \nu$ и, возможно, $K_2^0 \to \pi^{\pm} + e^{\mp} + \nu$ со временем жизни порядка 10^{-7} *сек*. Возможно имеются и другие способы распада или новые частицы K-группы.

Спин всех K-мезонов целый и равен нулю. В этой связи в последнее время (1956 г.) возникла интересная ситуация, поскольку те или иные K-мезоны (или единый K-мезон) способны распадаться как на два, так и на три π-мезона. Вместе с тем π-мезон, как отмечалось выше, является псевдоскалярной частицей, описываемой функцией, с внутренней четностью, равной -1, и со спином, равным нулю. Казалось бы, если K-мезоны все тождественны и только могут распадаться разными способами и если они должны обладать вполне определенной четностью ($+1$ или -1), то распад на две частицы (как в случае θ-распада) и вместе с тем в других случаях — на три частицы (как в случае

τ-распада), каждая из которых имеет четность — 1,—невозможен. Обсуждение этого парадокса привело сперва к некоторой гипотезе.

При распаде K-мезонов, а также в других случаях распадов, обусловленных «слабыми» взаимодействиями, четность не сохраняется (Ли, Янг). Эта возможность в настоящее время может считаться единственно правильной и подтвержденной опытом. Ввиду бесспорного сохранения четности во всех обычных атомных процессах и излучениях, обусловленных электромагнитными взаимодействиями, а также в связи с вероятным сохранением четности во всех процессах, обязанных «сильному» взаимодействию нуклонов и гиперонов с π-мезонами, оставался спорным лишь вопрос о сохранении четности при процессах, обусловленных слабыми взаимодействиями (β-распад, распад π- и μ-мезонов, распад K-мезонов и гиперонов). Эти процессы обладают относительно малой вероятностью и идут сравнительно медленно, если иметь в виду соответствующие масштабы времени. Таким образом, мы пришли к одному из самых интересных и фундаментальных по значению результатов современной физики элементарных частиц.

Как уже указывалось в параграфе, посвященном β-распаду и нейтрино, замечательное предсказание Ли и Янга относительно несохранения четности при β-распаде полностью подтвердилось. Кроме того, подтвердилось предсказание Ли и Янга о несохранении четности при распадах π- и μ-мезонов.

С другой стороны, вопрос о несохранении четности при распаде K-мезонов, послуживший исходным пунктом данной дискуссии, был выяснен окончательно лишь через год. Осенью 1957 г. выяснилось, что четность не сохраняется, или, иначе говоря, пространственная изотропия нарушается при распаде Λ^0-частиц (Стейнбергер, Глэзер и др.). В связи с этим отпала возможность того, что несохранение четности связано только с участием нейтрино. Сейчас очевидно, что оно имеет место во всех «слабых» взаимодействиях.

§ 14. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ. ТЯГОТЕНИЕ

Элементарные частицы, как и все вещество, движутся в пространстве и времени, изучение которых также является одной из основных задач физики. В основе классической физики лежало представление Ньютона об евклидовом пространстве и абсолютном времени, не зависящих друг от друга и от вещества. С другой стороны, движение вещества определялось свой-

ствами пространства и времени. Например, тело по инерции движется по прямой линии, кратчайшей в евклидовом пространстве. В области медленных по сравнению со скоростью света движений и пренебрежения гравитацией эти представления являются вполне пригодными. Однако в области быстрых движений, которые описываются релятивистской теорией, следует, как известно, учесть своеобразную тесную связь пространства и времени, образующих совместно четырехмерное многообразие. Все же и в этом случае пространство не зависимо от вещества. Если же учесть гравитационное поле, то, согласно общей теории относительности, начинает сказываться обратное влияние вещества на пространство — время, которое искривляется при наличии любого вида вещества. Впрочем, в области атомов, ядер, а также, во всяком случае, вблизи элементарных частиц гравитационными эффектами можно пренебречь. Остановимся сначала на основных свойствах пространства — времени, с которыми, как выяснилось, тесно связаны важнейшие законы сохранения энергии, импульса и другие.

Однородность пространства означает равноправность всех точек, иначе говоря, отсутствие центра. Следовательно, уравнения движения частиц в классическом или релятивистском приближении, а также уравнения квантовой релятивистской теории поля для всевозможных волновых функций должны быть инвариантными при сдвиге координат $x' = x + a$. Можно показать, что инвариантность относительно подобных смещений приводит к закону сохранения всех трех составляющих импульса (теорема Нетер). Время также не имеет начала отсчета, т. е. уравнения должны быть инвариантными относительно сдвига во времени $t' = t + t_1$. Это приводит, согласно теореме Нетер, к закону сохранения энергии. Далее, пространство является изотропным, лишенным каких-либо выделенных направлений. Отсюда следует инвариантность относительно поворотов координатной системы, например, в плоскости (xy):

$$x' = x\cos\varphi - y\sin\varphi;\quad y' = x\sin\varphi + y\cos\varphi$$

и т. д. Это приводит к закону сохранения момента количества движения. Эти законы сохранения были установлены в XVII—XIX вв. сперва для механических движений. Позднее выяснилась их универсальная значимость и связь со свойствами пространства — времени. Сохраняется не только механическая энергия, но также и энергия электромагнитного поля и всех других полей при всех превращениях и т. д. Аналогично сохраняется импульс и момент количества движения во всех возможных процессах и превращениях как макроскопического,

так и атомноядерного мира и в реакциях с участием элементарных частиц. В начале XX в. выяснилось, что уравнения движения должны быть инвариантны при переходе от одной системы координат к другой, равномерно движущейся по отношению к первой. Формулы преобразования были установлены Лармором и Лоренцом и для случая движения по оси X гласят:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z,$$

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Не только уравнения механики, но также электромагнитного поля, мезонного поля и всех других полей должны быть инвариантны относительно лоренцовых преобразований. Установление лоренцовых преобразований и соответственных обобщений уравнений механики и электродинамики с целью получения инвариантных соотношений было проделано при создании специальной теории относительности в 1905 г. (Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн). Позднее, в 1908 г., Минковский, развивая замечание Пуанкаре, показал, что время играет роль четвертой координаты и лоренцовы преобразования можно трактовать как вращение в четырехмерном мире.

Бесконечно малое расстояние (интервал) между двумя точками в подобном мире имеет вид:

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Инвариантности относительно лоренцовых преобразований соответствует обобщенный закон сохранения движения центра тяжести. Наконец, пространство и время обладают определенной симметрией. В пространстве не различается «верх и низ», «правая и левая сторона». Иначе говоря, уравнения должны быть инвариантны относительно зеркальных отображений (инверсий):

$$x' = -x,$$
$$y' = -y,$$
$$z' = -z.$$

Кроме того, все элементарные процессы обратимы, что связано с инвариантностью относительно инверсий времени, т. е. преобразования $t' = -t$. Инвариантность относительно инверсий, являющихся прерывными преобразованиями, ведет к сохранению особой величины — «четности» волновых функций. Очевидно, следует различать пространственную и временную четность. Как было указано в параграфах о нейтрино и мезонах, пространственная четность оказалась несохраняющейся в про-

цессах, обусловленных «слабыми» взаимодействиями, проявляющимися в β-распаде и распаде μ- и π-мезонов, а также K-мезонов и гиперонов. Во всех процессах, связанных с сильными взаимодействиями, реализуемыми полем π-мезонов, и электромагнитными взаимодействиями, реализуемыми электромагнитным полем, иначе говоря, во всех обычных внешнеатомных, молекулярных, химических и в большинстве ядерных процессов четность по-прежнему сохраняется.

Наряду со свойствами инвариантности, связанными с пространством — временем и соответствующими законами сохранения, имеются другие преобразования, оставляющие уравнения инвариантными, из которых вытекают новые законы сохранения. Фундаментальную роль играет калибровочное преобразование электромагнитных потенциалов:

$$A_x' = A_x + \partial f/\partial x \text{ и т. д.},$$
$$\varphi' = \varphi - \frac{1}{c}\frac{\partial f}{dt}.$$

При подобном преобразовании наблюдаемые напряженности электромагнитного поля не изменяются; следовательно, уравнения Максвелла остаются инвариантными. Для того чтобы обеспечить инвариантность квантовых уравнений Дирака для электрона, уравнения Клейна — Гордона для π-мезонов и других при калибровочном преобразовании потенциалов, необходимо подвергнуть волновые функции преобразованию: $\psi' = \psi.\exp\left[\frac{2\pi ief}{hc}\right]$ (калибровочное преобразование 2-го рода). Как оказывается, отсюда вытекает закон сохранения электрического заряда и тока.

Кроме того, в последнее время приобрел большое значение еще ряд преобразований, обеспечивающих инвариантность уравнений. 1) Речь идет о преобразовании зарядового сопряжения, при котором, например, с волновыми функциями электрона сопоставляется волновая функция позитрона (по существу функция, комплексно сопряженная исходной). Иначе говоря, уравнения должны быть инвариантны при замене частиц античастицами при соответствующей замене знаков зарядов. Операции зарядового сопряжения лучше придать название операции «античастичного» сопряжения, поскольку ее можно применить также к нейтральным частицам. При помощи этой операции, в частности, нейтрону сопоставляется антинейтрон, нейтрино — антинейтрино. Античастицы имеют обратные знаки заряда, магнитного момента, а также обратные знаки новых величин, характеризующих частицы, z -компоненты изотопического спина, странности, барионного числа, лептонного числа.

Исходя из подобных рассуждений, недавно была предсказана новая элементарная частица — нейтральная, относительно долго живущая θ_2^0-частица (Пайс и Гелл-Манн, 1953). Античастицы, сопряженные Λ^0 и другим гиперонам, еще не открыты. Другим прекрасным подтверждением теории античастиц явилось открытие антипротона и антинейтрона. 2) Преобразование Салама — Тушека ($\psi' = \psi \exp[i\alpha\gamma_5]$) ведет к сохранению фермионного (барионного или лептонного) заряда. 3) Преобразования Паули — Гюрши ($\psi' = a\psi + b\gamma_5\psi^C$, $|a|^2+|b|^2=1$; ψ^C — античастичная функция) ведут к сохранению изотопического спина.

Все указанные свойства инвариантности уравнений характеризуют также соответствующую лагранжеву функцию, из которой уравнения получаются как эйлеровы уравнения соответствующего вариационного принципа. Для полной характеристики лагранжиана или самих уравнений необходимо еще наложить ограничение низшими производными: первыми либо вторыми. Это означает пренебрежение весьма быстро переменными полями. Кроме того, ограничиваются линейными уравнениями поля. Впрочем, имеется одно единственное исключение: уравнения гравитационного поля Эйнштейна в общей теории относительности являются нелинейными.

В сжатом и математически очень изящном виде квантовая теория, подобно классической механике и электродинамике, формулируется при помощи вариационного принципа, гласящего, что действие I, построенное на базе лагранжевой функции L (лагранжиана) данного поля или комбинации лагранжианов при наличии взаимодействия, является экстремумом

$$\delta J = \delta \int L\,(dx)^4 = 0,$$

где $(dx)^4 = dx\,dy\,dz\,cdt$ — четырехмерный объем. Кажущийся произвол в выборе лагранжиана L на самом деле практически устраняется жесткими требованиями инвариантности, накладываемыми, в свою очередь, как было указано выше, свойствами пространства — времени. Лагранжиан L есть функция компонент волновых функций φ_r и их первых производных по координатам и времени $\varphi_{r,\nu} = \dfrac{\partial \varphi_r}{\partial x_\nu}$; тогда, при условии обращения в нуль вариаций $\delta\varphi_r$ на границах, получим следующие эйлеровы уравнения, т. е. уравнения поля:

$$\frac{\partial}{\partial x_\nu}\frac{\partial L}{\partial \varphi_{r,\nu}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_r} = 0.$$

При наличии нескольких полей L является суммой лагранжианов свободных полей и члена взаимодействия L'.

Следует отметить, что благодаря взаимному превращению всех частиц и полей в конце концов все уравнения релятивистской квантовой теории поля должны описывать нелинейные эффекты, такие, например, как рассеяние света на свете, рассеяние мезонов на мезонах и другие.

Однако вопрос о том, следует ли включать непосредственно нелинейные члены в уравнение Клейна—Гордона, Дирака и другие, либо вычислять нелинейные эффекты при помощи обычной квантовой теории, исходя из системы линейных уравнений,— остается еще не выясненным. На наш взгляд, в согласии с Гейзенбергом и отчасти Л. де Бройлем, разумно включить нелинейность в сами уравнения.

Не входя в детали, неуместные в общем историческом обзоре, выпишем теперь для иллюстрации основные уравнения современной квантовой теории поля вместе с их лагранжевыми функциями, ограничиваясь сперва обычными линейными уравнениями. Уравнение Клейна — Гордона для мезонного поля, порождаемого источником, имеет вид:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}-\varkappa_0^2\varphi=4\pi\rho.$$

Здесь φ — псевдоскалярная (или скалярная) волновая функция мезонного поля, ρ обозначает псевдоскалярную (или скалярную) плотность источника, порождающего поле; константа $\varkappa_0$ равна $2\pi mc/h$, где m — масса мезона. Лагранжиан свободного поля нейтральных скалярных частиц, описываемых вещественными функциями, имеет вид:

$$L_{\text{K-G}}=\frac{1}{8\pi}\left\{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2-\frac{1}{c^2}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)^2+\varkappa_0^2\varphi^2\right\}.$$

Уравнения Максвелла электромагнитного поля в четырехмерной записи имеют вид: (см. стр. 442, 443):

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu}=\frac{4\pi}{c}j_\mu,\qquad \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\lambda}+\frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu}+\frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu}=0,$$

где $F_{\mu\nu}$ — антисимметричный тензор 2-го ранга, объединяющий электрическое и магнитное поля. В виде матрицы имеем:

$$F_{\mu\nu}=\begin{vmatrix} 0 & H_3 & -H_2 & -iE_1 \\ -H_3 & 0 & H_1 & -iE_2 \\ H_2 & -H_1 & 0 & -iE_3 \\ iE_1 & iE_2 & iE_3 & 0 \end{vmatrix}.$$

Лагранжиан максвелловского поля был установлен Лармором

$$L_{\text{м}} = -\frac{\boldsymbol{E}^2 - \boldsymbol{H}^2}{8\pi}.$$

В четырехмерной записи

$$L_{\text{м}} = -\frac{F_{\mu\nu}^2}{16\pi}.$$

Плотность энергии электромагнитного поля:

$$W = \frac{\boldsymbol{E}^2 + \boldsymbol{H}^2}{8\pi};$$

вектор Умова — Пойнтинга плотности потока энергии:

$$\boldsymbol{S} = \frac{c}{4\pi}[\boldsymbol{EH}].$$

Уравнения Дирака для спинорной ψ-функции свободного электрона, протона, нейтрона и т. д. имеют вид:

$$D\psi \equiv \sum_{\nu} \gamma_\nu \frac{\partial \psi}{\partial x_\nu} + \frac{m_0 c \psi}{\hbar} = 0,$$

где γ_ν — особые четырехрядные матрицы, m_0 — масса частицы. Лагранжиан равен

$L_{\text{D}} = \bar{\psi} D\psi$ (симметризованная часть), где $\bar{\psi} = \gamma_4 \psi^*$.

Простейшие нелинейные обобщения уравнения Клейна — Гордона и Дирака, соответственно, имеют вид (Гейзенберг, Шифф, Иваненко, Родичев, Мирианашвили и др.):

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi} - \varkappa_0^2 \varphi - \lambda\varphi^3 = 0,$$

$$\gamma_\nu \frac{\partial \psi}{\partial x_\nu} + m_0 \psi - \lambda \psi^3 = 0.$$

Если мы потребуем инвариантности уравнений не только относительно линейных преобразований, например, вращений или лоренцовых преобразований, но также относительно всех возможных точечных преобразований, иначе говоря, инвариантности при переходе к произвольно движущимся системам, то мы придем к общей теории относительности Эйнштейна. Эта теория привела к пересмотру наших представлений о пространстве, времени и тяготении. Впрочем, реально наблюдаемые поправки к закону тяготения Ньютона оказались ничтожными, хотя и были подтверждены тонкими астрономическими наблюдениями: добавочное движение перигелия Меркурия,

равное 43″ в столетие, незначительное отклонение лучей света от какой-либо звезды, проходящей возле Солнца, равное 1″,75, и незначительное красное смещение спектральных линий, наблюдаемое в спектрах сверхплотных звезд. Обнаружение этих крайне малых эффектов взволновало научно-общественное мнение, так как предсказания теории были сделаны на базе нового представления о гравитации. Согласно Эйнштейну, любое вещество — элементарные частицы, ядра, атомы, звезды, электромагнитное поле и т. д. — искривляет четырехмерный мир. Это искривление проявляется в виде сил тяготения. Точнее говоря, те же самые величины, которые характеризуют отклонение метрики от плоской псевдоевклидовой ($g^0_{\mu\nu} = 0$), представляют собой обобщенный потенциал поля тяготения:

$$g_{\mu\nu} = g^0_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},$$

где

$$g^0_{\mu\nu} = 0 \ (\text{при } \mu \neq \nu),$$

$$g^0_{44} = +1; \ g^0_{11} = g^0_{22} = g^0_{33} = -1.$$

Десять компонент симметричного ($g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$) тензора $g_{\mu\nu}$ подчиняются сложным нелинейным уравнениям Эйнштейна, имеющим вид

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi\kappa T_{\mu\nu}.$$

Здесь справа стоит тензор $T_{\mu\nu}$, определяющий плотность распределения любого вещества, κ — гравитационная постоянная, R — скаляр, полученный так называемым сокращением (суммированием по значкам μ,ν) из тензора $R_{\mu\nu}$, в свою очередь являющегося функцией производных от $g_{\mu\nu}$ по координатам и времени: $\partial g_{\mu\nu}/\partial x_\tau$. Ньютонов потенциал оказался по существу совпадающим с малой добавкой к h_{44}. Тем самым приобрела физический смысл концепция Лобачевского о возможности реального, а не только формально-математического, воображаемого искривления пространства (Лобачевский, Бо́яи, Риман).

В общей теории относительности Эйнштейн применил пространство не постоянной, а переменной кривизны, в форме, разработанной Риманом и другими. Современная квантовая теория при рассмотрении линейного приближения к уравнениям Эйнштейна, т. е. слабого гравитационного поля, подвергает последнее квантованию и сопоставляет гравитационным волнам, предсказываемым теорией, кванты поля, так называемые гравитоны, совершенно аналогично тому, как фотоны сопоставляются электромагнитным волнам.

Отметим также, что квантовая теория предсказывает возможность превращения гравитонов в электроны — позитроны и фотоны и обратных трансмутаций (Иваненко, Соколов, Бродский, Пийр). На базе общей теории относительности А. А. Фридман указал на возможность существования пространственных структур с метрикой, зависящей от времени, в частности, расширяющейся Вселенной. Возможно, что видимое разбегание внегалактических туманностей, открытое Слайфером и Хэббл, объясняется на подобной основе. Пока что никакой связи между физикой элементарных частиц и космологией не было установлено, хотя существование в нашем участке Вселенной преимущественной концентрации протонов, нейтронов, электронов, ане античастиц ($\bar{p}$, $\bar{n}$, e^+), является, несомненно, фактом космологического порядка, возможно, связанным с расширением Вселенной. На возможность превращения гравитационного поля в обычную материю указывал также Йордан на основании общих соображений. Отметим, однако, еще раз, что влияние сил тяготения на атомные и ядерные процессы совершенно ничтожно, и им в этих случаях всегда пренебрегают. Все же при построении общей теории элементарных частиц и при обсуждении вопроса о структуре частиц вряд ли можно будет отбросить гравитационное поле без добавочной аргументации. После того как мы получили уравнения, описывающие различные частицы, мы должны подвергнуть их волновые функции вторичному квантованию; тем самым отдельным волнам будут сопоставляться кванты поля или частицы. Одновременно мы получим также возможность описывать порождение и уничтожение, т. е. превращаемость частиц. Имеется важная теорема Паули, согласно которой частицы полуцелого спина (электроны, протоны и др.) описываются спинорными волновыми функциями и должны подчиняться принципу запрета Паули. Подобные частицы не могут находиться более двух (с противоположными спинами) в одном состоянии и, следовательно, должны описываться статистикой Ферми—Дирака. С другой стороны, частицы целого спина (фотоны, π-мезоны и др.) должны подчиняться статистике Бозе—Эйнштейна. Вторичное квантование означает, что волновые функции φ, ψ_ν, A_ν нельзя считать обычными функциями координат и времени, но им следует придать смысл операторов. Остановимся кратко на случае скалярной функции.

Представим себе сперва, что время $t = \text{const}$, а координаты меняются прерывно; тогда значения функции $\varphi(r)$ в разных точках: $\varphi(x_1y_1z_1)$, $\varphi(x_2y_2z_2)$, $\varphi(r_i)$ и т. д. можно считать параметрами или координатами поля (q_i).

Каждой координате q_i можно сопоставить канонически сопряженный импульс p_i, определяемый через лагранжеву функ-

цию по общей формуле, имеющей место и в классической механике

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i},$$

т. е. для вещественного скалярного поля имеем:

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \left[\frac{\partial \varphi(x_i, y_i, z_i)}{\partial t}\right]} = \frac{1}{4\pi c^2}\frac{\partial \varphi}{\partial t}.$$

Поскольку квантовая механика системы точек показывает, что импульсы и координаты подчиняются перестановочному соотношению

$$p_r q_s - q_s p_r = \frac{\hbar}{i}\delta_{rs}$$

(отбрасывая несущественные сейчас тонкости), то для случая поля получим

$$\frac{\partial \varphi(\boldsymbol{r}_s)}{\partial t}\cdot(\varphi(\boldsymbol{r}_l) - \varphi(\boldsymbol{r}_l)\frac{\partial \varphi(\boldsymbol{r}_s)}{\partial t} = 4\pi c^2 \frac{\hbar}{i}\delta_{ls}.$$

Переходя к непрерывно меняющимся координатам, получим окончательно искомые трехмерные канонические правила перестановки для волновых функций скалярного вещественного поля

$$\frac{\partial \varphi(\boldsymbol{r}_l)}{\partial t})\varphi(\boldsymbol{r}_s) - \varphi(\boldsymbol{r}_s)\frac{\partial \varphi(\boldsymbol{r}_l)}{\partial t} = \frac{4\pi c^2 \hbar}{i}\delta(\boldsymbol{r}_l - \boldsymbol{r}_s),$$

где справа стоит дираковская δ-функция, равная нулю при несовпадении ее аргументов и обращающаяся в ∞ при их совпадении.

Аналогичным путем можно получить перестановочные соотношения для комплексного поля, для электромагнитных потенциалов и дираковских спинорных функций. Все правила перестановки можно обобщить на случай, когда функции берутся в разные моменты времени, придав им четырехмерную инвариантную форму. В дальнейшем перестановочные соотношения были обобщены путем учета вакуумных флуктуаций.

Опираясь на релятивистские квантовые уравнения движения частиц и законы взаимодействия между ними, устанавливаемые на базе релятивистских соображений, путем конструирования инвариантов, современная физика сумела продвинуться далеко вперед. Как мы уже многократно подчеркивали, описаны не только в общих чертах, но и в тонких деталях многочисленные атомно-молекулярные процессы; объяснена менделеевская периодическая система элементов; заложены основы

квантовой химии; успешно разработаны многие разделы физики твердого тела — металлов, проводников, полупроводников, сверхпроводников, разнообразных магнитных свойств (ферромагнетизм, антиферромагнетизм, пара- и диамагнетизм); развита теория жидкостей, в частности, сверхтекучести жидкого гелия при низких температурах; построена в основных чертах модель атомных ядер и достигнуто понимание ядерных сил, описаны процессы в космических лучах.

Что касается самих элементарных частиц, то, резюмируя, можно сказать, что современная теория объясняет прежде всего их спиновые и статистические свойства вместе с характером волновых функций и четностью частиц. Достигнуто предварительное понимание разностей масс элементарных частиц (протон — нейтрон, π -мезоны, Σ-гипероны), обязанное электромагнитным взаимодействиям; разработана теория атомноподобных систем, отличающихся от обычных атомов и ядер (позитроний, мезоатомы, гиперядра). Развита теория разнообразных взаимных превращений частиц. Как уже указывалось, вершинами современной теории поля и частиц последних десяти лет является, наряду с предсказанием новых частиц (π-мезонов, θ_2^0-частиц, $\bar{p}$, $\bar{n}$, ν, $\bar{\nu}$), предсказание несохранения четности и построение теории изотопических свойств, а также истолкование лэмбовского сдвига и дополнительного магнитного момента электрона.

Перечисление всех этих громадных успехов могло создать ошибочное мнение, что мы обладаем законченной теорией элементарных частиц, свободной от каких-либо трудностей. На самом же деле современная физика еще далека от понимания многих основных свойств частиц, например массы, заряда и других констант связи частиц и полей друг с другом (мезонный заряд нуклонов, фермиевская константа связи для β-взаимодействия и др.). В самом деле, при построении уравнений или лагранжевых функций мы складываем разнообразные инварианты, умножая их на некоторые константы. Эти константы, по существу означающие массы, заряды и другие константы связи, берутся пока что из опыта, и теория бессильна вывести их значения. Как уже указывалось выше, теория точечного электрона и других частиц приводит к бесконечной полевой энергии. Тем самым не удается выделить в собственной энергии частиц затравочную и полевую части. Построить же теорию протяженной частицы релятивистским образом пока что не удается. Точно так же не удается построить теорию заряда, комбинируемого из некоторой затравочной и полевой доли.

В начале 40-х годов только что указанные и другие связанные с ними трудности стали подлинным бичом физики

и препятствовали ее развитию. Все же в 1947 г. и в последующий период при разработке теории лэмбовского сдвига и дополнительного магнитного момента электрона на базе современной теории вакуума удалось несколько продвинуться вперед в этом направлении. Оказалось, что в случае квантовой электродинамики и псевдоскалярной мезодинамики (π-мезонов) число бесконечностей в теории ограничено. Они связаны с полевой массой и полевым зарядом точечных частиц, а в случае мезодинамики также с нелинейным взаимодействием мезонов друг с другом. В подобных «ренормируемых» теориях ограниченное число бесконечностей можно изолировать (но пока что далеко не устранить!), присоединив бесконечные полевые вклады к некоторым «затравочным» величинам: затравочной (механической) массе и затравочному заряду и считать затем полные величины конечными и равными наблюдаемым на опыте.

Несомненно, подобная процедура ренормировки бесконечностей и молчаливого согласия рассматривать их как конечные значения довольно произвольна.

С другой стороны, имеются неренормируемые теории, примером которых служит теория взаимодействующих пар фермионов, в которых число бесконечностей неограничено. Хотя подобные теории и приводят в известных областях к разумным результатам, например, в теории β-распада, но их применение в других случаях, например в теории ядерных сил, каждый раз требует особого анализа.

Все же успех теории лэмбовского сдвига указывает на здоровые элементы теории вакуума и идеи ренормирования заряда и массы. Однако отсутствие каких-либо новых фундаментальных успехов квантовой электродинамики после обнаружения лэмбовского сдвига более 10 лет назад, несмотря на большое число работ, посвященных новым формулировкам теории и анализу ее деталей, показывает, что для дальнейшего успешного движения теории поля вперед необходимы какие-то новые идеи. По всей видимости, эти идеи придут не из теории поля, а со стороны физики элементарных частиц в узком смысле слова, на фронте которой в самые последние годы как раз и происходили важнейшие события (предсказания и открытия новых частиц, установление новых изотопических свойств частиц, открытие несохранения четности и другие).

§ 15. СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ИЗОТОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Представим теперь известные данные об элементарных частицах в виде таблицы. При этом речь еще не будет идти о полностью закономерной системе элементарных частиц типа

менделеевской периодической системы химических элементов, в которой все без исключения элементы расположены по возрастающему заряду ядра и разбиты на определенные периоды. Хотя элементарные частицы также оказывается возможным разбить на группы, однако мы еще не имеем принципов, необходимых для построения полной их системы. Вместе с тем, успехи релятивистской квантовой теории поля и новейшие достижения физики элементарных частиц привели к тому, что мы далеко ушли от беспорядочного нагромождения частиц, среди которых нельзя было уловить каких-либо связей.

До сих пор свойства частиц рассматривались нами в историческом порядке их открытия (горизонтальные строки таблицы на стр. 504—505); сейчас мы попытаемся объединить частицы и их свойства, т. е. рассмотрим вертикальные столбцы таблицы.

Основным принципом, по которому целесообразно расположить все элементарные частицы, является их масса покоя. При переходе к частицам более высоких масс появляются, или во всяком случае более ярко проявляются, некоторые новые свойства (изотопический спин, странность и т. д.; см. ниже). Таким образом, мы как бы вновь возвращаемся к основному менделеевскому признаку, поскольку химические элементы в системе Менделеева, как известно, были расположены в основном в порядке возрастающего атомного веса.

Итак, распределим частицы пока что эмпирически в порядке возрастания масс, причем наряду с известными частицами включим также некоторые наиболее настойчиво предсказываемые теорией.

С учетом разнообразных свойств частиц постепенно вырисовывалась целесообразность их разделения на следующие группы: 1) частицы, лишенные массы покоя, кванты поля в узком смысле слова; 2) лептоны, или легкие частицы, к которым относятся электрон и позитрон, а также μ^+-, μ^--мезоны; сюда относятся также близкие по свойствам к электронам нейтрино и антинейтрино; 3) мезоны, которые разделяются на семейства «средних» π^+- и π^0-мезонов и «тяжелых» K-мезонов. Далее следуют тяжелые частицы или барионы, которые делятся на группы нуклонов и гиперонов; 4) к нуклонам (ядерным частицам) относятся протон, нейтрон и недавно открытые их античастицы — антипротон и антинейтрон; 5) гипероны в свою очередь делятся на Λ^0-частицы, семейство трех Σ^+-, Σ^- и Σ^0-гиперонов и, наконец, каскадный Ξ^--гиперон и предсказываемый Ξ^0-гиперон.

На первом, низшем месте в таблице стоят частицы, лишенные массы покоя, или кванты соответствующих полей: электро-

магнитного и гравитационного, а также нейтрино, которое по всей видимости лишено массы покоя. Отсутствие массы покоя у фотона, или соответствующей константы в уравнениях Максвелла, является точным, т. е. речь идет не о малости массы покоя, но о ее строгом равенстве нулю. Не исключено, что удастся объединить факты отсутствия массы покоя у нейтрино и фотона с точки зрения нейтринной теории света де Бройля.

Перейдем к частицам с конечной массой покоя.

Отметим, что до сих пор не удалось не только вывести конкретные значения масс частиц, но вообще получить конечное значение массы какой-либо частицы. Это ясно показывает, что мы еще далеки от законченной теории элементарных частиц. Бесспорно, часть массы (а по некоторым представлениям — вся масса) обязана энергии полей, связанных с частицей. Например, заряженная частица окружена электростатическим полем, энергия которого равна

$$\mathscr{E}_f = \int \frac{E^2}{8\pi} d^3x = \frac{1}{8\pi} \int_{r_1}^{\infty} \left(\frac{e}{r^2}\right)^2 \cdot 4\pi r^2 dr = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r_0}.$$

Нижней границей интеграции является радиус частицы, если мы рассматриваем поверхностно заряженную частицу. Предположив иное распределение заряда внутри частицы, получим иной числовой коэффициент. Условно примем $\mathscr{E}_f$ за долю полевой электростатической энергии заряда и, приравняв его полной энергии электрона, получим для классического радиуса электрона довольно разумное малое значение

$$r_0 = \frac{e^2}{2mc^2}.$$

Однако релятивистскую теорию протяженной частицы построить не удается, и предыдущие рассуждения Дж. Дж. Томсона, Пуанкаре, Лоренца, Абрагама служили только интересной иллюстрацией. Приходится брать точечную частицу ($r_0 = 0$), но тогда полевая энергия будет бесконечной, что нелепо. До сих пор в физике все уравнения движения частиц (уравнение Дирака и др.) писались для точечных частиц.

В неквантовой теории для устранения трудности с бесконечной полевой энергией заряда было предложено несколько инвариантных предварительных, довольно искусственных, хотя и интересных для анализа проблем выходов: нелинейное обобщение теории Максвелла, выдвинутое Борном и Инфельдом, обобщение теории введением высших производных (Бопп—

Подольский), квантование пространства—времени (Амбарцумян — Иваненко, Гейзенберг и др.). Эти попытки не привели к каким-либо определенным результатам, хотя и рассматривались также и в квантовой теории. Важный результат Хофштадтера с определением размеров протона еще не был истолкован окончательно с теоретической точки зрения. Для той же цели были предложены различные варианты нелокальной теории, в которой частицы взаимодействуют не в точке, но в некоторой области (Ватагин, Марков, Юкава).

По всей вероятности, наряду с полевой энергией, обусловленной притом всевозможными полями, имеется некоторая «затравочная» часть энергии, которая раньше, в случае электрона, именовалась «механической», о природе которой вообще ничего сейчас сказать нельзя. С другой стороны, разности масс некоторых частиц поддаются уже теоретической трактовке. По всей видимости, основные массы протона и нейтрона равны, а их различие обусловлено интерференцией магнитных и электрических взаимодействий. Вводя разумное обрезание интегралов при некотором $r_c=(\hbar/Mc)$ в этой, также еще предварительной теории, можно получить согласие с опытом также для объяснения разностей масс заряженных и нейтральных π-мезонов (Фейнман—Шпейзман) и для заряженных и нейтральных Σ-гиперонов (Маршак — Сударсхан). Наконец, для разностей масс гиперонов и нуклонов аналогичным образом, возможно, придется учесть полевые добавки от π- или K-мезонов.

Следующим после массы важнейшим внутренним свойством частиц является их спин; причем существенным оказывается сам факт наличия целого или полуцелого спина, в долях $\hbar = (h/2\pi)$. Частицы полуцелого спина описываются спинорами, целого спина — скалярами, векторами, тензорами разного ранга или псевдоскалярами, псевдовекторами.

Спинорные частицы, как было показано на опыте и затем доказано Паули, подчиняются статистике Ферми — Дирака; тензорные частицы целого спина удовлетворяют статистике Бозе — Эйнштейна.

Существенной также является внутренняя четность частицы, определяющая поведение ее волновой функции при зеркальных отражениях пространственных координат и временной координаты.

Таким образом, первичными являются значения спина и четности, которые уже задают характер волновых функций и тип статистики. При этом, конечно, самый факт наличия квантовых, волновых свойств, описываемых волновыми ψ-функциями, является основным фундаментальным признаком.

До сих пор имелись в виду свойства отдельных частиц,

Семейство	Частица и символ	Масса покоя (в единицах массы электрона)	Спин (в единицах $h/2\pi$)	Волновая функция и четность
Поля	Гравитон (g)?	0	2	$g_{\mu\nu}$
	Фотон (γ)	0	1	A_μ
Лептоны	Нейтрино (антинейтрино) (ν, $\bar{\nu}$)	~ 0	1/2	ψ_ν (спиноры)
	Электрон (e^-) (позитрон) (e^+)	1	1/2	ψ_ν (спиноры)
	$\mu^\pm$-мезоны	206,8	1/2	ψ_ν (спиноры)
Мезоны	$\pi^\pm$-мезоны	273,3	0	φ ($P=-1$)
	π^0-мезон	264,3	0	φ
	K-частицы: $K^\pm$-мезоны ($K^\pm$)	966,5	0	$\bar{\varphi}$
	K-частицы: K^0-мезон (K^0, $\bar{K}^0$)	966	0	$\bar{\varphi}$
Барионы	Нуклоны (N, $\bar{N}$): Протон (антипротон) (p, $\bar{p}$)	1836,12	1/2	ψ_ν (спиноры)
	Нуклоны (N, $\bar{N}$): Нейтрон (антинейтрон) (n, $\bar{n}$)	1838,65	1/2	ψ_ν (спиноры)
	Гипероны: Λ^0-частица	2182	1/2	ψ_ν
	Гипероны: Σ^+-частица	2327	1/2	ψ_ν
	Гипероны: Σ^--частица	2341	1/2	ψ_ν
	Гипероны: Σ^0-частица	~ 2332		
	Гипероны: Ξ-частица (каскадный гиперон) (Ξ^-)	2586	1/2	ψ_ν
	Гипероны: Ξ^0-частица	(?)		

* Среднеквадратичный электромагнитный радиус

Константа связи (заряд)	Магнитный момент	Изотопический спин (T) и странность (S)	Время жизни, *сек*	Размеры, *см*
	0 0		∞ ∞	
0 $\left.\begin{array}{l}(e=4{,}80286\cdot10^{-10}\\ \text{эл. стат. ед.})\\ \frac{e^2}{\hbar c}=(1/137{,}03)\end{array}\right\}$	$<0{,}001\ \mu_e$ $\mu_e=1{,}00116\mu_0,\ \left(\mu_0=\frac{eh}{4\pi mc}\right)$ $\mu_\mu=1{,}0026\ \frac{eh}{4\pi\mu c}$		∞ ∞ $2{,}22\cdot10^{-6}$	
$g^{\pi}_{\mu\nu}\cong2\cdot10^{-6}e$		$\left.\begin{array}{l}T=1\\ S=0\end{array}\right\}$	$2{,}56\cdot10^{-8}$ $\sim10^{-15}$	
		$\left.\begin{array}{l}T=1/2\\ S=+1\end{array}\right\}$	$\sim1{,}22\cdot10^{-8}$ $\left.\begin{array}{l}\sim10^{-10}(K^0_1)\\ \sim10^{-7}(K^0_2)\end{array}\right\}$	
$\left.\begin{array}{l}g_{N\pi}=g,\\ \frac{g^2}{\hbar c}\sim15\\ g_F\sim2{,}5\cdot10^{-49}\end{array}\right\}$	$\mu_p=2{,}7929\ \frac{eh}{4\pi Mc}$ $\mu_n=-1{,}9131\ \frac{eh}{4\pi Mc}$	$\left.\begin{array}{l}T=1/2\\ S=0\end{array}\right\}$	∞ $\sim7{,}5\cdot10^{2}$	$\sim0{,}8\cdot10^{-13}$* $\sim0{,}8\cdot10^{-13}$*
$g'_{\Lambda\pi}\approx g_{N\pi}$		$T=0$ $S=-1$	$\sim3\cdot10^{-10}$	
		$T=1$ $S=-1$	$\sim0{,}8\cdot10^{-10}$ $\sim1{,}8\cdot10^{-10}$ $<10^{-11}$	
		$T=1/2$ $S=-2$	$\sim10^{-10}$	

Однако близость групп частиц по массам (π^--, π^+- и π^0-мезоны; протоны и нейтроны; Σ^+, Σ^- и Σ^0-гипероны и другие); тождество спинов и четностей частиц внутри приведенных выше групп; одинаковый во многих отношениях характер взаимодействий частиц одной и той же группы (например, весьма близкий тип взаимодействия всех π-мезонов с нуклонами) и другие обстоятельства заставляют предполагать, что указанное разделение на семейства соответствует физической сути дела. Для характеристики родства вводится особое число, названное изотопическим спином или изобарическим спином (I или T), которое является общим для всех частиц данного семейства. Отдельные же члены семейства характеризуются разными компонентами I. Например, все π-мезоны имеют изоспин $I = 1$; π^+-мезону соответствует $I_3 = +1$; π^--мезону $-I_3 = -1$, π^0-мезону $-I_3 = 0$.

Семейство нуклонов имеет изоспин $I = {}^1/_2$, причем протону разумно приписать (условно) $I_3 = +{}^1/_2$, нейтрону же компоненту $I_3 = -{}^1/_2$. Тогда антипротон должен иметь $I_3 = -{}^1/_2$, антинейтрон $-I_3 = +{}^1/_2$.

Понятие изоспина введено по аналогии с обычным спином. Действительно, электрон имеет спин $s = {}^1/_2$ и может находиться в одном из двух состояний с $s_3 = \pm {}^1/_2$. Далее, Λ^0-частица имеет $I = 0$, образуя изосинглет. Все три Σ-частицы имеют изоспин $I = 1$ и $I_3 = +1, -1, 0$. Каскадный Ξ-гиперон является, по-видимому, компонентой изодублета с $I = {}^1/_2$, $s = {}^1/_2$. Наконец, K-мезоны, по-видимому, имеют изоспин $I = {}^1/_2$, с $I_3 = \pm {}^1/_2$.

Таким образом, разумно сопоставлять K^+-мезону компоненту $I_3 = {}^1/_2$, K^0-мезону — компоненту $I_3 = -{}^1/_2$; тогда у античастиц $\overline{K}^+ = K^-$: $I_3 = -{}^1/_2$, у $\overline{K}^0 - I_3 = +{}^1/_2$; тем самым предсказывается отличие нейтрального K^0-мезона от $\overline{K}^0$-частицы. Изоспин лептонов еще не установлен разумным и сколько-нибудь однозначным образом.

Введение изоспина, сперва предложенное для двух нуклонов Гейзенбергом и рассматривавшееся только лишь как удобный технический прием записи, оказалось весьма плодотворным и, как теперь видно, глубоким физическим понятием, удачно описывающим некоторые основные внутренние свойства частиц. Можно ввести вспомогательное четырехмерное или в других вариантах трехмерное, изотопическое пространство, в котором задаются значения изоспина I, и рассматривать свойства частиц в геометрических терминах.

Систематическое исследование изотопических свойств резко отличает новейшую физику элементарных частиц от науки прежних лет.

Протон и нейтрон должны, с этой точки зрения, за вычетом электромагнитных взаимодействий, рассматриваться как две тождественные частицы. Разность масс между ними и различные магнитные моменты оказываются обусловленными электромагнитными силами.

Вероятно, что нуклоны будут объединены с Ξ-гиперонами в одно семейство (с точки зрения четырехмерного изопространства) Λ- и Σ- гипероны также могут рассматриваться как компоненты одного четырехмерного изосемейства.

Важно отметить, что за вычетом электромагнитных взаимодействий, изотопический спин системы частиц, например, нуклонов и π-мезонов, сохраняется; сохраняется также одна, например, третья, компонента изоспина. Ситуация оказывается подобной сохранению обычного механического момента, связанного с инвариантностью относительно вращений координатной системы (изотропия пространства). Точно так же «сильные» (π-мезонные) взаимодействия должны удовлетворять требованию инвариантности относительно вращений во вспомогательном изотопическом пространстве. В присутствии же электромагнитных сил сохраняется лишь третья компонента изоспина.

Электрический заряд связывается с изоспином, например, для π-мезонов: $Q = I_3$ (в долях e); $I_3 = (+1, -1, 0)$. Однако для нуклонов указанную простую связь надо заменить формулой $Q = I_3 + n/2$, где $n = +1$ для протона и нейтрона, $n = -1$ для антинуклонов. Новое число n носит название «барионного» числа, или барионного заряда. Оно вводится аналогичным образом не только для нуклонов, но также для всех гиперонов. С другой стороны, для мезонов и лептонов $n = 0$. Аналогично можно пытаться ввести понятие лептонного числа l (Я. П. Терлецкий, Конопинский — Махмуд, Зельдович и др.). По предлагаемой нами терминологии, следует говорить о баро-фермионном и лепто-фермионном числах. Существуют законы сохранения n подобно закону сохранения заряда. Иначе говоря, во всех известных реакциях число барионов минус число антибарионов остается постоянным, так же как число лептонов минус число антилептонов ($l=1$ для электрона, $l=-1$ для позитрона и т.д.). Для гиперонов и K-мезонов следует ввести еще один поправочный член S («странность») (Нишиджима, Гелл-Манн). Эмпирически необходимо положить $S=0$ для нуклонов и π-мезонов, т. е. для старых, «обычных» частиц. Однако для «странных» частиц S нужно взять отличным от нуля и положить $S = -2$ для каскадного гиперона, $S = -1$ для всех трех Σ-гиперонов, а также для Λ-частиц; $S = +1$ для K-мезонов. Для античастиц S меняет знак. Тогда оконча-

тельная эмпирическая формула для заряда, как легко проверить гласит

$$Q = I_3 + n/2 + S/2 = I_3 + Y/2,$$

где Y — гиперзаряд. При сильных и электромагнитных взаимодействиях странность сохраняется; однако при распаде странных частиц, идущем относительно медленно благодаря включению слабых взаимодействий, странность меняется на ± 1.

Известно, что странные частицы (гипероны и K-частицы) никогда не порождаются поодиночке, но всегда парами. Это указывает на выполнение некоторого запрета и тем самым побуждает ввести квантовое число S. Введение странности оказалось очень удобным и позволило объяснить ряд процессов (ассоциированное или парное появление странных частиц со странностями $+1$ и -1, запреты распада в некоторых случаях и т. д.). Однако полной убедительной теории числа S, как и чисел n и l и даже теории изопространства, еще нет. Недавно были предприняты попытки свести изо-свойства к различному поведению частиц при инверсиях времени и пространства, введя наряду с обычными спинорами и бозонами — аномальные. В этой области физики многое находится еще в процессе развития, но вместе с тем и явного подъема.

Введением изоспина группы частиц оказались связанными друг с другом. Для того, чтобы полностью описать все до сих пор известные и теоретически изученные свойства частиц, необходимо указать еще константы связи частиц друг с другом, о которых неоднократно шла речь. Мы имеем в виду электрический заряд e как константу связи всех заряженных частиц, мезонный заряд нуклона g как константу связи нуклонов с π-мезонным полем, константу Ферми g_F, обусловливающую связь нуклонов с полем электронов (позитронов) и нейтрино (антинейтрино), и другие константы, обусловливающие слабые процессы.

Магнитные моменты частиц, по-видимому, все являются не первичными, но вторичными константами и сводятся в конце концов к зарядам. Например, магнитный момент электрона в основном обусловлен его зарядом и, наглядно говоря, причудливым «вращательным» спиновым движением этого заряда по уравнению Дирака; сюда добавляется вакуумная часть, обусловленная сложным взаимодействием «голого» электрона с вакуумом фотонов и электронов — позитронов. Магнитный момент нуклонов, например нейтрона, обусловлен тем, что нейтрон как бы диссоциирует в течение примерно 20% времени на протон и отрицательно заряженное мезонное облако, обладающее магнитным моментом.

Остается добавить несколько слов о распаде частиц. Взаимодействия частиц с полями других частиц в ряде случаев обус-

ловливают возможность спонтанного радиоактивного распада частиц и тем самым приводят к конечному времени жизни. Абсолютно стабильных частиц вообще не существует. Но одни из них превращаются в другие виды частиц только при столкновениях. Радиоактивные же частицы переходят в другие виды частиц сами по себе. Примером стабильных частиц являются электроны, позитроны, нейтрино, фотоны, протоны и антипротоны. В самом деле, электрон аннигилирует, например, лишь при столкновении с позитроном, превращаясь в γ-фотоны, либо превращается вместе с позитроном в фотоны, находясь в атоме позитрония, либо поглощается протоном ядра. Аналогично этому протон аннигилирует лишь при столкновении с антипротоном, с превращением пары частиц в π-мезоны. С другой стороны, нейтрон, все мезоны и все гипероны являются нестабильными и сами по себе превращаются в некоторые другие частицы с некоторой вероятностью. Быстрота распада обусловливается константами связи с полями частиц, на которые идет распад. Среднее время жизни является важной характеристикой частиц, хотя и определяемой, согласно предыдущему, другими, более фундаментальными свойствами.

Таким образом, мы пояснили все основные данные современной таблицы элементарных частиц. По справедливости, в таблицу следовало внести еще один признак: размеры частиц, которые, однако, измерены пока только для протона и нейтрона. Согласие с экспериментом при рассеянии электронов на протонах и нейтронах получается только при допущении, что нуклоны не являются точечными частицами, но что заряд и магнитный момент протона (а также магнитный момент нейтрона) распределены в конечной области с линейными размерами $r_2 = 0{,}80 \cdot 10^{-13}$ *см* (средний квадратичный радиус). Это фундаментальное открытие Хофштадтера (1955—1956) указывает на предварительный характер наших сведений об элементарных частицах, свойства которых поистине оказываются неисчерпаемыми. Это согласуется с глубоким высказыванием Ленина о неисчерпаемости электрона. О размерах других частиц пока еще ничего неизвестно. Нуклоны же, по-видимому, можно представлять себе в виде некоторого затравочного «ядрышка» или «остова», окруженного облаком виртуальных π-мезонов, которые не следует смешивать с реальными мезонами, движущимися вокруг ядер в мезоатомах.

Вероятно, глубокие трудности квантовой теории поля, связанные с невозможностью получить конечные выражения для полевой массы и зарядов, связаны с тем, что до сих пор использовалось слишком упрощенное представление о частицах как о точечных. По всей видимости, в теорию следует ввести

новую мировую константу, типа элементарной длины. Ей пытались придать геометрический смысл в гипотезе квантования пространства — времени (Иваненко — Амбарцумян, Гейзенберг, Снайдер и др.) или вводили в качестве описания размазанности частиц или размазанности взаимодействия в так называемых нелокальных теориях (Ватагин, Шерцер, Марков, Юкава и др.). В упоминавшиеся ранее нелинейные обобщения теории поля также входит новая константа, которой можно придать характер длины. Однако все эти попытки, хотя и помогли проанализировать ряд вопросов, не привели к каким-либо определенным физическим результатам, что указывает на их слишком упрощенный характер. Не исключено, что вещество внутри элементарных частиц находится в особом состоянии, и обычные подходы со стороны частиц, сохраняющих индивидуальность, и применение метода возмущений здесь незаконны. Частица вместе с окружающими полями является своеобразным «комком» вещества, для описания которого, возможно, еще не имеется достаточно адэкватных средств.

Коснемся, наконец, некоторых предварительных моделей частиц, составленных из некоторых основных единиц. Ферми и Янг предложили трактовать π-мезоны как частицы, составленные из нуклонов и антинуклонов, связанных большим взаимодействием на самых малых расстояниях. Саката кладет в основу всех частиц нуклоны и Λ-частицы. Гольдхабер берет в качестве первичных нуклон и K-мезоны. Другая, более формальная модель, заключающаяся в методе «слияния» («fusion») Л. де Бройля, конструирует волновые функции всех частиц из наиболее элементарных спинорных функций. В нелинейной единой теории вещества в основу также кладется некий мировой спинор, подчиняющийся нелинейно обобщенному уравнению Дирака.

В самом деле, если пытаться ограничиться каким-либо одним «мировым» полем, то за основу следует взять именно спинорное поле частиц спина $^1/_2$. Комбинируя затем эти поля, можно получить частицы спина 0 и 1 и т. д., тогда как из «невращающихся» частиц спина 0 нельзя получить частицы спина $^1/_2$. Однако так как это поле может взаимодействовать только с самим собой, уравнения основного поля должны быть нелинейными. По-видимому, подобная программа, опирающаяся на аргументы де Бройля, наше нелинейное обобщение спинорного уравнения членом ψ^3, в реализации которой особенно Гейзенберг получил любопытные результаты, является хотя и грубой, но наиболее разумной современной попыткой построения единой теории полей. Однако слишком примитивный характер ее явствует хотя бы из отсутствия в подобных уравнениях характеристик новых важных изотопических свойств частиц.

Частным случаем «слияния» могла бы явиться гипотетическая нейтринная теория света, предложенная Л. де Бройлем и развивавшаяся Кронигом, Йорданом, Соколовым и другими. Согласно этой гипотезе, фотоны комбинируются из пар нейтрино. Пока что, впрочем, отсюда не удалось получить новых реальных результатов.

Так или иначе, как мы видим, физика начинает приближаться ко второй (наряду с выводом значений масс и зарядов) основной задаче теории элементарных частиц — по возможности установлению единой системы частиц. Во всяком случае, за последнее десятилетие современная наука получила много ценных сведений об элементарных частицах и вплотную подошла к изучению их структуры. Нет сомнений, что исследование элементарных частиц не только значительно расширит понимание строения вещества, но и приведет к новым техническим применениям.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
В. П. Зубов. Физические идеи древности 11
В. П. Зубов. Физические идеи средневековья 81
В. П. Зубов. Физические идеи Ренессанса 129
Б. Г. Кузнецов. Генезис механического объяснения физических явлений и идеи картезианской физики 156
Б. Г. Кузнецов. Основные принципы физики Ньютона 186
П. С. Кудрявцев. Основные линии развития физических идей в XVIII в. 198
П. С. Кудрявцев. Закон сохранения энергии 218
П. С. Кудрявцев. Развитие идей термодинамики и атомистики 229
П. С. Кудрявцев. Развитие теории электромагнитного поля 236
Б. Г. Кузнецов. Основные идеи специальной теории относительности 263
Д. Д. Иваненко. Основные идеи общей теории относительности. 288
Л. С. Полак. Возникновение квантовой физики. 323
Б. Г. Кузнецов. Основные идеи квантовой механики . . . 390
Д. Д. Иваненко. Элементарные частицы 422

Очерки развития основных физических идей

Утверждено к печати Институтом истории естествознания и техники Академии наук СССР

Редактор Издательства *С. И. Ларин*
Технический редактор *Т. В. Полякова*
Оформление художника *П. Ф. Некунде*

РИСО АН СССР № 34—116 В. Сдано в набор 25/X 1958 г.
Подписано к печати 13/I 1959 г. Формат 60×92¹/₁₆. Печ. л. 32.
Уч.-изд. л. 30,8. Тираж 5000 экз. Т-00226. Изд. № 2761. Тип. экз. 1094.

Цена 23 руб.

Издательство Академии наук СССР. Москва, Б-64, Подсосенский пер., 21

2-я типография АН СССР. Москва, Г-99, Шубинский пер., д. 10