

В.П.Визгин

ЕДИННЫЕ
ТЕОРИИ
ПОЛЯ
в первой трети
XX века

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

В.П.Визгин

ЕДИНЫЕ
ТЕОРИИ
ПОЛЯ
в первой трети
XX века

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
Л. С. ПОЛАК



МОСКВА
«НАУКА»

1985

Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века. М.: Наука, 1985.

В книге рассматривается история попыток создания единой геометризованной теории поля в первой трети XX в. Выделяются две глобальные исследовательские программы в физике на рубеже третьего десятилетия: полевая геометрическая программа, основанная на общей теории относительности, и квантово-теоретическая программа. Исследуются пути развития полевой геометрической программы и ее взаимодействие с квантово-теоретической программой, в частности ее плодотворное воздействие на гегезис калибровочной концепции поля, оказавшейся в последние десятилетия основой для построения объединенного полевого описания фундаментальных взаимодействий.

Библиогр. 396 назв.

Рецензенты:

Г. М. ИДЛИС, И. Ю. КОБЗАРЕВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несмотря на быстро растущее расширение сферы физического исследования, появление все новых и новых разделов физики, главным нервом в ее развитии было и остается стремление к теоретическому синтезу всего массива физического знания. Основные свершения в физической науке были, как правило, связаны с различными фазами этого синтеза. Наиболее радикальным выражением названной тенденции является программа построения единой физической теории. После того как максвелловская электродинамика объединила в одной теоретической схеме явления электричества, магнетизма и оптики на основе понятия электромагнитного поля, возникла надежда на то, что именно полевая концепция должна стать фундаментом будущей единой теории физического мира. Но уже в первом десятилетии XX в. выяснилась ограниченность электромагнитно-полевой концепции физики.

Нетривиальное развитие получило понятие классического поля в общей теории относительности, возникшей на пути разработки релятивистской теории гравитации. Оказалось, что гравитационное поле наряду со свойствами, присущими электромагнитному полю, обладает той важной особенностью, что оно одновременно выражает метрическую структуру пространственно-временного континуума. В результате появилось следующее обобщение программы полевого синтеза физики: единое поле, представляющее гравитацию и электромагнетизм, должно также описывать геометрию пространства-времени. Основной задачей в свете этой программы стали поиски таких геометрических схем, более общих, чем риманова геометрия, которые бы определили уравнения единого поля настолько нетривиальные, чтобы включить в число своих решений корпускулярные и квантовые аспекты материи.

Книга, предлагаемая читателю, рассказывает о возникновении этой грандиозной по своему замыслу программы полевого геометрического синтеза физики, о первых ее успехах, надеждах, которые возлагались на нее в начале 20-х годов, об ее трудностях, неудачах и путях дальнейшего развития вплоть до начала 30-х годов, когда успехи квантовой теории и открытие новых элементарных частиц и новых взаимодействий между ними отодвинули эту несработавшую программу на второй план и поставили ее перед новыми крайне серьезными проблемами.

В 70—80-х годах проблема единой полевой теории основных физических взаимодействий вновь стала весьма актуальной. Правда, теперь речь шла о квантовой полевой теории четырех фундаментальных взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного. И в современном варианте эта программа остается существенно геометрической. Ее геометризм связан с так называемой калибровочной структурой основных полей, позволяющей использо-

вать геометрию расслоенных пространств. Калибровочная концепция поля, открывшая новый ресурс теоретико-полевого синтеза физики, исторически возникла в единых геометризованных теориях поля 20-х годов. Не вполне утратили свое значение и конкретные варианты геометризации полей, использованные в единых теориях Вейля, Калуцы, Эйнштейна. Но сегодня программа полевого синтеза физики не противостоит квантово-теоретической программе, как это было в 20-х и 30-х годах. Напротив, обе эти программы, долгое время находившиеся в оппозиции друг к другу, теперь нашли способ объединить свои усилия в попытке решить основную задачу современной физики — построить последовательную единую теорию элементарных частиц и их взаимодействий.

Автор благодарен Г. Е. Горелику, Г. М. Идлису, И. Ю. Кобзареву, А. Б. Кожевникову, М. И. Монастырскому и Л. С. Полаку, которые прочли книгу в рукописи и сделали много полезных замечаний. Весьма стимулирующими были обсуждения рукописи или ее фрагментов в секторе истории физики и механики ИИЕиТ АН СССР, возглавляемом А. Т. Григорьяном, которому автор благодарен за постоянное внимание к данной работе.

Введение

В 1979 г. Нобелевской премии по физике удостоились американские физики С. Вайнберг и Ш. Глэшоу, а также пакистанский физик А. Салам за создание единой калибровочной теории слабых и электромагнитных взаимодействий. По времени это совпало, как заметил в своей Нобелевской лекции А. Салам, со столетием со дня смерти Максвелла, осуществившего впервые теоретико-полевой синтез электричества, магнетизма и света, и с сотой же годовщиной, но со дня рождения, Эйнштейна — человека, давшего нам предвидение окончательного объединения всех сил» [1, с. 8].

Стремление естествоиспытателей к построению единой научной картины мира, а физиков — к созданию единой физической теории восходит к античной натурфилософии, напряженно искавшей ключ к единому описанию Вселенной либо на путях открытия единственного материального первоначала явлений природы, либо, как это пытались сделать пифагорейцы, в форме установления единой математической структуры мира, либо на основе атомистической концепции.

На протяжении более чем двух веков, начиная с XVII в., эпохи Галилея, Декарта, Ньютона, в роли такого объединяющего начала всего многообразия явлений природы выступала классическая механика. «Механистическое мировоззрение», «механистическая картина мира», «механистическое объяснение природы» господствовали и в XIX в. Встав на позиции, близкие к методологии научно-исследовательских программ или куновского парадигмального подхода, мы могли бы сказать о классико-механической программе или соответственно о классико-механической парадигме в естествознании (и тем более в физике) XVII—XIX вв.

Создание в 60—70-х годах XIX в. теории электромагнитного поля, прежде всего Дж. Максвеллом, привело в конечном счете к рождению в середине 90-х годов электромагнитно-полевой программы и соответственно электромагнитной картины мира в физике. Успехи максвелловского полевого синтеза электрических, магнитных и оптических явлений, последующие успехи электронной теории Лоренца в объяснении широкого круга вопросов строения вещества привели к выдвиганию на первый план электромагнитно-полевой программы, лидерами которой выступили Э. Вихерт, М. Абрагам, П. Друде, В. Кауфман, В. Вин, А. Зоммерфельд, Дж. Лармор, О. Лодж, в значительной мере Дж. Дж. Томсон, О. Хевисайд, Дж. Фицджеральд, Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, П. Ланжевен. Первые стадии научной революции в физике, происшедшей на рубеже XIX и XX вв., во многом протекали под лозунгом перехода физиков на позиции электромагнитно-полевой программы.

При изучении кризиса философских оснований физики в начале XX в. В. И. Ленину пришлось обратиться к анализу научной революции в физике, и он совершенно верно оценил основное содержание этой революции, которое, по его мнению, заключалось в крушении механистического мировоззрения и переходе физики на позиции электромагнитно-полевой программы¹.

Непреходящим достижением теории Максвелла и электромагнитно-полевой программы в целом было создание понятия поля и выдвижение концепции синтеза физики на полевой основе. Однако эта блестяще задуманная и казавшаяся столь перспективной программа уже к началу 10-х годов оказалась существенно подорванной. Создание в 1905 г. специальной теории относительности, возникновение квантовой теории излучения, разработка уже во втором десятилетии общей теории относительности и квантовой теории атома совершенно отчетливо показали границы электромагнитно-полевой программы. На смену ей шли, с одной стороны, в области макрофизики и, в частности, теории гравитации — релятивистская программа, а с другой — в области микрофизики — квантово-теоретическая программа. Во многих разделах физики эти две программы в течение долгого времени либо не соприкасались друг с другом, либо даже дополняли друг друга. Первой наиболее впечатляющего теоретического успеха добилась релятивистская программа — в области теории тяготения. В 1915—1916 г. была создана общая теория относительности (ОТО), в сущности релятивистская теория гравитационного поля. Но значение этой теории вышло далеко за рамки гравитационной физики, поскольку ОТО одновременно оказалась новой теорией пространства и времени, радикально преобразовавшей основы пространственно-временных представлений классической физики и даже специальной теории относительности (СТО). Основной особенностью ОТО, резко выделяющей ее из всего многообразия физических теорий, включая также и первые квантовые теории, была присущая ей идея геометризации физического взаимодействия (именно гравитационного). Истолкование гравитационного поля как проявления кривизны пространства-времени и новая концепция пространства-времени, отождествленного фактически с физическим полем, уравнения которого определяются распределением материи (как обладающей массой покоя, так и электромагнитного поля), были совершенно новым словом в истории физики. Фундаментальный характер ОТО, глубина и оригинальность ее исходных идей выдвинули ее в разряд программных теорий. И действительно, в работах Д. Гильберта (1915) и Г. Вейля (1918) были развиты первые единые теории электромагнитного и гравитационного полей на основе ОТО, которые к началу 20-х годов привели к оформлению программы единых геометризованных теорий поля (программы ЕГТП). Программа ЕГТП родственна электромагнитно-полевой

¹ См.: *Визгин В. П.* Ленинский анализ состояния физики на рубеже XIX и XX вв. — В кн.: *Ленинское философское наследие и современная физика.* М.: Наука, 1981, с. 222—262.

программе, поскольку в обеих программах основополагающую роль играет понятие поля, именно классического поля, описываемого системой дифференциальных уравнений в частных производных. Общность программ заключается и в том, что в своих наиболее радикальных вариантах они стремились свести понятия частиц и особенности квантового поведения полей и частиц к своеобразным проявлениям классических полей.

Обычно считается, что у истоков программы ЕГТП стоял А. Эйнштейн. С одной стороны, это не совсем так, поскольку программные установки нового подхода сформировались, как мы заметили, в работах Гильберта и Вейля, а Эйнштейн первоначально отнесся к этой программе крайне скептически. Но это верно в том отношении, что основу, ядро этой программы составила ОТО, решающий вклад в создание которой был внесен бесспорно Эйнштейном. Все же спустя несколько лет после пионерской работы Вейля (кстати, заметим, что именно в вейлевском, а не в гильбертовском варианте сформировалось в окончательном виде ядро программы ЕГТП) Эйнштейн действительно стал лидером этой программы. Более того, он оставался им до конца своей жизни.

В начале 20-х годов на программу ЕГТП возлагались большие надежды, хотя немногие физики решались руководствоваться ею в своих исследованиях. Неудачи глобальных замыслов Гильберта и Вейля, прежде всего в плане получения новых физических результатов и установления связей с квантовой теорией, отпугивали физиков, которые предпочитали в большинстве своем работать на основе квантово-теоретической программы, что приносило не всегда значительные, но все же реальные физические результаты. Математическая же глубина программы ЕГТП, ее связь с новейшими разделами дифференциальной геометрии привлекали к этой программе математиков, которые сыграли в ее развитии важную роль. Помимо Д. Гильберта и Г. Вейля, здесь в первую очередь надо назвать Э. Картана, Я. Схоутена, О. Веблена, Т. Леви-Чивиту, Л. Эйзенхарта. Программой ЕГТП интересовались и пытались ее использовать такие физики, как Э. Шредингер, В. Паули, А. С. Эддингтон, В. А. Фок, И. Е. Тамм и другие, которые внесли значительный, иногда определяющий вклад в разработку квантово-теоретической программы. Создание в 1925—1927 гг. квантовой механики и ее триумфальные достижения в последующие годы привели в начале 30-х годов к заметному снижению авторитета программы ЕГТП, хотя время от времени некоторые из лидеров квантово-теоретической программы, такие, как В. Паули (в начале 30-х) или Э. Шредингер (в 40-х годах), возвращались к единым теориям поля. На фоне выдающихся успехов квантово-теоретической программы порой изящные математические схемы единых геометризованных теорий поля выглядели бесплодными, тем более что проходили годы и десятилетия, а сменяющие одна другую единые теории не выходили за рамки глобальных замыслов и абстрактных математических структур. Основной кризис в разработке единых полевых теорий возник в начале 30-х годов, особенно после 1932 г., явившегося

вехой в истории физики элементарных частиц. Именно в эти годы были открыты нейтрон, позитрон, созданы основы квантовой электродинамики, развиты протонно-нейтронная модель ядра, представление об обменном характере ядерных сил, первая теория слабых взаимодействий. Таким образом, в физике появились два новых типа взаимодействий — сильное и слабое. Это обстоятельство еще более подчеркнуло ограниченность программы ЕГТП, стремящейся прежде всего к объединению гравитационного и электромагнитного полей и по-прежнему остававшейся классической по своей сути. Именно начало 30-х годов оказалось тем рубежом, за которым программа ЕГТП постепенно утратила свое значение. По-видимому, лишь авторитет Эйнштейна (и, может быть, Шредингера, который в 40—50-х годах продолжал заниматься едиными теориями) и математическая глубина некоторых из этих теорий привлекали теоретиков к исследованиям в этой области.

Хотя в 40—50-х годах предпринимались отдельные попытки связать воедино на основе программы ЕГТП не только электромагнитное и гравитационное, но и мезонное поле, подавляющее большинство физиков расценивали эти попытки как бесперспективные. Основные усилия теоретиков в это время были направлены на разработку непротиворечивой квантовой электродинамики и распространение методов квантовой теории поля на всю совокупность элементарных частиц. Первая задача была блестяще разрешена С. Томонагой, Дж. Швингером, Р. Фейнманом, создавшими теорию перенормировок. Решение второй задачи затруднялось из-за непрекращающегося открытия все новых элементарных частиц и их свойств. Именно в конце 40-х — начале 50-х годов начался период новых открытий в области физики элементарных частиц: были открыты гипероны и K -мезоны, а также так называемые «резонансы». При таком изобилии различных типов элементарных частиц и их взаимодействий подход, основанный на ЕГТП-программе, казался крайне абстрактным и лишенным реальной эмпирической основы. Большим успехом в физике частиц считалось обнаружение хотя бы полуматематических регулярностей типа закона сохранения странности, дававших некоторые надежды на построение в обозримом будущем разумной теоретической схемы. Открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях во второй половине 50-х годов еще больше осложнило положение в физике элементарных частиц.

Эйнштейн к этому времени уже умер (в 1955 г.), почти никто из ведущих физиков не относился серьезно к программе ЕГТП. В 1958 г. позицию подавляющего большинства физиков ясно выразил Паули в английском издании своей знаменитой энциклопедической статьи по теории относительности, к которому он написал специальное дополнение, посвященное единым геометризованным теориям поля после 1920 г.: «Большинство физиков, включая автора, придерживаются взглядов, высказанных Бором и Гейзенбергом при эпистемологическом анализе ситуации, создавшейся в связи с этими идеями (т. е. принципами неопределенности и дополнительности.— В. В.), и потому считают невозможным полное решение

открытых вопросов в физике на пути возврата к представлениям классической теории поля» [2, с. 419]. Тем не менее Паули рассмотрел основные линии развития программы ЕГТП, еще раз подчеркнув наличие фундаментальных трудностей физического характера на пути ее реализации, так и не преодоленных почти за 40 лет, прошедших со времени появления первых единых геометризованных теорий поля.

Спустя несколько лет после этого еще более реакую оценку программе ЕГТП дал известный советский специалист по ОТО А. З. Петров: «Все имеющиеся „единые теории“ не вышли пока за рамки отвлеченных теоретических построений и не привели к значительным открытиям или следствиям, допускающим экспериментальную проверку... не сыграли... эвристической роли по отношению к другим разделам современной физики» [3, с. 7]. Число высказываний подобного рода можно было без труда умножить. Впрочем, во второй же половине 50-х годов идея построения единой теории поля вновь вышла на первый план, хотя и не на основе программы ЕГТП. Речь идет о единой нелинейной спинорной и квантовой теории поля В. Гейзенберга [4, 5]. Сразу заметим, что надежды на теорию Гейзенберга не оправдались, более перспективным оказалось направление, связанное с концепцией калибровочных полей, которое в конечном счете и привело к знаменитой теперь теории Вайнберга — Салама. Но интересно, как оценивал Гейзенберг, как бы перехвативший эстафетную палочку единых полевых теорий у Эйнштейна, программу ЕГТП? В начале 60-х годов в статье «Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля» он писал о программе ЕГТП: «Эта великолепная в своей основе попытка сначала как будто потерпела крах. В то самое время, когда Эйнштейн занимался проблемой единой теории поля, непрерывно открывались новые элементарные частицы, а с ними — сопоставленные им новые поля. Вследствие этого для проведения эйнштейновской программы еще не существовало твердой эмпирической основы, и попытка Эйнштейна не привела к каким-либо убедительным результатам. Однако неудача, постигшая эйнштейновскую программу, имела и более глубокие основания, чем только неуверенность в эмпирических фактах; эти основания лежат в отношении теоретико-полевых представлений Эйнштейна к квантовой теории» [6, с. 63].

Не останавливаясь здесь на причинах неудачи гейзенберговской концепции, заметим только, что она, сохранив эйнштейновскую идею нелинейности полевых уравнений, отказалась от идей геометризации и общей ковариантности. Калибровочная же концепция объединения полей, приведшая к теории Вайнберга — Салама и к реалистическим проектам объединения не только электромагнитных и слабых, но также и сильных и даже гравитационных взаимодействий, является в геометрическом отношении своеобразным обобщением программы ЕГТП, учитывающим и эйнштейновскую концепцию геометризации физических взаимодействий, и идею общей ковариантности [7]. В связи с большими успехами калибровочной

концепции в 70-х годах постепенно изменилось отношение к программе ЕГТП и беспрецедентным усилиям Эйнштейна, нацеленным на ее реализацию. Ч. Н. Янг, один из творцов концепции калибровочных полей, и упомянутые выше А. Салам, С. Вайнберг и Ш. Глэшоу подчеркивали, что эта концепция восходит к ранним идеям Эйнштейна и Вейля, развитым ими на основе ОТО и программы ЕГТП [1, 8]. «На долгом и трудном пути познания природы мы снова и снова находим идеи, восходящие к Эйнштейну» [9, с. 8].

Таким образом, в связи с нынешним возрождением концепции объединения полей изменилось отношение к программе ЕГТП и возник интерес к истории единых геометризованных теорий поля. Более того, даже предварительное изучение формирования основных идей калибровочной концепции указывает на тесную их связь с едиными геометризованными теориями поля. Тем самым исследование отнюдь не безоблачного пути развития этих теорий приобретает сейчас особую важность.

Но даже если бы не было этого ренессанса и программе ЕГТП был бы вынесен окончательный приговор как явно тупиковому направлению в развитии теоретической физики, изучение истории этой программы было бы для историка современной физики крайне важной и интересной задачей. Рождение программы ЕГТП на рубеже 10-х и 20-х годов XX в., огромные надежды, которые на нее возлагались в те годы, попытки использования единых теорий в осмыслении загадок квантовой теории, приверженность (порой временная, порой очень длительная) к этой программе многих выдающихся физиков и математиков XX в., таких, как Эйнштейн, Гильберт, Вейль, Эддингтон, Шредингер, Паули, Картан, постепенное уменьшение ее авторитета после создания квантовой механики и особенно после начала эпохи физики элементарных частиц (в начале второго тридцатилетия), большой вклад этого направления в развитие новейшей дифференциальной геометрии, наконец, беспримерное упорство Эйнштейна — все это бесспорные реальности физики XX в., причем фундаментальной теоретической физики. И поэтому едва ли можно правильно понять развитие физики в нашем столетии, игнорируя эту еще недавно считавшуюся побочной или даже тупиковой линию развития теоретической физики.

Хотя программа ЕГТП так и осталась нереализованной, а пути ее реализации вовсе не лежали на главных направлениях развития физики, изучение этой программы очень поучительно и позволяет исследовать такие ходы в движении теоретической мысли, мимо которых мы проходим при изучении эволюции программ (например, квантово-теоретической), приведших к созданию общепризнанных научных теорий. Более того, мы увидим, что многие стороны реального исторического процесса познания на его магистральных путях становятся понятными лишь при учете усилий на этих побочных тропах. Конечно, маргинальный характер программ, подобных программе ЕГТП, выясняется далеко не сразу, а лишь в процессе их разработки, сопровождающейся неудачами, особенно на фоне успехов конкурирующих программ.

Исследование единых геометризованных теорий поля дает интересный материал и в методологическом отношении. Проблемы структуры научной теории, функционирования методологических принципов физики, взаимоотношения физических аспектов и математического аппарата, аксиоматики физики, эвристической роли теоретических схем, альтернативных по отношению к магистральной программе, — все эти коренные проблемы философии и методологии научного познания оказываются в центре внимания при анализе путей развития единых геометризованных теорий поля.

Итак, актуальность, историко-научная и методологическая ценность изучения программы ЕГТП достаточно очевидны. Тем не менее соответствующие историко-научные работы практически отсутствуют. Мы не претендуем на то, чтобы целиком заполнить этот пробел. Наша цель — рассмотреть лишь узловые моменты в генезисе и развитии единых геометризованных теорий поля. Заранее отметим принятые нами ограничения. Во-первых, в качестве предыстории и предпосылок программы ЕГТП мы рассматриваем только электромагнитно-полевую программу, а также некоторые характерные черты ОТО как ядра программы ЕГТП. Таким образом, предшествующая история проблемы синтеза физического знания, связанная, например, с классико-механической программой (XVIII—XIX вв.), остается за пределами нашей работы.

Во-вторых, мы ограничиваем наше рассмотрение примерно полутора десятилетиями, последовавшими после выдвижения первой образцовой в программном отношении единой теории поля (теории Вейля 1918 г.). 1932—1933 годы — верхний хронологический предел нашего систематического анализа развития программы ЕГТП. Почему? Дело в том, что к этому времени накопился обширный материал по единым теориям и были созданы все основные варианты теорий такого рода. Кроме того, в эти годы большинству физиков стало совершенно очевидным преимущество квантово-теоретической программы для решения проблемы строения материи. Наконец, как мы уже отмечали, именно в это время становится ясным, что, помимо электромагнитного и гравитационного полей, существуют и другие поля, связанные с только что открытыми новыми элементарными частицами. Именно в начале 30-х годов возникают первые теоретические схемы сильного и слабого взаимодействий, а теория электромагнитного поля преобразуется в квантовую электродинамику. Сказанное не означает, что в последующие годы не появляются больше единых геометризованных теорий поля. Но позиции программы к началу 30-х годов оказываются настолько подорванными, что даже такие приверженцы ее, в известном смысле ее основатели, как Г. Вейль, признают поражение или по крайней мере бесперспективность избранной ими ранее стратегии.

В-третьих, нам, к сожалению, не удалось рассмотреть все возникшие в 20—30-х годах варианты единых теорий поля. Пришлось сосредоточить главное внимание на тех теоретических схемах, которые считались в то время наиболее перспективными и разрабатывались с максимальной интенсивностью. Поскольку бесспорными

лидерами программы ЕГТП были Вейль, Эйнштейн, Эддингтон, именно их работы, а также работы, привлекавшие их внимание, исследовались наиболее обстоятельно.

Наконец, во всей этой истории мы выделяем некоторые узловые моменты и узловые темы. Например, теорию Вейля и ее последующее развитие, потому что она была первой действительно программной теорией и потому что именно она имела наибольшее эвристическое значение в генезисе фундаментальных аспектов квантовой теории. Примером узлового момента в развитии программы ЕГТП был 1921 год, когда были выдвинуты теории Эддингтона, Калуцы, когда и Эйнштейн явным образом перешел на позиции этой программы. Вот еще несколько узловых тем, которые рассматриваются в нашей работе: эволюция эйнштейновского отношения к программе ЕГТП — от полного неприятия до полного переключения в ее русло (конечно, Эйнштейн — фигура особая в рассматриваемой истории, он последовательно испытывал все или почти все теоретические схемы ЕГТП, существовавшие в то время); эвристическая роль единых теорий в генезисе и последующем развитии квантовой механики и квантовой теории поля (в частности, детально исследуется история возникновения понятия калибровочной симметрии и концепции калибровочных полей, поскольку, с одной стороны, единые теории поля сыграли при этом очень важную роль, а с другой стороны, именно на основе этой концепции уже во второй половине XX в. возник реальный проект новой единой теории поля); явный регресс (и его осознание) программы ЕГТП в начале 30-х годов и т. д. Поэтому наша работа носит в значительной мере очерковый характер.

Мы уже отмечали почти полное отсутствие историко-научных работ, посвященных единым геометризованным теориям поля. Все-таки мы использовали не только первоисточники. В первую очередь для нас были важны некоторые обзорные работы по единым геометризованным теориям поля, написанные М.-А. Тоннела, В. Паули, П. Бергманом, А. С. Эддингтоном, Г. Вейлем, Г. Бекком, А. Лянде, П. Иорданом, Э. Шредингером, Э. Шмутцером, Ю. Б. Румером, Г.-Ю. Тредером, А. З. Петровым и др. [10—23]. Мы использовали также научно-биографические материалы, относящиеся к жизни и трудам Эйнштейна, Гильберта, Вейля, Эддингтона, Паули, Шредингера и других физиков и математиков 20—30-х годов; переписку и мемуарные материалы (особенно ценной является здесь переписка Эйнштейна); историко-научные исследования по смежной тематике, в частности по истории квантовой механики: работы М. Джеммера, М. Клейна, Дж. Мехры, П. Формэна, В. Рамана и П. Формэна, Ф. Хунда и др. [24].

При обсуждении электромагнитно-полевой программы особое значение для нас имели работы Р. Мак-Кормака, Т. Хирсигэ, С. Гольдберга, Л. Пайнсона и др. [24]. В методологическом плане мы опирались на концепцию научно-исследовательских программ (хотя и не в полной мере и с учетом той критики, которой она была подвергнута в советской литературе) [25, 26].

Глава первая

Электромагнитно-полевая программа синтеза физики

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Развитие физики, особенно в периоды ее радикальной перестройки, демонстрирует плодотворность той методологической идеализации, которую принято ассоциировать с концепцией научно-исследовательских программ (НИП) И. Лакатоса. Эта концепция позволяет осмыслить разнообразные факты развития научного знания. Вместе с тем обширный историко-научный материал, относящийся, в частности, к физике, подтверждает реальность существования образований, организованных и функционирующих так же, как НИП. Программа имеет «ядерную» структуру: «жесткое ядро», состоящее из одной или нескольких фундаментальных теоретических схем и некоторых дополнительных положений методологического (и даже иногда философского) характера, и «защитный пояс» вспомогательных гипотез и структур¹, позволяющий фиксировать проблемы для дальнейшего исследования, предсказывать аномалии и устранять их, точнее, превращать их в подтверждающие примеры. Тем самым «защитный пояс» программы является ее активным органом, эволюционирующим в процессе функционирования НИП и определяющим процедуры «позитивной эвристики», в то время как «жесткое ядро» ответственно за стратегию программы и, как правило, за тот вклад, который вносит НИП в научную (или, более узко, физическую) картину мира.

Понятие НИП используется обычно достаточно широко, в частности в области истории физики оно может быть применено к специальным разделам физики и даже к отдельным проблемам, например при анализе проблемы электропроводности металлов. В этих случаях «ядро» НИП включает, как правило, наряду с фундаментальными теориями и весьма частные теоретические схемы. Вместе с тем со времени возникновения науки, в частности физики, основополагающую роль в ее развитии играли программы, относящиеся к физике в целом или к ее основным теоретическим построениям [27]. Такие программы будем называть глобальными. Именно глобальные НИП являются наиболее долгоживущими, именно они затрагивают самые основы физического знания (если речь идет о

¹ Разработка эквивалентных математических формализмов «ядерных» теорий, например аналитической механики Лагранжа, Гамильтона, Якоби и др.— это как раз пример работы в зоне «защитного пояса», в данном случае классико-механической программы, содержащей в качестве основной, «ядерной» теории механику Ньютона.

физике), именно «регресс» одних глобальных НИП и явный «прогресс» других, что приводит в конечном счете к замене первых вторыми, можно естественным образом связать с феноменом «научной революции». Научные картины мира глубоко связаны с глобальными программами. Более того, поскольку понятие «научной картины мира» является почти общепринятым и уже давно используемым историками и методологами науки [28—35], оно фактически нередко применяется и тогда, когда более эффективным и подходящим оказывается понятие глобальной НИП. Дело в том, что понятие картины мира обладает некоторыми недостатками по сравнению с понятием научно-исследовательской программы. Картина мира обычно связывается с наглядным образом мира с точки зрения фундаментальных научных теорий. Она не включена в какую-либо эффективно работающую методологическую схему, подобную концепции НИП, имеет менее ясные структурные очертания по сравнению с НИП и т. д. Глобальную программу не обязательно связывать с требованиями наглядности, это понятие более оперативное и методологичное, чем картина мира, хотя между этими двумя понятиями существует и немало общего: они имеют глобальный характер, оба основаны на фундаментальных теориях, оба нередко содержат положения философского характера. Характерные для XVIII—XX вв. механическая, электромагнитная и квантово-релятивистская картины мира (в последнем случае — с известными оговорками и ограничениями) можно сопоставить с соответствующими глобальными НИП.

Проблема единства физического знания теснейшим образом связана с исследованием глобальных НИП. Основным предметом нашего анализа будут в дальнейшем единые геометризованные теории поля (главным образом гравитационного и электромагнитного), стремившиеся в своих радикальных вариантах свести к полю и основные элементарные частицы материи. Таким образом, установив эти теории близки по своему смыслу к установкам глобальных исследовательских программ. Естественно поэтому говорить о глобальной НИП, основанной на двух основных классических теориях поля — электромагнитного и гравитационного, причем основную программную функцию выполняет именно теория гравитационного поля, т. е. общая теория относительности (ОТО), поскольку способ объединения полей во всех (или почти во всех) ЕГТП основан на характерной для ОТО геометризации физических взаимодействий. Понятие физической картины мира, основанной на ЕГТП, выглядит особенно неудачным и фактически никогда и не применялось. Это объясняется не только тем, что представления ОТО и родственных ей ЕГТП не являются наглядными, но и тем, что ни одна из ЕГТП не стала общепризнанной. Различные единые теории поля, сменяя друг друга, остались скорее на уровне фундаментальной, но нереализованной программы, так и не приведя к картине мира, признанной научным сообществом физиков. Иначе обстояло дело с электромагнитно-полевой программой (ЭПП). Она, конечно, была более наглядной по сравнению с программой ЕГТП. Но главное, на рубе-

же XIX и XX вв. большинство физиков придерживались (в том или ином варианте) ЭПП, и многие из них, а впоследствии и историки науки использовали понятие «электромагнитной картины мира», «электромагнитного мировоззрения» и т. д. [29, 34, 35]. Но и в этом случае понятие глобальной программы оказывается вполне приемлемым и даже, по-видимому, более уместным, чем понятие картины мира.

В периоды «научных революций» налицо, как правило, несколько конкурирующих программ, именно глобальных НИП. Например, после создания специальной теории относительности (СТО) при решении фундаментальных проблем гравитации, строения вещества реально конкурировали классико-механическая, электромагнитно-полевая, релятивистская (или релятивистски-полевая) программы (КМП, ЭПП, РП). Кроме того, и сами программы могут расщепляться на несколько подпрограмм, отличающихся друг от друга не только «защитным поясом», но и некоторыми, иногда существенными деталями «ядерной» структуры. Между «ядрами» конкурирующих программ существует, несмотря на резкое порой различие программных установок, определенное родство. Во-первых, фундаментальные теории, лежащие в основе программных ядер, могут быть связаны между собой той или иной формой принципа соответствия (например, специальный принцип относительности Эйнштейна — Пуанкаре в РП и соответственно теория пространства-времени классической механики в КМП). Во-вторых, и это сейчас для нас более существенно, среди методологических предпосылок, относящихся к «ядрам» различных программ, как правило, имеется некоторая совокупность общих элементов. Эти общие элементы принадлежат к сложившимся в данной области науки нормам научного исследования и методам построения научных теорий. Хотя различные ученые могут быть приверженцами различных глобальных программ, они в основном относятся к одному научному сообществу (в данном случае имеются в виду ученые-современники). В. Томсон, сторонник КМП, М. Абрагам и Г. Ми, сторонники и даже лидеры ЭПП, Эйнштейн, лидер РП, безусловно, принадлежали к одному научному сообществу. Общие для данного научного сообщества положения и принципы методологического характера образуют не очень ясно очерченную систему так называемых методологических принципов физики (МПФ), которая как целое сравнительно недавно стала предметом детального исследования [36]. В условиях регресса общепризнанных программ и множественного рождения теорий в период революционного преобразования научного знания, когда возникают новые программы, система МПФ обеспечивает необходимую устойчивость и преемственность этого знания, а также выступает в роли одного из арбитров в соревновании НИП. К принципам, образующим эту систему МПФ, относятся, например, принципы симметрии, сохранения, причинности, простоты, наблюдаемости, соответствия, единства физического знания. Эта система, так же как и НИП, является идеализацией, правомерность которой подтверждается историко-научным материалом, относящимся к физике вто-

рой половины XIX—XX в., а целесообразность ее введения оправдывается большей, как нам кажется, реалистичностью и гибкостью дополненной таким образом методологии НИП [37, 38].

В этой главе мы рассмотрим некоторые попытки построения единой теории поля, основанные на ЭПП. Они для нас интересны прежде всего потому, что ЭПП была первой полевой программой синтеза физики, опирающейся на понятие классического — в данном случае электромагнитного — поля, описываемого системой дифференциальных уравнений с частными производными 2-го порядка. Далее, одним из главных пунктов ЭПП, как и программы ЕГТП, была идея сводимости к полю всей остальной «материи», в первую очередь простейших заряженных частиц вещества и атомов (понимаемых либо как сгустки поля, своеобразные вихревые образования, либо как некоторые сингулярности). Наконец, некоторые конкретные проекты реализации ЭПП, например теории Эйнштейна (1908—1910) и Ми (1912—1913), опирались на идею нелинейного обобщения максвелловских уравнений электромагнитного поля, подобно тому как программа ЕГТП связана с обобщением нелинейных уравнений ОТО.

Несмотря на столь значительное родство, между программами ЭПП и ЕГТП имеются глубокие различия. Гравитационное поле в рамках ЭПП предполагалось полностью сводимым к электромагнитному (впрочем, в некоторых умеренных вариантах ЭПП допускалось самостоятельное существование поля тяготения). Электромагнитное поле, основа всего сущего, предполагалось непрерывно распределенным в евклидовом пространстве, а после открытия СТО пространственно-временной континуум, в который вкладывалось поле, был наделен 4-мерной псевдоевклидовой структурой, не подверженной влиянию поля. Таким образом, в ЭПП методологическая идея синтеза была существенно редукционистская: и гравитация, и вещество, и открытые в начале века квантовые проявления излучения, и тем более сложные эффекты физики твердого тела, газов, жидкостей и т. д. предполагались сводимыми к электромагнитному полю, описываемому либо уравнениями Максвелла, либо той или иной их модификацией. Забегая вперед, заметим, что методологическая идея синтеза в программе ЕГТП принципиально иная, хотя и в этой программе имеются элементы редукционизма. Объединение в ней достигается прежде всего на геометрической основе: оба известных к началу 20-х годов поля — электромагнитное и гравитационное — предполагаются проявлениями единой геометрической структуры пространства-времени наподобие того, как в ОТО гравитационное поле рассматривается как проявление кривизны 4-мерного псевдориманова пространства и описывается метрическим тензором и соответствующими символами Кристоффеля (коэффициентами аффинной связности). В частности, в одних вариантах электромагнетизм ассоциировался с кручением обобщенного соответствующим образом псевдориманова пространства, в других — с введением пятого измерения, в третьих — с введением несимметричного метрического тензора 4-мерного пространства и т. д. В результате,

в ЕГТП на первый план, как и в ОТО, выходят принципы инвариантности, геометрические аспекты, релятивистский подход. Более туманно обстоит дело в программе ЕГТП с проблемой сведения частиц к единому полю: частицы предполагалось описывать либо как некоторые особые решения основных уравнений поля, либо, напротив, с помощью всюду регулярных решений. Здесь можно усмотреть значительно больше родства с ЭПП, особенно при использовании нелинейных обобщений уравнений Максвелла.

Исторически программа электромагнитно-полевого синтеза физики непосредственно предшествовала ЕГТП-программе и, несомненно, повлияла на ее формирование, так же как понятие поля, возникшее в максвелловской теории, было безусловно ключевым при создании ОТО. Более того, некоторые лидеры программы ЕГТП, прежде всего Эйнштейн и Гильберт, сами принимали участие еще до создания ОТО в разработке единых теорий поля, основанных на ЭПП.

Таким образом, изучение ЭПП и основанных на ней конкретных вариантов единых теорий поля представляет для нас двойной интерес: в логическом отношении — как реальных прообразов программы ЕГТП и соответствующих теорий и в историческом отношении — как непосредственных предпосылок и факторов формирования ЕГТП.

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ПОЛЕВОЙ ПРОГРАММЫ

Процесс формирования ЭПП был достаточно сложным, и его основательное изучение не является предметом исследования в настоящей работе. К тому же имеется несколько глубоких и детальных работ, фактически посвященных этой проблеме: работы Р. Мак-Кормака, М. Джеммера, Т. Хиросигэ, Й. Илли и др. [33—35, 39—41]. В большинстве из них, в частности в наиболее обстоятельной статье Р. Мак-Кормака, речь, правда, идет не об ЭПП, а об электромагнитной картине мира. Мы, однако, как уже отмечалось, предпочитаем использовать понятие глобальной НИП, в данном случае ЭПП.

Ранее упоминалось о существовании нескольких вариантов реализации ЭПП (или даже нескольких вариантов ЭПП). Опишем сначала общие черты всех этих вариантов. Основу «ядра» этой программы составляла вначале максвелловская теория электромагнитного поля, развитая затем до уровня электронной теории Лоренца (теория электромагнитного поля была создана Максвеллом к середине 60-х годов XIX в., а первое систематическое изложение электронной теории было дано Лоренцем в 1892 г.). Предполагалось также, что именно электромагнитное поле является первичной физической реальностью. Правда, далеко не все физики использовали понятие поля, более распространенным часто заменяющим его было понятие эфира; кроме того, в некоторых умеренных вариантах ЭПП допускалась несводимость заряженных частиц к полю, хотя в большинстве вариантов считалось, что масса заряженных частиц,

электронов прежде всего, своим происхождением целиком обязана электромагнитному полю.

ЭПП, первые варианты которой были выдвинуты в середине 90-х годов Э. Вихертом в Германии и Дж. Лармором в Англии и которая в 1900—1905 гг. становится почти общепризнанной, предшествовали две более частные программы: фарадеевская программа близкодействия, сыгравшая основополагающую роль в генезисе теории Максвелла, и корпускулярно-электрическая программа В. Вебера, которая наиболее интенсивно разрабатывалась им в период, когда основы максвелловской теории поля были уже созданы, т. е. в 70-х годах, и которая существенно повлияла на Лоренца. Все же определяющей глобальной программой в XIX в. продолжала оставаться классико-механическая программа (КМП), которой в наиболее фундаментальных вопросах (о первичности массы, о строении эфира, о пространственно-временных представлениях и причинности) придерживалось подавляющее большинство физиков, в том числе и приверженцы Фарадея и Максвелла, и сторонники Вебера.

Лоренц высоко ценил веберовскую программу, согласно которой все сущее предполагалось свести к электрическим частицам двух знаков, взаимодействующие между которыми определялось электродинамическим законом Вебера, и в своей электронной теории опирался в равной мере как на понятие поля и теорию Максвелла, так и на понятия заряженных частиц и соответствующие фрагменты программы Вебера².

Радикальный вариант ЭПП, выдвинутый в 1894 г. Вихертом и несколько позже Лармором, первичной реальностью объявлял эфир, возбужденные состояния которого давали заряженные частицы (электроны), а происхождение массы последних объяснялось на основе концепции электромагнитной массы, разработанной в 80—90-х годах главным образом английскими учеными (Дж. Дж. Томсоном, О. Хевисайдом, а также, несколько позже, Дж. Сирлом и В. Б. Мортонем). Законы ньютоновской механики предполагались выводимыми из уравнений электромагнитного поля. Несколько слов о концепции электромагнитной массы. В 1881 г. Дж. Дж. Томсон, исследуя движение заряженного шарика, нашел, что вследствие взаимодействия заряда этого шарика с создаваемым им полем возникает сила, противодействующая движению шарика. Это можно было истолковать так, будто шарик обладал дополнительной массой. «Другими словами, оно (т. е. сопротивление, испытываемое

² Р. Мак-Кормак отмечает следующие важные моменты веберовской программы, означавшие явные отступления от КМП и в полной мере развитые либо в рамках электронной теории и электродинамики движущихся тел, существенно связанных с ЭПП, либо в СТО: замена ньютоновского мгновенного действия распространением электрической силы с конечной скоростью, нарушение 3-го закона механики для электродинамических сил, наличие верхнего предела для относительных скоростей частиц, возможность симметричного использования координат пространства и времени при описании электродинамических явлений, а также идея зависимости кажущейся массы электрических частиц от их скорости, новая формулировка закона сохранения энергии, приспособленная к электродинамике.

шариком.— В. В.) должно быть эквивалентным увеличению массы движущейся заряженной сферы»,— писал Томсон [41, с. 144]. Эта добавочная масса, согласно расчетам Томсона, оказывалась равной

$$\mu = \frac{4}{15} \frac{e^2}{ac^2},$$

где e — заряд шарика, a — его радиус, а c — скорость света.

Эту массу электромагнитного происхождения, не связанную с каким-либо определенным количеством вещества, называли «кажущейся», «фиктивной». Томсон, подсчитав «кажущуюся» массу Земли в предположении, что она несет на себе некоторый электрический заряд, максимально допустимый по геофизическим представлениям того времени, пришел к выводу о чрезвычайной малости ее по сравнению с обычной массой Земли и вначале был весьма далек от мысли истолковывать всю инертную массу заряженных тел как «индуцированную». Через восемь лет О. Хевисайд дал более строгий расчет этого эффекта. Он получил результат, ставший классическим³:

$$\mu = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2}.$$

Этот эффект Томсона — Хевисайда наводил на мысль о возможности полного сведения механической массы к электромагнитному полю. Вопрос об электромагнитной природе массы стал центральным для выяснения жизнеспособности ЭПП, получавшей в конце 90-х годов все большую поддержку среди физиков, особенно в Германии и Англии. Хотя концепция электромагнитной массы была детищем английских ученых, их представления об эфире были более механистичными по сравнению с воззрениями на эфир немецких физиков. Поэтому английский вариант ЭПП был более противоречивым. Наряду с Дж. Дж. Томсоном так или иначе приверженцами ЭПП в Англии были в эти годы О. Хевисайд, Дж. Лармор, Дж. Фицджеральд, О. Лодж и др.

Лоренц же занимал более осторожную позицию, воздерживаясь от глобального электромагнетизма и предпочитая разрабатывать конкретные проблемы электронной теории и электродинамики движущихся тел, которые в конечном счете привели его к результатам принципиального значения. В 1895 г. ему пришлось допустить возможность нарушения принципа равенства действия и противодействия для эфира, а в 1899 г. он установил зависимость массы любых тел, а не только заряженных частиц, от их скорости. Кстати, зависимость электромагнитной массы заряда от скорости его движения была установлена Дж. Дж. Томсоном еще в 1893 г., хотя эта зависимость и отличалась от той, которая впоследствии была признана правильной (впрочем, она содержала характерный релятивистский множитель и приводила к бесконечному значению массы

³ Хевисайд более реалистически смотрел на полученный им результат, считая увеличение массы реальным физическим эффектом.

для скорости, равной скорости света) [42]. Распространение же зависимости массы от скорости на любые, в частности незаряженные, тела означало явное признание ограниченности ньютоновской механики и тем самым КМП в целом. Этот результат Лоренца был следствием введения его (и Фицджеральда) гипотезы сокращения в электронную теорию. Он оказался новым сильнейшим стимулом разработки ньютоновской динамики и ЭПП.

Чуть раньше лавиной пошли экспериментальные открытия в области рентгеновских лучей, радиоактивности и электрического разряда в газах (1895—1896), приведшие к открытию электрона (Дж. Дж. Томсон и Э. Вихерт, 1897). Для электронной теории и ЭПП в целом это было событием огромной важности не только потому, что была наконец экспериментально обнаружена ожидаемая теоретиками фундаментальная частица, но еще и потому, что экспериментаторы получили в руки могучее средство для проверки новой, «электромагнитной» динамики. Последовавшие за этим объяснение эффекта Зеемана (Лоренц, 1897), электронная теория электропроводности металлов (Э. Рикке, 1898) еще больше укрепили позиции электронной теории и электромагнитно-полевой программы.

Т. де Кудр в 1898 г. предположил, что с помощью катодных лучей можно экспериментально проверить, сводится ли масса электрона к электромагнитной. Открытие электрона, а также доказательство Дж. Дж. Томсоном в 1900 г. тождества электронов, получаемых различными способами, создали необходимые предпосылки для экспериментального решения этого кардинального для ЭПП вопроса. Обнаружение явления радиоактивности и последовавшее за ним отождествление бета-лучей с быстролетающими электронами сделало вполне реальной опытную проверку зависимости массы электронов от скорости их движения.

В 1900 г. Лоренц в большом программном докладе в Лейдене «Электромагнитные теории физических явлений» блестяще описал успехи ЭПП, уделив, в частности, большое внимание проблемам строения вещества, и отметил, что только гравитацию пока не удается вместить в рамки этой программы. В том же году он попытался заполнить и этот пробел, разработав весьма перспективную схему сведения гравитации к электромагнетизму, основанную на полевом обобщении идей Вебера, Цельнера и Моссотти. Аналогичную теорию тяготения в том же году развил В. Вин. При этом он постулировал полностью электромагнитное происхождение массы заряженных частиц, составляющих материю. В. Вин, как и Лоренц, главную задачу физики в то время видел в объединении физики на основе ЭПП, но в отличие от него особенно большое внимание уделял последовательному электромагнитному обоснованию механики.

ЭПП продолжала укреплять свои позиции. С одной стороны, она явно прогрессировала, превращая аномалии в подтверждающие примеры, ее теоретический рост в эти годы опережал также растущий эмпирический материал. С другой стороны, теоретикам все более полно удавалось согласовывать ЭПП с системой методологических принципов. Например, усилия многих теоретиков, в частности

А. Пуанкаре, были направлены на то, чтобы согласовать электронную теорию с принципом сохранения импульса. С этой целью Пуанкаре разработал понятие электромагнитного импульса, и это согласование было достигнуто. В 1902—1903 гг. фундаментальные исследования по динамике электронов в русле ЭПП были выполнены молодым геттингенским теоретиком М. Абрагамом, ставшим одним из лидеров новой программы. Его подход был более радикальным, чем лоренцевский: если Лоренц допускал существование неэлектромагнитных сил именно для обеспечения равновесия модели деформируемого электрона, используемой им в динамике электронов, то Абрагам развил модель недеформируемого электрона, не требующую этого допущения. Несмотря на то что Лоренц продолжал придерживаться своей модели, которая была, естественно, связана с его электродинамикой движущихся тел, многие физики в начале века отдали предпочтение теории Абрагама именно из-за ее более последовательного согласования с ЭПП. В результате в центре внимания оказался вопрос о точной экспериментальной проверке зависимости массы электрона от скорости, поскольку между соответствующими формулами Лоренца и Абрагама было определенное различие. В число лидеров ЭПП выдвинулся на этом этапе геттингенский физик-экспериментатор В. Кауфман. В своем программном докладе на собрании немецких естествоиспытателей и врачей в 1901 г. он, подчеркнув успехи ЭПП, которую, как и Лоренц, считал развитием программы Вебера, сформулировал пять основных проблем, от решения которых зависела, по его мнению, окончательная победа «электромагнитного мировоззрения». Такими проблемами он считал: 1) экспериментальное доказательство сводимости всей массы электрона к электромагнитной; 2) систематическое сведение механики к электромагнетизму (в духе Вина); 3) экспериментальное доказательство электронного строения вещества (точнее, того, что вещество состоит только из электронов); 4) установление связи свойств периодической системы элементов с определенными конфигурациями электронов в атоме (здесь еще требовались значительные теоретические исследования); 5) экспериментальное подтверждение электромагнитной теории тяготения Вина. В 1902 г. Кауфман подтвердил формулы Абрагама для зависимости массы электронов от скорости их движения, и Лоренц в 1904 г. в докладе, сделанном в электротехническом обществе в Берлине, склонен был признать успехи и перспективность ЭПП в ее радикальном варианте: «На этом основании (т. е. на основании опытов Кауфмана.— В. В.) следует принять, что отрицательные электроны не имеют истинной массы, а имеют только электромагнитную массу, что они представляют собой, так сказать, только заряд без материи...» [43, с. 27]⁴.

⁴ Правда, чуть дальше он говорит об этом несколько осторожнее, в сослагательном наклонении, считая результаты кауфмановских опытов еще недостаточными для однозначного вывода о торжестве позиции Абрагама — Кауфмана: «Можно представить себе, что вся и всякая весомая материя состоит из электронов и что вся и всякая кинетическая энергия движущихся тел состоит из энергии электромагнитных полей. Если бы это допущение подтвердилось, то

Итак, к 1904—1905 гг. ЭПП уже достигла своей вершины, хотя приверженцы ее еще не осознали этого. Уже в это время, после того как были развиты основы электродинамики движущихся тел и СТО, а идеи квантов стали обретать все большую реальность, ЭПП начала обнаруживать признаки регресса и постепенно стали формироваться новые, конкурирующие программы, связанные с распространением СТО на основные разделы физики (релятивистская программа, РП) и с внедрением квантовых представлений в учение о структуре излучения и вещества (квантово-теоретическая программа, КТП). Впрочем, общественное мнение физиков ясно почувствовало перемену ситуации только к концу первого десятилетия XX в.

Признавая реальность ЭПП, мы вместе с тем еще раз хотим подчеркнуть, что эта конструкция является методологической идеализацией. Существовал весьма широкий спектр ее интерпретаций. Причем некоторые из них, в которых особое внимание уделялось строению эфира, были весьма механистическими. Порой уступки классико-механической программе делали даже Лоренц и Пуанкаре, например при обсуждении понятия импульса электромагнитного поля. Даже после того, как СТО решающим образом подорвала концепцию эфира, физики иногда возвращались к ней. Отголоски эфирной концепции, как мы увидим, встречаются даже в физике 20-х годов [40].

ТРУДНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ПОЛЕВОЙ ПРОГРАММЫ: СТО И КВАНТЫ

Исследования по электронной теории и электродинамике движущихся тел, связанные с развертыванием ЭПП, особенно работы Лоренца и Пуанкаре, и привели в конечном счете к СТО, которая плохо согласовывалась с основными положениями этой программы. Дело было не только в том, что формулы релятивистской динамики совпадали с формулами Лоренца, а не Абрагама, но прежде всего в том, что СТО поставила под сомнение само существование эфира — одного из главных понятий ЭПП. К тому же основной программный акцент после создания СТО сместился от полевого реду-

в конце концов приходилось бы не электромагнитные явления объяснять механически, а наоборот, механические явления объяснять процессами электромагнитными; в таком случае вся и всякая техника в основе своей была бы электротехникой» [43, с. 32]. Впрочем, при подготовке этого доклада к печати в 1905 г. Лоренц уже полагал, что «новейшие измерения Кауфмана (1905) опровергли гипотезу деформируемого электрона». «Таким образом, — продолжал Лоренц, — попытку мою вывести из электронной теории полную независимость явлений от скорости поступательного движения следует признать неудавшейся». Иначе говоря, результаты опытов Кауфмана как раз в год создания СТО привели Лоренца к отказу от развитой им электродинамики движущихся сред, которую он прочно связывал со своей гипотезой о деформируемом электроне, и от принципа относительности в области электромагнетизма.

дионизма, характерного для ЭПП, к эвристике, связанной с требованием лоренц-ковариантности и с релятивистской методологической техникой, основы которой были заложены в знаменитой статье Эйнштейна по СТО (1905).

СТО оказалась действительно программной теорией, она образовала «ядро» новой, релятивистской программы, которая привела вскоре к релятивистской перестройке большинства разделов физики и к созданию общей теории относительности, существенно обобщившей саму релятивистскую программу.

Научное сообщество физиков далеко не сразу осознало революционные выводы теории относительности и то, что она шла вразрез с ЭПП. В течение более чем пяти лет после создания СТО опыты кауфмановского типа продолжали находиться в центре внимания, а СТО и теория Лоренца давали одинаковый результат для зависимости массы электронов от скорости, в противовес теории Абрагама, связанной с радикальным вариантом ЭПП. Поэтому еще в течение ряда лет большинство специалистов не разделяли четко СТО и теорию Лоренца, называя ее чаще всего теорией Эйнштейна—Лоренца. Даже еще в 1906 г. очень многие физики стояли на позициях ЭПП. Об этом свидетельствует, например, дискуссия об опытах Кауфмана на собрании немецких естествоиспытателей и врачей в 1906 г. По мнению самого Кауфмана и большинства присутствующих, теория Абрагама лучше согласовывалась с результатами этих опытов. Это поддерживало уверенность в правильности ЭПП. Единственным из числа присутствовавших ученых, кто защищал позицию Лоренца и Эйнштейна, был М. Планк, который подчеркивал, что результат Лоренца в рамках СТО получался без каких-либо специальных предположений о форме электрона. Оппоненты Планка — Абрагам, Кауфман, Бухерер, Зоммерфельд, Рунге, Ганс и др.— прочно стояли на позициях ЭПП, которую считали более прогрессивной, чем точку зрения Лоренца—Эйнштейна (последнюю они называли «механико-релятивистским консерватизмом»). Вспомним, что сам Лоренц после опытов Кауфмана 1905 г. был готов отказаться (и фактически отказался) от своей теории, выводы которой совпадали с выводами СТО, в пользу максималистского варианта ЭПП, опиравшегося на теорию Абрагама.

Только после работ Г. Минковского намечался переход физиков на позиции теории относительности, к тому же как раз в 1909—1911 гг. эксперименты кауфмановского типа весьма определенно стали свидетельствовать в пользу СТО. Именно в эти годы физики начали рассматривать принцип относительности как универсальный физический принцип, не зависящий от положений электрошной теории, а СТО как универсальную феноменологическую теорию, только исторически связанную с электродинамикой. Коренной вопрос ЭПП об электромагнитной природе массы, в частности об электромагнитном истолковании зависимости массы электрона от скорости, в значительной мере утратил свою актуальность, так как СТО объясняла эту зависимость без каких-либо специальных предположений о структуре электрона. Начиная с этого времени,

т. е. с 1909—1911 гг., наиболее глубокие проблемы ЭПП, прежде всего проблемы, связанные с электромагнитной концепцией массы, которые в 1900—1906 гг. находились в центре внимания научной общественности, стали постепенно утрачивать свое значение. Признание ошибочности теории Абрагама означало и признание чрезмерности требований ЭПП, вступившей, таким образом, в стадию устойчивого регресса.

Ограниченность ЭПП проявилась и в другом отношении. Речь идет о безуспешных попытках объяснить на основе этой программы, как и вообще на основе каких-либо классических представлений, квантовые особенности излучения «черного тела», впервые обнаруженные Планком в 1900 г. Так, Лоренц уже в 1903 г. показал, что электронная теория способна объяснить лишь длинноволновый предел квантовой формулы Планка. Это было одним из первых важных указаний на ограниченность ЭПП как раз в период, когда она еще находилась на подъеме. И в дальнейшем Лоренц неоднократно подчеркивал несовместимость квантовых идей с электронной теорией в ее классической форме.

Хотя сам Планк не был приверженцем ЭПП, он твердо верил в правильность классической теории поля Максвелла и поэтому открытые им кванты не связывал с реальной структурой излучения. Важную роль в развитии квантовых идей сыграли исследования Эйнштейна 1905—1909 гг. Допустив реальное существование квантов света, он успешно объяснил ряд непонятных явлений, таких, как фотоэффект, флюоресценция и фотоионизация газов. Применяя затем формулу Планка к колебаниям атомов в твердом теле, Эйнштейн объяснил отклонение наблюдаемых значений теплоемкости от их значений, рассчитываемых по формулам классической физики. Эти работы Эйнштейна открыли новые горизонты для применения квантовых идей и были подхвачены В. Нернстом (вместе с его сотрудниками), А. Зоммерфельдом, П. Дебаем и др. К концу первого десятилетия XX в. стала вырисовываться идея универсальности квантовых закономерностей.

Несмотря на то что почти никто из физиков в эти годы либо не верил в реальность квантов, либо считал их в перспективе сводимыми к проявлениям классического электромагнитного поля или даже эфира, эвристическая сила квантовых идей становилась все более осязаемой, а их несовместимость с ЭПП все более очевидной. Своеобразным рубежом на этом пути стал 1-й Сольвеевский конгресс, проходивший в 1911 г. в Брюсселе, на котором ведущие физики признали несомненные успехи квантовой теории и неспособность классической физики, в частности ЭПП, вместить ее в свои рамки.

По существу, к этому времени уже сложилась квантово-теоретическая программа, первым выдающимся успехом которой стала квантовая теория Бора 1913 г. Проблема строения атома оказалась непосильной для электронной теории и ЭПП в целом. Квантово-теоретическая программа привела к бурному прогрессу при реше-

нии этой проблемы, завершившемуся через полтора десятилетия созданием квантовой механики.

Таким образом, ЭПП, зародившаяся в середине 90-х годов XIX в. и достигшая наибольших успехов и популярности в первые годы XX в., к концу первого десятилетия отошла на второй план и вступила в стадию устойчивого регресса. На передовые рубежи физики вышли теперь РП и КТП, последовательное развертывание которых вело, с одной стороны, к релятивистской перестройке всей физики и к ОТО, а с другой — к систематическому введению квантов в физику микромира и, наконец, к квантовой механике.

ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ПОЛЕВОЙ ПРОГРАММЕ

Каким образом ЭПП пыталась преодолеть трудности, связанные со СТО и квантами? В течение долгого времени, даже и во втором десятилетии XX в., многие физики продолжали скептически относиться к реальности квантов, считая, как и Планк, дискретными лишь процессы излучения и поглощения света. Другие верили в их реальность, но не считали их несовместимыми с ЭПП. Доказательство вторичного характера квантовых явлений, их выводимость из классических уравнений электронной теории стало бы серьезной поддержкой ЭПП, помогло бы приостановить вырождение этой программы. Но ЭПП в общепринятой классической форме, опиравшаяся на уравнения Максвелла—Лоренца, не приводила к квантам. Поэтому напрашивалась мысль о такой модификации «ядра» ЭПП, которая бы, не преобразуя его радикально, т. е. сохраняя, например, идею первичности электромагнитного поля и сведения к нему всех физических явлений, позволила бы получить квантовые особенности в поведении излучения и вещества. Именно такую задачу, в частности, ставили перед собой и Эйнштейн в 1908—1910 гг., когда он пытался построить некоторую единую теорию полей, частиц и квантов, и Г. Ми в 1912—1913 гг., разработавший нелинейное обобщение максвелловских уравнений, которое как будто давало надежды на объяснение корпускулярного и квантового аспектов материи на электромагнитно-полевой основе.

Иначе ЭПП пыталась преодолеть трудность, связанную со СТО. В сущности, СТО развивала и углубляла классическую полевою концепцию. Уравнения Максвелла—Лоренца согласовывались с требованиями лоренц-ковариантности, и та реальность, которую они описывали, вполне укладывалась как будто в рамки ЭПП, с тем лишь ограничением, которое накладывала СТО на понятия эфира и гипотезы о форме и строении электронов. Более того, теперь ЭПП могла даже взять на вооружение СТО как важное эвристическое средство в поисках нужной модификации уравнений Максвелла—Лоренца, способной привести к квантам, а заодно математически строгим образом реализовать первоначальный замысел ЭПП — истолковать заряженные частицы, обладающие массой покоя, как

своеобразные полевые конфигурации. Тем самым СТО, первоначально возникшая как фундаментальная трудность на пути ЭПП, превращалась в важное подспорье этой программы. Именно такую роль играла теория относительности в упомянутых выше попытках Эйнштейна и Ми вдохнуть новую жизнь в ЭПП. К тому же эти теории Эйнштейна и Ми оказались первыми полевыми теориями, в которых корпускулярные и квантовые аспекты материи предполагалось получить как следствия обобщенных уравнений поля; кстати говоря, и гравитацию в рамках этих теорий авторы их надеялись получить как следствие электромагнетизма. Таким образом, они имеют много общего с единными геометризованными теориями поля 20—30-х годов. Причем они и исторически были одной из важнейших предпосылок геометризованных теорий поля. Ведь Д. Гильберт, автор первой единой теории поля, опиравшейся на ОТО, явно использовал и теорию Ми, а Эйнштейн через 10 лет после первых своих попыток реализовать «полевого идеал единства» физики вернулся к этому же глобальному замыслу, но уже не на электромагнитно-полевой, а на геометрической основе.

До указанных попыток Эйнштейна и Ми сведение материальных частиц, иначе говоря, частиц вещества, которые наделялись свойством механической массы, к эфиру или полю мыслилось в рамках ЭПП главным образом в двух аспектах. Во-первых, очень глубокой, математически и экспериментально развитой была концепция электромагнитного происхождения массы. И хотя из уравнений Максвелла не следовало существование частицелодобных решений, которые бы можно было истолковать как электроны, казалось, что принципиально вопрос о полевой природе этих частиц решен. Во-вторых, предпринималось немало попыток эфирно-механистического характера указать возможный механизм формирования устойчивых локализованных образований, обладающих свойствами заряженных частиц, на основе тех или иных представлений об эфире. В этом случае трудно было избежать «моделирующего механицизма», так как сторонники этого подхода не исходили из уравнений Максвелла, а скорее стремились к тому, чтобы и уравнения Максвелла (или следствия из них), и феномен заряженных частиц смоделировать, используя определенные представления о механической структуре эфира. Наиболее популярным этот подход был в Англии благодаря влиянию самого Максвелла, В. Томсона, детально разработавшего концепцию гиростатического, или вихревого, эфира, Дж. Дж. Томсона, основоположника теории электромагнитной массы и также прочно стоявшего на почве эфирных представлений, таких авторитетов, как Дж. Лармор, О. Лодж и др.⁵

⁵ Например, О. Лодж писал в 1902 г.: «Главным образом надо объяснить внутренний эфирный смысл как положительных, так и отрицательных зарядов, принимая ли во внимание внутренние силы натяжения в гиростатически-устойчивом эфире Кельвина, чем в настоящее время занимается Лармор, или же по какому-либо другому плану, до сих пор не высказывавшемуся. Это и будет переходом к математической исследовательской работе высшего порядка» [44, с. 121].

На рубеже первых двух десятилетий века, когда ЭПП столкнулась с описанными выше трудностями, вера в эфир в общем была сильно подорвана⁶. Отошли на второй план концепция электромагнитной массы и тем более эфирно-механистические модели заряженных частиц⁷. Менее механистической позиции придерживался Г. Ми (в период, предшествующий разработке им упоминавшейся ранее нелинейной электродинамики). Он не связывал эфир с определенными моделями и рассматривал электроны как «особенные места (особые точки, — В. В.) в эфире, где сходятся линии электрической напряженности эфира, короче говоря — узлы электрических полей в эфире» [48, с. 171]. Но вера его в фундаментальность понятия эфира и ЭПП по-прежнему направляла его исследования. «Все многообразие чувственного мира, на первый взгляд такого пестрого и неупорядоченного, — писал он в книге, вышедшей вторым изданием в 1911 г., — сводится, по-видимому, к процессам, происходящим в едиобразной мировой субстанции — эфире. А самые процессы, при всей их неимоверной сложности, подчиняются гармоничной системе немногих простых и математически ясных законов» [48, с. 174].

Специальная теория относительности, особенно благодаря Эйнштейну, фактически отвергла понятие эфира. Отказ от концепции эфира связывался также с эйнштейновской концепцией квантов света как реальных структурных элементов излучения. Д. А. Гольдгаммер в уже цитированном докладе 1910 г. говорил: «Возникает естественно вопрос, каким образом родилась идея о несуществовании эфира. Как это ни странно на первый взгляд, но эта идея имеет до некоторой степени как бы опытные основания» [47, с. 31]. И дальше рассказывается о проблеме черного тела и о квантах. Поэтому многие связывали крушение понятия эфира (или по крайней мере утрату им прочных позиций) с именами Эйнштейна и Планка. Любопытно — и это отражает крайнюю сложность реального процесса познания, никогда полностью не согласующегося даже с удачными модельными схемами и методологическими идеализациями, такими, например, как исследовательские программы, — что именно Эйнштейн вскоре после завершения основ СТО и выдвижения идеи о реальности квантов света начинает активно разрабатывать еди-

⁶ Об электромагнитном поле все больше предпочитали говорить как о реальности, не нуждающейся для своего обоснования в понятии эфира. Планк, например, писал в 1909 г.: «Вместо так называемого свободного эфира выступает абсолютная пустота, в которой электромагнитная энергия распространяется так же самостоятельно, как и весомые атомы. Я считаю только последовательным, что абсолютной пустоте не приписывается каких-либо физических свойств» [45, с. 144]. Развернутая критика понятия эфира содержится в статье Н. Кэмпбелла, опубликованной в 1910 г. [46].

⁷ Вместе с тем и в эти годы надежды на эфирно-механистический рванш еще не были оставлены. Большой популярностью, например, пользовалась атомистическая модель эфира, развитая Ф. Лепардом, которая, как думали некоторые физики, «намечает путь к возможному в будущем механическому объяснению и самого принципа относительности в той общей форме, какую ему дал Эйнштейн» [47, с. 29].

ную полевую теорию электромагнитного типа, основанную, правда, не на уравнениях Максвелла, а на их некотором обобщении. Подход, в сущности, был новым, не связанным ни с концепцией электромагнитной массы, ни с эфирно-механистическим моделированием в духе Кельвина, Лармора или Ленарда. Эйнштейн работал с уравнениями Максвелла и искал возможные способы их обобщения, исходя из требований лоренц-ковариантности, идей нелинейности, некоторых математических свойств дифференциальных уравнений с частными производными 2-го и 4-го порядка и т. д. Итак, Эйнштейн какое-то время действовал в рамках ЭПП, хотя и модифицированной определенным образом. Интересно, что Эйнштейн в этот период иногда, по-видимому, обращался к мысли об эфире. В черновике письма к Планку, относящемуся примерно к 1910 г., он писал: «Без эфира непрерывно распределяемая в пространстве энергия кажется мне чем-то невозможным. Можно легко показать, что с уравнениями Максвелла совместима локализация энергии, соответствующая старой теории дальнего действия; я собираюсь опубликовать это вскоре вместе с другими вещами» [49, с. 25].

ПОПЫТКИ ЭЙНШТЕЙНА

В 1907—1908 г. Эйнштейн, стремясь распространить специальную теорию относительности на гравитацию, установил принцип эквивалентности, новую форму относительности, которая требовала расширения лоренц-ковариантности и класса допустимых систем отсчета в присутствии даже однородных гравитационных полей. Опираясь на этот принцип, он рассчитал два физических эффекта, связанные с воздействием гравитационного поля на свет и ранее неизвестные: отклонение лучей света в поле (например, Солнце) и смещение спектральных линий в поле тяготения к красному концу спектра («красное смещение»). Экспериментальная обоснованность и теоретическая глубина принципа эквивалентности, а также его эвристическая сила свидетельствовали о правильности и плодотворности нового пути к решению проблемы построения релятивистской теории тяготения. Но на этом пути Эйнштейна подстерегали огромные трудности, связанные с выходом за рамки СТО и освоенной на ней релятивистской программы (фундаментальный принцип лоренц-ковариантности оказался несправедливым и с необходимостью распространения принципа эквивалентности на произвольные поля тяготения (в условиях отсутствия физических указаний на новый класс допустимых систем отсчета и утраты пространственно-временными координатами непосредственного метрического смысла). В результате, несмотря на многообещающее начало, дальнейшее продвижение по пути, открытому принципом эквивалентности, резко замедлилось.

Впрочем, Эйнштейн в эти годы (1906—1907) не прекращал работы в области квантовой теории. В 1906 г. он вывел формулу Планка, заменив интеграл в выражении для энтропии на сумму,

и сделал вывод о том, что «энергия элементарного резонатора может принимать только целочисленные значения, кратные величине $(R/N)\beta v$ » [50, с. 131] (здесь $(R/N)\beta = h$). Но классическая теория Максвелла не могла дать описания осцилляторов с дискретными уровнями, и Эйнштейн подчеркнул резкое расхождение плашковской формулы с классикой и, наоборот, ее согласие с гипотезой световых квантов.

В 1907 г. он применил формулу Планка к «колебаниям атомов» в твердом теле и дал, по крайней мере качественное, объяснение отклонения теплоемкостей твердых тел от значений, предсказываемых классической теорией, и их уменьшения с понижением температуры. Эвристическое значение квантовой концепции, таким образом, еще раз блестяще подтвердилось, но теоретический статус квантов оставался для Эйнштейна неясным. Поэтому, когда в 1908 г. Эйнштейн столкнулся при разработке теории гравитации с трудностями, казавшимися непреодолимыми, он обратился к проблеме квантов, которая также волновала его. Понятие классического поля, глубокий анализ которого привел Эйнштейна к СТО, было для него наиболее фундаментальным. СТО подрывала идею эфира, особенно в ее механистической форме, но не концепцию поля. Революционное признание Эйнштейном реальности квантов света и его пионерские работы по применению квантовой концепции для объяснения достаточно широкого класса физических явлений не означали его отказа от фундаментальности понятия классического поля. Наоборот, статьи Эйнштейна 1906—1909 гг., его переписка, прежде всего с Лоренцем этих лет, показывают, что полевая концепция для Эйнштейна по-прежнему была определяющей и что именно в эти годы, особенно после временного отхода от попыток решения проблемы релятивистской теории тяготения на основе принципа эквивалентности, он всерьез обратился к новой грандиозной задаче — объяснить существование квантов и электронов на основе обобщенных тем или иным образом максвелловских уравнений электромагнитного поля [51]. Эта задача была очень близка к программным установкам ЭПП, хотя, строго говоря, выходила за ее рамки, поскольку констатировала недостаточность классической теории Максвелла — Лоренца и была нацелена на существенное обобщение ее. Все-таки, если судить по тем конкретным попыткам, которые были предприняты Эйнштейном, фундаментальным унифицирующим понятием для него продолжало оставаться понятие классического поля, описываемого дифференциальными уравнениями с частными производными, которые должны были при больших амплитудах поля (и, возможно, при больших длинах волн) переходить в уравнения Максвелла. Как и сторонники ЭПП, он думал таким образом вывести из полевых уравнений и электроны, и уравнения их движения, сведя корпускулярный аспект материи к полемому. Одновременно должно было получиться и объяснение квантовой структуры излучения, над загадкой которой Эйнштейн упорно размышлял уже давно. Некоторую надежду на это давала близость порядков постоянной Планка h и постоянной e^2/c , имеющих размерность дей-

ствия: $h = 6 \cdot 10^{-27}$ эрг · с, $e^2/c = 7 \cdot 10^{-30}$ эрг · с. Именно это обстоятельство было отмечено Эйнштейном в статье «К современному состоянию проблемы излучения», законченной в январе 1909 г. Подчеркнув это, он считал возможным сделать вывод о том, что теория, способная объяснить существование электрона, одновременно дала бы ответ на вопрос о полевой природе квантов. «Теперь надо вспомнить, — писал Эйнштейн, — что для электродинамики Максвелла — Лоренца элементарный квант ϵ (т. е. заряд электрона. — В. В.) является чуждым. Для того чтобы сконструировать электрон, необходимо привлечь неэлектродинамические силы... Но, на мой взгляд, из соотношения $h = e^2/c$ вытекает, что та модификация теории, которая дает как следствие элементарный квант ϵ , будет также содержать в себе квантовую структуру излучения» [52, с. 178].

Каким образом он собирался искать эту модификацию классической теории? Во-первых, поиски велись на уровне уравнений поля, в частности их математической структуры, и это было совершенно новым подходом, особенно на фоне многочисленных эфирно-механистических моделей типа Кельвина, Лармора, Ленарда и др. Во-вторых, речь шла об обобщении уравнений Максвелла фактически с учетом принципа соответствия, т. е. таким образом, чтобы в некоторой предельной ситуации оно сводилось к уравнениям Максвелла. В-третьих, искомое обобщение должно было быть лоренц-ковариантным; именно в этом пункте использовалась основная установка релятивистской программы. В-четвертых, модификация линейных однородных уравнений 2-го порядка, каковыми являются уравнения Максвелла для пустого пространства, могла заключаться в переходе к нелинейным уравнениям, или к неоднородным уравнениям, или к уравнениям более высокого порядка, или к комбинации этих обобщений. Кроме того, можно было использовать при анализе различных вариантов и отборе подходящих возможностей соображения размерности, фундаментальные принципы физики методологического значения (такие, например, как принцип сохранения энергии-импульса) и соображения физического характера, связанные с соответствующими физическими свойствами решенных уравнений.

В конце 1908 — начале 1909 г. Эйнштейн, как это явствует из цитированной уже январской статьи, думал о нелинейном и неоднородном обобщении максвелловских уравнений: «Фундаментальное уравнение оптики

$$D(\varphi) \equiv \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

необходимо будет заменить таким уравнением, в которое входит в виде коэффициента также универсальная постоянная ϵ (вероятно, ее квадрат). Искомое уравнение (или система уравнений) должно быть однородным по размерности. При преобразовании Лоренца оно должно переходить в самое себя. Оно не может быть линейным и однородным. Оно должно — по крайней мере, если закон Джинса

действительно выполняется в пределе малых v/T — переходить в уравнение $D(\varphi) = 0$ [52, с. 178].

Требование нелинейности уравнений было связано с представлением о том, что линейные уравнения не в состоянии обеспечить устойчивость электрона. К тому же математические свойства нелинейных уравнений, как было известно уже тогда, намного богаче свойств линейных уравнений, и можно было надеяться, что именно нелинейные уравнения смогут привести к решениям, обладающим корпускулярными и квантовыми свойствами⁸. Требование же однородности уравнений было обусловлено тем, что линейные однородные уравнения всегда дают решения, сумма которых также является решением, а в этом случае было бы трудно описать взаимодействие между частицами. Настойчивые поиски в этом направлении не увенчались успехом, и Эйнштейн заключал свои соображения в январской статье 1909 г. следующим замечанием: «Мне еще не удалось найти удовлетворяющую этим условиям систему уравнений, о которой можно было бы сказать, что она пригодна для построения элементарных электрических и световых квантов. Однако многообразие возможностей, по-видимому, не настолько велико, чтобы отпугнуть от этой задачи» [52, с. 178—179]. Последняя фраза означает, что Эйнштейн еще не исчерпал возможности описанного подхода и в январе 1909 г. продолжал возлагать основные надежды на нелинейное и неоднородное обобщение максвелловских уравнений.

Весной 1909 г., по-видимому, начинается переписка Эйнштейна с Лоренцем по вопросам квантовой теории излучения и проблеме единой теории поля [51]. В цитированной выше январской статье Эйнштейн вывел формулу для флуктуаций светового давления на зеркальце площадью f , помещенное в полость, заполненную тепловым излучением. Средний квадрат импульса $\bar{\Delta}^2$, переданный за время t , оказался, согласно Эйнштейну, представимым в виде

$$\bar{\Delta}^2 = \frac{1}{c} \left(h\nu v + \frac{c^2 \rho^3}{8\pi v^3} \right) dv \cdot f \cdot t, \quad (2)$$

⁸ Здесь уместно вспомнить о квазикорпускулярных решениях некоторых нелинейных волновых уравнений типа уравнения Кортевега—де Фриза или нелинейного уравнения Шредингера, так называемых солитонных решениях. Соответствующие частицеподобные образования, названные солитонами (поскольку их можно было рассматривать как уединенные возмущения), оказались весьма устойчивыми: они сохраняли свою индивидуальность даже после столкновения друг с другом. Вероятно, впервые солитонное решение для волн на поверхности жидкости было описано Ж. Буссинеском в 1872 г. Уравнение Кортевега—де Фриза, которое наиболее непосредственно приводит к солитонам, впервые появилось в диссертации Г. де Фриза, защищенной им в 1894 г. под руководством Д. И. Кортевега. Эти работы были практически неизвестны в начале XX в. и даже в 30—40-х годах. Ни в одном из некрологов, появившихся после смерти Кортевега (судьба де Фриза, который был учителем в гимназии, вообще осталась неизвестна), не содержится упоминаний о работах Кортевега (в соавторстве с де Фризом), в которых были открыты солитоны и связанные с ними дифференциальные уравнения. Знание этих работ Эйнштейном могло бы направить его мысль по новому руслу [53, 54].

где ρ — плотность энергии излучения при частоте ν ; c , h — скорость света и постоянная Планка. Второй член этого выражения отвечал световому давлению случайно интерферирующих волн, а первый — воздействию на зеркальце квантов с импульсом $h\nu/c$. Эта формула была важным шагом на пути к корпускулярно-волновому дуализму. Именно об этом писал Эйнштейн в своем первом письме к Лоренцу, но он также сообщал о своей идее связать постоянную Планка с постоянной e^2/c и о своем замысле «единой теории поля, способной объяснить существование и электрона, и квантов света. Но к этому времени точка зрения Эйнштейна на способ решения проблемы единой теории поля, как это явствует из его письма к Лоренцу от 23 мая 1909 г., претерпела существенные изменения.

Он вернулся к использованию линейных однородных уравнений, но не 2-го, а 4-го порядка, и притом таких, которые записываются отдельно для каждой компоненты поля (точнее, четырехмерного потенциала). Эйнштейну казалось, что эти условия позволят обеспечить распространение сгустков полевой субстанции со скоростью света без дисперсии. В качестве модельного статического аналога таких уравнений он рассматривал уравнение 4-го порядка

$$\Delta\Phi - \lambda^2 \Delta\Delta\Phi = 0, \quad (3)$$

имеющее решение типа

$$\Phi = \varepsilon \frac{1 - e^{-r/\lambda}}{r}, \quad (4)$$

где ε — некоторая неопределенная постоянная, а λ — постоянная, имеющая размерность длины и рассматриваемая как некоторая волновая характеристика поля. Постоянная ε , связанная с характеристикой источников поля, не должна была входить в уравнения поля; ее следовало получать на основе решения этих уравнений.

Модельное решение с экспоненциальным членом при больших r совпадало с классическим решением, т. е. приводило к $1/r$, а при $r = 0$ не давало сингулярности, что позволяло надеяться на устранение трудностей, связанных с бесконечной энергией самодействия электрона и его устойчивостью (последняя обеспечивалась как будто без введения сил неэлектромагнитного происхождения, что согласовывалось с установками ЭПП). Чтобы сделать систему этих уравнений лоренц-ковариантной, следовало далее заменить Δ на $(\Delta - 1/c^2 \partial^2/\partial t^2)$. Эйнштейн использовал еще одно соображение в пользу своего нового подхода. Подстановкой плоско-волнового решения в уравнения поля можно было получить соотношение

$$(-k^2 + \omega^2/c^2)(-k^2 + \omega^2/c^2 - 1/\lambda^2) = 0, \quad (5)$$

где k и ω — волновой вектор и частота волны. Первый сомножитель напрашивалось связать с квантом света, второй — с электроном.

Вероятно, вскоре Эйнштейн понял, что линейные уравнения даже 4-го порядка не могут дать описания источника поля и его движения, поскольку система «источники плюс поле» обладает су-

щественно нелинейными свойствами. Поэтому также было неясно, как описанная система уравнений позволит получить характеристику источников ϵ .

В поисках подходящей системы уравнений Эйнштейн, как мы видим, вынужден был прибегать к методу математической гипотезы, или методу математического конструирования, но чувствуется, что для него по-прежнему наглядные физические образы имели основополагающее значение. В докладе «О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения», сделанном на 81-м собрании Общества немецких естествоиспытателей в Зальцбурге в октябре 1909 г., Эйнштейн снова затронул вопрос о своих попытках дать полевою концепцию электрона и квантов света. При этом он как раз ограничился наглядной картиной, которую безуспешно пытался ввести в рамки строгой математической схемы. «Насколько мне известно,— говорил он,— еще не удалось построить математическую теорию излучения, описывающую как волновую структуру, так и структуру, следующую из первого члена нашей формулы (квантовую структуру) (т. е. имеется в виду формула для флюктуаций светового давления.— В. В.)... Все же мне кажется пока наиболее естественным, что появление электромагнитных полей света должно быть связано с особыми точками так же, как появление электростатических полей — с электронной теорией. Не исключено, что в такой теории всю энергию электромагнитного поля можно будет считать локализованной в этих особых точках, совсем как в старой теории дальнего действия. Я представляю себе каждую такую особую точку окруженной силовым полем, которое в основном имеет характер плоской волны с амплитудой, уменьшающейся с удалением от особой точки. Если большое число таких особых точек находится на расстояниях, малых по сравнению с размерами силового поля одной особой точки, то силовые поля будут перекрываться и в целом дадут волновое силовое поле, быть может очень мало отличающееся от волнового поля в смысле современной электромагнитной теории света. Вряд ли стоит подчеркивать, что до тех пор, пока такая картина не приведет к точной теории, ей не следует придавать особого значения. Я хотел только показать с ее помощью, что нельзя считать несовместимыми обе структуры (волновая и квантовая), которыми одновременно должно обладать излучение в соответствии с формулой Планка» [55, с. 194].

Письмо к М. Бессо от 31 декабря 1909 г. говорит о том, что Эйнштейн в конце 1909 — начале 1910 г. продолжал свои размышления над полевою концепцией квантов и электронов. Любопытно, что он надеялся использовать калибровочную симметрию уравнений Максвелла. Но и это окно оказалось глухим!⁹

⁹ В указанном письме к Бессо изложение новой идеи он закончил словами: «Надеюсь, что это не глухое окно». Комментатор переписки П. Специали объясняет смысл этих слов ссылкой на афоризм Паскаля: «Кто строит антитезы, извращая смысл слов, подобен тем, кто для симметрии рисует ложные окна: их принцип не в том, чтобы правильно сказать, а в том, чтобы создать правильные фигуры» [56, с. 16].

Но уже к концу лета 1910 г., а возможно и несколько раньше, он все больше начинает размышлять о проблеме гравитации. Во всяком случае, в письме к Я. Лаубу от 10 августа 1910 г. он уже ничего не пишет о том, что его волновало на протяжении нескольких последних лет. Эйнштейн возвращается к гравитации и принципу эквивалентности, о чем он и сообщает Лаубу [57, с. 101]. Но над частными проблемами квантовой теории он еще продолжал работу. В мае 1911 г. он писал Бессо: «Сейчас я как раз пытаюсь вывести из квантовой гипотезы закон теплопроводности для твердых изоляторов. Вопрос о действительном существовании квантов я уже больше не задаю. Я также не пытаюсь больше их конструировать, поскольку знаю теперь, что мне с этим не справиться» [56, с. 17]. 21 июня 1911 г. он посылает в «Annalen der Physik» статью «О влиянии силы тяжести на распространение света», которая открыла новый цикл исследований Эйнштейна по гравитации, завершившийся в ноябре 1915 г. созданием основ общей теории относительности [38].

Как справедливо заметил Р. Мак-Кормак, фундаментальную работу которого «Эйнштейн, Лоренц и электропная теория» мы широко использовали в этом разделе, опыт, использованный Эйнштейном при конструировании единой теории поля 1908—1910 гг., оказался весьма ценным подспорьем при разработке релятивистской теории гравитации, в частности при решении проблемы уравнений гравитационного поля: фундаментальная для ОТО идея нелинейности полевых уравнений, а также идея вывода уравнений движения из уравнений поля, применение весьма общих принципов физики, нередко методологического значения (например, таких, как принципы симметрии, соответствия, сохранения, простоты и т. д.), для построения уравнений поля, умение сочетать наглядные физические представления с высоким уровнем абстрактного математического анализа и т. д. [51].

Не исключена возможность (прямые свидетельства, впрочем, отсутствуют), что обращение к глобальной проблеме построения единой теории поля в 1908—1910 гг. было связано с попытками решения проблемы гравитации в том плане, что уравнения этой единой теории поля могли бы дать дополнительную информацию и в отношении гравитации: в идеале эти уравнения могли бы содержать и гравитацию. Могло также оказаться, что уравнения единой теории вышли бы за пределы лоренц-ковариантности, в этом случае найденную более широкую группу инвариантности можно было бы использовать при поисках уравнений гравитационного поля. Однако Эйнштейну не удалось построить единую теорию электромагнитного поля, электрона и квантов на полевой основе, и он вернулся к исследованию более частных проблем как в области квантовой теории, так и области гравитации.

Вместе с тем возврат к более конкретной проблематике, прежде всего к проблеме построения релятивистской теории тяготения, вовсе не означал, что Эйнштейн полностью разочаровался в программе полевого синтеза физики, в общем выходящей за рамки

ЭПП. Возможно, Эйнштейн рассуждал так. Принцип эквивалентности указывал на необходимость расширения РП, основанной на СТО. Попытки же построения единой полевой теории 1908—1910 гг. основывались на требованиях лишь лоренц-ковариантности. Эйнштейн, таким образом, мог думать, что именно поэтому его глобальный замысел потерпел неудачу. Следовало вернуться к теории тяготения и к программе ее построения, основанной на принципе эквивалентности. Реализация этой программы должна была привести к теории, обладающей более широкой группой симметрии, чем группа Лоренца или Пуанкаре. Возможно, что именно на основе этой расширенной группы попытки построения единой полевой теории оказались бы более успешными. К тому же в этом случае эта теория стала бы еще более «единой», так как в нее удалось бы включить и теорию тяготения.

Теоретико-полевой идеал единства физики, тесно связанный с ЭПП, но в общем выходящий за ее рамки, был, таким образом, очень близок Эйнштейну. Триумф классической полевой концепции, правда в новом, геометрическом облике, возродил надежды Эйнштейна на реализацию старого замысла, к которому он приступил в начале 20-х годов.

ТЕОРИЯ МИ

В отличие от Эйнштейна Г. Ми оставался последовательным приверженцем ЭПП и после создания СТО. В 1910 г. был издан его «Курс электричества и магнетизма» [58], содержащий упоминания о СТО, но тем не менее весьма энергично настаивающий на необходимости для физики понятия эфира и на электромагнитно-полевой концепции физического мира. При этом он был противником явного механического истолкования эфира. Материальные частицы, прежде всего электроны, рассматривались им как некоторые эфирные конфигурации, определенные «узловые точки» в эфире, природа которых должна выясниться при последующем развитии теории. Ми не считал, что СТО дает основание отказаться от концепции эфира, которую он высоко ценил и с которой он связывал подлинное понимание физической реальности.

«Согласно электронной теории, — писал Ми в упомянутом учебнике, — инерция материальной частицы представляет собой не что иное, как инерцию магнитного поля и, может быть, еще других, пока неизвестных явлений в эфире, составляющих существенную часть всего процесса движения, но не ограниченных малым объемом узловых мест в эфире. Согласно этому воззрению механика, всегда рассматривавшая понятие инерции как элементарное, простейшее понятие, должна потерять свое положение основной науки. Не эфир следует объяснять механически, но материю — электромагнетизмом» [58, с. 415]. В другом месте он подчеркивал: «Поскольку инерция является, по крайней мере отчасти, особым проявлением электромагнитных сил, постольку мы можем рассматри-

вать механическую теорему относительности лишь как частный случай общего электромагнитного принципа» [58, с. 428].

В 1911 г. Ми переиздал свои публичные лекции, читанные им еще в 1903 г. в Грейфсвальде, «Молекулы, атомы и мировой эфир» [48]. Имея в виду критику понятия эфира, связанную со СТО, он писал: «Название это (т. е. эфир.— В. В.) подверглось в последнее время некоторому гонению, потому что вошло в обычай распространительно прилагать к мировому эфиру механические представления...» [48, с. 99]. В разделе «Современный взгляд на природу вещества» Ми следующим образом описывает эфирно-полевую картину частиц и их движения «...элементарные материальные частицы...— не что иное, как особенные места в эфире, где сходятся линии электрических напряжений эфира, короче говоря — узлы электрических полей в эфире. Весьма замечательно, что названные узлы всегда скучены в тесно ограниченных пределах, а именно в местах, заполненных элементарными частицами... Образование узлов сопряжено, вероятно, с особыми силовыми проявлениями эфира, противодействующими стремлению к разъединению и собирающими узловые места в тесные границы. Эти, пока совершенно еще не обследованные, силовые действия эфира я буду называть „уплотняющими давлениями“, причем предполагаю, что с ними тесно связано всеобщее притяжение масс или всемирное тяготение... Причиной перемещения частицы может быть только нарушение состояния равновесия в сопредельных с ней областях эфира...» [48, с. 171].

Как справедливо отмечал Р. Мак-Кормак, «Ми стал главной фигурой поздней стадии электромагнитной программы» [34, с. 489]. При этом СТО, в частности требование лоренц-ковариантности и четырехмерная теоретико-инвариантная формулировка этой теории, рассматривались им как эффективные теоретические средства ЭПП. Он, таким образом, в отличие от многих других приверженцев ЭПП не выступал против СТО и РП, а стремился ввести их в русло электромагнитно-полевой программы. В «Курсе электричества и магнетизма» он целую главу посвятил теории относительности, в которой, в частности, писал: «Принцип относительности замечателен тем, что он утверждает существование внутренней связи между всеми свойствами материи и всеми физическими явлениями» [58, с. 447]. В другом месте он высоко оценивал концепцию Минковского: «Эйнштейн выставил в 1905 г. относительность в качестве общего принципа, имеющего силу для всей физики. Математик Минковский развил этот принцип в весьма изящной и удобообозримой математической форме, чрезвычайно удобной для дальнейших теоретических изысканий» [58, с. 439].

31 октября 1912 г. Г. Ми закончил первую часть своей знаменитой работы «Основы теории материи» [59], в которой ему в какой-то мере удалось сделать то, к чему стремился Эйнштейн в 1908—1910 гг. Именно в какой-то мере, потому что теория Ми при всей грандиозности замысла и утопичности использованных теоретических средств оказалась ошибочной, хотя она и приводила к полному моделированию частиц. Описанное выше представление о

частицах как о своеобразных конфигурациях поля, «узловых местах» эфира получило в этой работе точное математическое выражение, опиравшееся как на программные установки ЭПП, так и на методы СТО и, таким образом, на элементы РП. «Электроны и вообще мельчайшие частицы материи,— писал Ми в начале статьи,— согласно этому пониманию (т. е. согласно принципам ЭПП.— В. В.) не являются сущностями, резко отделенными от мирового эфира. Они не являются, как думали еще двадцать лет тому назад, телами, чуждыми эфиру, напротив, частицы — это только места, в которых эфир находится в совершенно особом состоянии, которое мы называем электрическим зарядом» [59, с. 511]. Чуть дальше он более детально рисовал картину включенности частиц в эфир: «В моей теории электрон... не является строго ограниченной частью пространства в эфире, напротив, он состоит из ядра, непрерывно переходящего в атмосферу электрического заряда, которая распространяется на бесконечность, но даже вблизи ядра является настолько разреженной, что ее нельзя обнаружить экспериментально каким-либо способом» [59, с. 512].

В сущности, Ми, как и Эйнштейн в 1908—1910 гг., выходит при создании своей единой теории за рамки ЭПП в ее первоначальной форме. И дело не только в использовании элементов РП, но также и в том, что Ми стремился обобщить полевые уравнения Максвелла, которые, как он думал, становятся несправедливыми при очень больших напряжениях электрического и магнитного полей. Все же свои уравнения он считал уравнениями электромагнитного поля, все основные понятия оставались максвелл-лоренцевскими, даже наглядные представления о частицах как о полевых образованиях были вполне типичными для приверженцев ЭПП. Фактически его теория может рассматриваться как нелинейная электродинамика. Столь же типичными были глобальные устремления Ми включить в свою теорию и гравитацию и кванты, чему была посвящена третья часть статьи, опубликованная в 1913 г. [60]¹⁰.

Работа Ми имела немалый резонанс и непосредственно повлияла, как мы увидим, на исследования в области единых геометризованных теорий поля. Поэтому она вошла во многие классические монографии по теории относительности. Достаточно сказать, что теорию Ми обстоятельно рассмотрели Г. Вейль в своей знаменитой книге «Пространство, время, материя» (1918) [62] и В. Паули в не менее известной работе по теории относительности — в статье, написанной для «Энциклопедии математических наук» (1921) [63]. Поэтому мы не будем рассматривать здесь теорию Ми во всех ее деталях, а набросаем лишь основную схему, прибегая к помощи указанных работ Вейля и Паули.

Сразу же перечислим некоторые основные черты теории Ми, которые позволили ей достичь в общем немалого успеха: ведь впервые в истории физики в этой теории удалось дать математически

¹⁰ Вторая часть статьи Г. Ми — см. [61].

строгую полевую модель частиц, которая опиралась на нелинейное обобщение уравнений Максвелла, выводимое из лоренц-ковариантного вариационного принципа. Фактически мы уже назвали эти черты: установки ЭПП, понимаемой в расширенном смысле (основой всего сущего считается электромагнитное поле, сохраняют свое значение и основные электромагнитные понятия и величины — напряженности, потенциалы и т. д., но допускается определенная модификация максвелловских уравнений); выводимость «мировых уравнений» из вариационного принципа, именно из принципа Гамильтона; явное использование требований лоренц-ковариантности при конструировании «мировой функции», или лагранжиана теории, т. е. установок релятивистской программы; фактическое признание необходимости такой модификации максвелловского лагранжиана, которая бы на достаточно больших расстояниях от электрона приводила к линейным волновым уравнениям (именно уравнениям Максвелла), а в окрестности электрона давала нелинейные уравнения.

Основной физической предпосылкой теории, как заметил Паули, является требование, «чтобы внутри элементарных заряженных частиц кулоновские силы отталкивания уравновешивались другими силами также электромагнитного происхождения, а вне частиц отклонения от обыкновенной электродинамики были незаметны» [63, с. 261]. Кроме того, Ми предположил, что и в вакууме существует фундаментальное различие между силовыми (или интенсивностными) и количественными (или экстенсивностными) величинами, т. е. между потенциалом φ_i и тензором $F_{ik} = \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k}$, с одной стороны, и током s_k и тензором H^{ik} — с другой¹¹. Максвелловские соотношения приобретают фактически новое физическое содержание, если предположить далее, как это сделал Ми, что количественные величины H^{ik} и s^k являются универсальными функциями силовых величин F_{ik} и φ_i :

$$H^{ik} = u_{ik}(F, \varphi), \quad s^k = v_k(F, \varphi). \quad (6)$$

Эти уравнения вводят как будто в теорию не менее десяти универсальных функций, но Ми удалось показать, что максвелловское соотношение между напряженностями и потенциалами и закон сохранения энергии для поля получаются только в том случае, если существует лоренц-ковариантная функция $\mathcal{L}(F, \varphi)$, из которой H^{ik} и s^k получаются дифференцированием по величинам F_{ik} и φ_i , т. е.

$$H^{ik} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial F_{ik}}, \quad s^i = -\frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \varphi_i}. \quad (7)$$

Это означает, что

$$\delta \mathcal{L} = H^{ik} \delta F_{ik} - 2s^i \delta \varphi_i. \quad (8)$$

Отсюда нетрудно показать, что полевые уравнения в конечном

¹¹ F_{ik} связывает векторы E и B , а H^{ik} — D и H .

счете следуют из вариационного принципа:

$$\delta \int \mathcal{L} d\omega = 0. \quad (9)$$

Задача, таким образом, сводится к отысканию подходящего лоренц-ковариантного лагранжиана \mathcal{L} . Силовые, или интенсивностные, величины F_{ik} и φ_i были приняты Ми в качестве основных величин, характеризующих состояние поля. Важным отличием новой теории от классической максвелловской схемы в ее общепринятой формулировке было включение в число величин, определяющих состояние поля, потенциалов наряду с напряженностями. Это означало, что лагранжиан \mathcal{L} , помимо классического электродинамического инварианта $1/2 F_{ik} F^{ik}$, приводящего к уравнениям Максвелла, мог содержать еще три типа квадратичных инвариантов, составленных из F_{ik} и φ_i по всем правилам четырехмерной теоретико-инвариантной техники Минковского¹²:

$$\varphi_i \varphi^i, F_{ik} \varphi_s F^{is} \varphi^r, (F_{ik} \varphi_i + F_{ik} \varphi_k + F_{ik} \varphi_k)^2. \quad (10)$$

Как уже было отмечено, \mathcal{L} может заметно отличаться от $1/2 F_{ik} F^{ik}$ только в окрестности заряженных (элементарных) частиц. В остальном выбор немаксвелловской добавки \mathcal{L}_1 к лагранжиану $1/2 F_{ik} F^{ik}$ оставался достаточно произвольным. Дальнейшая конкретизация функции \mathcal{L}_1 могла определяться на основе следующих соображений. Во-первых, она должна быть таковой, чтобы с полевыми уравнениями согласовывались частицеподобные решения, которым бы можно было приписать конечные массы и заряд, совпадающие в идеале с соответствующими величинами для электропа. Во-вторых, эти решения должны быть всюду (в частности, при $r=0$ и $r=\infty$) регулярными, а также (в простейшем случае) статическими и сферически симметричными. Наконец, решений различного типа должно быть столько, сколько типов заряженных частиц существует. Поиски такого лагранжиана так и не увенчались успехом, хотя Ми было ясно, что немаксвелловская добавка даже в простейшем случае должна целиком зависеть от квадрата потенциала. Он рассмотрел, в частности, функцию \mathcal{L}_1 , кубично зависящую от $\varphi_i \varphi^i$ (или содержащую шестую степень φ). Припятый закон был достаточно сингулярным, поскольку нелинейная добавка уменьшалась с расстоянием как r^{-6} . Если нелинейную добавку записать в форме

$$\mathcal{L}_1 = w(\sqrt{\varphi_i \varphi^i}), \quad (11)$$

то в статическом случае, поскольку $\Delta\varphi = w'(\varphi)$, дело сводится к

¹² В примечании 20 к английскому изданию своей энциклопедической статьи по теории относительности В. Паули указал, что в приведенном списке пропущен инвариант

$$\left[\frac{1}{\sqrt{-g}} (F_{23} F_{14} + F_{31} F_{24} + F_{12} F_{34}) \right]^2,$$

который впоследствии фигурировал в теории Борна — Инфельда и в квантовой электродинамике [63, с. 303].

обобщенному уравнению Пуассона

$$w'(\varphi) = -4\pi r, \quad (12)$$

которое приводит к решению (и даже к бесконечному множеству решений), регулярному при $r=0$ и $r=\infty$. Из этого бесконечного множества решений можно было бы выделить (неясно, правда, каким образом) некоторое конечное число решений, соответствующих заряженным элементарным частицам. Развитая теория позволяла вычислить заряд и массу частицы для решения φ уравнения (12). Заряд в сферических координатах вычислялся следующим образом:

$$\begin{aligned} q &= \int \int \int \rho r^2 \sin \theta dr d\theta d\psi = \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty r^2 w'(\varphi) \sin \theta dr d\theta d\psi = \\ &= - \int_0^\infty r^2 w'(\varphi) dr = \left[r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right]_0^\infty. \end{aligned} \quad (13)$$

Масса же — с помощью аналогичного интеграла от плотности энергии по всему пространству:

$$m = \frac{1}{c^2} \int \int \int W r^2 \sin \theta dr d\theta d\psi = \frac{4\pi}{c^2} \int W r^2 dr,$$

где плотность энергии принималась равной

$$W = \frac{1}{2}(\text{grad } \varphi)^2 + w(\varphi) + \varphi w'(\varphi),$$

что приводило (после интегрирования по частям) к следующему выражению:

$$m = \frac{4\pi}{c^2} \int_0^\infty r^2 \left[w(\varphi) + \frac{1}{2} \varphi w'(\varphi) \right] dr. \quad (14)$$

Все это давало надежду на реализацию полевой концепции частиц, но вид функции w оставался неизвестным, и теория Ми на этом этапе осталась лишь достаточно далеко развитой и математически сформулированной программой, так и не приобретающей статус полноценной физической теории.

В эти годы еще немало было приверженцев ЭПП, но и сторонникам СТО и РП импонировала теория Ми, по крайней мере ее замысел. Г. Вейль и В. Паули на рубеже второго и третьего десятилетий высоко оценивали этот грандиозный замысел. «Мы можем, таким образом, на основе законов природы рассчитать массу и заряд электрона, атомные веса и атомные заряды существующих элементов,— писал Вейль о теории Ми,— в то время как до сих пор эти последние кирпичики материи и их количественные характеристики считались заданными... Гипотеза (74) (т. е. выражение для «мировой функции» теории Ми.— В. В.), положенная в основу на-

шего рассмотрения, служит лишь для того, чтобы ясно показать, какое глубокое и фундаментальное, основанное на законах природы понимание материи и ее строения открыло бы нам обнаружение функции действия» [64, с. 218].

Несмотря на существенные недостатки теории, которые были отмечены Паули в 1920 г. и к которым мы еще вернемся, двадцатилетний ученик Зоммерфельда писал: «Отсюда (т. е. из того, что и к 1920 г. не удалось найти подходящую «мировую функцию» — *В. В.*) еще, однако, не следует, что электродинамика Ми должна быть отброшена, так как еще не доказано, что нельзя найти мировой функции, приводящей к существованию определенных элементарных частиц» [63, с. 266—267].

Большие надежды теория Ми вселила в Гильберта, когда в середине второго десятилетия он всерьез заинтересовался основаниями физики, но об этом речь дальше. Рассмотрим теперь вопрос о возможностях включения в теорию Ми гравитации и квантов. Вначале, по-видимому, Ми предполагал включить теорию тяготения в рамки своей теории и тем самым свести ее к электромагнетизму. На мысль об электромагнитной природе тяготения наводила и электромагнитная концепция массы. Однако усилия Ми в этом направлении привели его фактически к выводу об иной, неэлектромагнитной природе гравитационного поля, несмотря на определенное родство законов тяготения Ньютона и электростатического взаимодействия — закона Кулона. Законы гравитации не вытекали из «основных уравнений эфирной динамики» (так называл основные уравнения своей единой теории поля Г. Ми). Для описания гравитации ему пришлось ввести специальные величины, характеризующие состояние гравитационного поля, а именно скалярный гравитационный потенциал и соответствующий четырехвектор напряженности поля, а также четырехвектор гравитационного смещения (по аналогии с соответствующими электрическими величинами). Уравнения гравитационного поля были найдены из условия лоренц-ковариантности, они, в сущности, мало чем отличались от первой теории Нордстрема (скалярной и лоренц-ковариантной). Говоря о своих попытках введения гравитации в электромагнитное русло, Ми ссылается на их родство с известными электромагнитными теориями тяготения Г. Лоренца, Р. Ганса и О. Хевисайда. Интересно, что все эти теории, включая и его собственные варианты, Ми отвергает, поскольку они не согласуются с двумя наиболее фундаментальными принципами физики — принципами относительности и сохранения энергии-импульса. «Я затратил много усилий на пути к корректной системе уравнений (именно уравнений тяготения электромагнитного типа.— *В. В.*) и теперь убежден, что на этой (электромагнитной.— *В. В.*) основе совершенно невозможно разработать теорию тяготения, которая бы удовлетворяла как принципу относительности, так и принципу сохранения энергии», — писал Ми [60, с. 26].

Таким образом, пришлось отказаться от объединения гравитации с электромагнетизмом и отложить эту проблему до лучших времен.

Еще хуже обстояло дело с квантами. Так как квант действия (или постоянная Планка) имел строго фиксированное значение, подобно заряду электрона, и был связан со структурой электромагнитного излучения (в то время как заряд электрона связывался со структурой электростатического поля и рассматривался как некоторое сгущение эфира), Ми также думал истолковать квант действия как определенную эфирную конфигурацию. Возможно, близость постоянной Планка h к отношению e^2/c (по порядку величин), которая была важна для Эйнштейна, стимулировала и мысль Ми об эфирном родстве кванта действия и электрического заряда. «...Квант действия h или, точнее сказать, квадратный корень из него есть величина, которая вполне аналогична элементарному кванту электрического заряда. Так как последний связан с числом силовых линий, которые сходятся на электроны, как в узле, то h представляется числом силовых линий, сходящихся в форме некоторого клубка в излучающем диполе» [60, с. 24]. Конечно, Ми не удалось объяснить квантовый характер излучения на основе своих уравнений «эфирной динамики», хотя оставалась некоторая надежда, что, как только будет найдена такая «мировая функция», которая позволит точно рассчитать заряд и массу электрона, она даст возможность и определить значение постоянной Планка, и объяснить квантовые особенности излучения. В результате гравитация и кванты остались за пределами теории Ми.

Конечно, и сам Ми, и другие физики видели в этой теории скорее перспективную программу и надеялись на то, что поиски адекватной функции действия со временем увенчаются успехом. Имелась в виду прежде всего такая функция действия, которая бы для каждого сорта заряженных частиц приводила к одному, вполне определенному решению, позволяющему вычислить заряды и массы этих частиц, соответствующие экспериментальным значениям. Поэтому то обстоятельство, что такая функция еще не была найдена, не могло в середине второго десятилетия рассматриваться как достаточно серьезный изъян теории Ми. Наиболее серьезным недостатком теории, который видел и сам Ми и особенно ясно был подчеркнут Паули, была ее калибровочная (или градиентная) инвариантность, поскольку и лагранжиан теории, и уравнения поля содержали абсолютные значения потенциалов, которые, согласно Ми, интерпретировались как давления в эфире. Поэтому в случае если ϕ было решением основных уравнений, то потенциал $\phi + \text{const}$ уже не мог быть решением. Это можно было истолковать как неспособность заряженных частиц существовать даже в постоянном внешнем потенциальном поле [63, с. 267]. Причем эта трудность была органически присуща теории Ми, т. е. не тому или иному конкретному варианту, а всей его программе. И сам Ми, и все те, кто впоследствии писал об этой теории, считали, что для отыскания нужной «мировой функции» необходимы или дополнительные экспериментальные исследования в очень малых объемах пространства (вблизи электронов или протонов), или выявление в уже имеющемся материале новых физических идей или принципов.

«Ближайшей проблемой, на которую непосредственно указывает теория,— так закапчивалась цитируемая статья Ми,— является исследование того, можно ли в очень сильных электрических или магнитных полях или даже в областях, где напряженности полей равны нулю, но имеются очень большие значения потенциалов, найти какие-либо отклонения от максвелловских законов, справедливых в идеальном вакууме...» [60, с. 64]. Имея в виду основное предположение Ми о структуре «мировой функции», связанное с немаксвелловской добавкой \mathcal{L}_1 , Вейль писал в 1918 г.: «Обсуждение такого рода произвольных гипотез не может, правда, привести к прогрессу. Необходимы новые физические воззрения и принципы, чтобы найти правильный путь для определения гамильтоновой функции» [64, с. 218].

Все же нельзя не признать, что Ми удалось дальше, чем кому-либо в эти годы, продвинуть теоретико-полевой идеал единства физики. Несмотря на использование «эфирной» терминологии, Ми, в сущности, опирался на изящные вариационные и теоретико-инвариантные методы, вполне соответствовавшие духу релятивистской физики и математического конструирования ее основных уравнений. Даже после создания квантовой механики физики еще не раз возвращались к идеям Ми в своих попытках решения проблемы полевого синтеза физики. В частности, в 30—40-х годах аналогичное направление разрабатывалось М. Борном (в сотрудничестве с Л. Инфельдом), а также Ф. Боппом и Б. Подольским [65, 66]. Борн и Инфельд отказались от использования лагранжиана и уравнений, явно зависящих от потенциалов. Нелинейность электромагнитного поля, введенная ими, не нарушала калибровочной инвариантности теории. Теория Борна—Инфельда позволила вычислить электромагнитную массу и классический радиус электрона (порядка 10^{-13} см), а также получить значение напряженности «на краю электрона».

Зоммерфельд писал о теории Ми в 1948 г.: «...было бы просто удивительным, если бы основную проблему теории элементарных частиц можно было разрешить путем остроумных выдумок! Сейчас мы знаем, что для этого скорее нужно подготовить еще много экспериментального материала. Несмотря на это, проложить первый путь к этой задаче было, конечно, очень большой заслугой; это видно хотя бы из того, что все последующие исследователи данной проблемы следуют по следам Ми» [67, с. 415]. Какова была реакция Эйнштейна на теорию Ми? К сожалению, нам известны лишь сравнительно поздние отклики Эйнштейна на исследования грейфсвальдского физика, которые как будто должны были бы очень заинтересовать основоположника теории относительности. Вероятно, эту запоздалую реакцию можно объяснить тем, что Эйнштейн как раз в эти годы (т. е. 1913—1915) напряженно работал над общей теорией относительности, и именно здесь, по его мнению, проходила «главная линия фронта». Осенью 1913 г. Эйнштейн встретился с Ми на 85-м собрании немецких естествоиспытателей в Вене. Ми выступал в дискуссии по докладу Эйнштейна «К современному

состоянию проблемы гравитации», в котором содержался набросок теории Эйнштейна—Гроссмана, легшей в основу общей теории относительности. В этой дискуссии затрагивались лишь вопросы, связанные с проблемой тяготения, в частности Ми говорил о своей скалярной лоренц-ковариантной теории и выступал с критикой как общего принципа относительности, так и принципа эквивалентности [38]. В течение нескольких последующих лет Ми в основном занимался проблемой гравитации, но существу не возвращаясь к своей единой теории.

Только в письмах Эйнштейна, относящихся к 1916 г., главным образом в связи с единой теорией поля Гильберта, который существенно опирался на теорию Ми, мы находим замечания Эйнштейна о теории Ми. Так, в письме к Зоммерфельду от 9 декабря 1915 г. он писал: «Насколько я знаю о теории Гильберта, она пользуется таким подходом к электродинамическим явлениям, исключая рассмотрение гравитационного поля, где он тесно примыкает к теории Ми. Подобный специальный подход с точки зрения общей теории относительности нельзя обосновать» [68, с. 194]¹³. Любопытная оценка теории Ми содержится в письме к Вейлю от 6 июня 1922 г., когда Эйнштейн уже сам активно работал над проблемой единой теории поля. Обсуждая усилия Эддингтона на пути к построению некоторой единой теории поля, он замечает: «С высказываниями Эддингтона дела у меня обстоят так же, как с теорией Ми: это превосходная рама, но совершенно неизвестно, как ее заполнить» [57, с. 147]. Иначе говоря, Эйнштейна, по крайней мере в начале 20-х годов, программные установки теории Ми (теоретико-полевой идеал единства, опора на требования лоренц-ковариантности, нелинейная модификация максвелловских уравнений и т. д.), по-видимому, привлекали. Вероятно, они импонировали ему и в середине второго десятилетия. Но, во-первых, он не видел ясного способа построения подходящей функции действия, а конкретные варианты казались ему физически не обоснованными; во-вторых же, он был очень занят разработкой ОТО. Наконец, вначале он считал, что ОТО является исключительно релятивистской теорией тяготения и не связана непосредственно с проблемой строения материи. Не исключено, что в 1913—1915 гг. Эйнштейн, поглощенный проблемой тяготения, вообще скептически относился к глобальной проблеме полевого синтеза материи, чему в немалой степени мог способствовать его собственный неудачный опыт разработки этой проблемы в 1908—1910 гг.

Теория, точнее, программа Ми, безусловно, сыграла огромную роль в генезисе программы ЕГТП. Во-первых, она показала возможности сведения заряженных элементарных частиц к полю, по крайней мере в принципе, и тем самым укрепила «теоретико-полевой идеал единства физики». Во-вторых, она подтвердила эвристическую мощь требований РП, основанной на СТО. После утверж-

¹³ Аналогичные высказывания Эйнштейна о теории Ми содержатся в его письмах к Эренфесту от 24 мая 1916 г. и к Вейлю от 23 ноября 1916 г.

дения и признания ОТО естественно возникла мысль о рассмотрении теории Ми с позиций ОТО. Требования ОТО могли пролить новый свет на структуру искомой «мировой функции». Вместе с тем привлечение ОТО приводило к необходимости учета искривления пространства-времени, хотя при этом возникал новый вопрос — о соотношении гравитации, понимаемой геометрически, с электромагнитным полем. Далее, теория Ми продемонстрировала зрелищные возможности вариационного подхода, основанного на принципе Гамильтона. Вообще она способствовала утверждению метода построения теорий, связанного с «игрой в уравнения», метода, который также был применен Эйнштейном в его исследованиях по единой теории поля в 1908—1910 гг. И вариационный подход, и «игра в уравнения» также вошли в арсенал основных методов программы ЕГТП. Весьма важной была также идея нелинейности основных уравнений поля. Именно нелинейный характер этих уравнений позволял надеяться на реализацию идеи полевого описания частиц и получения уравнений движения частиц из уравнений поля¹⁴.

ТЕОРИИ ИШИВАРЫ И НОРДСТРЕМА

Хотя единые геометризованные теории поля 20-х годов, начиная с теории Вейля, в качестве задачи-максимум ставили перед собой проблему полевого описания элементарных частиц материи, основной и непосредственной их задачей, задачей-минимум, было достижение единого описания электромагнитного и гравитационного полей. В описанных выше теориях Эйнштейн и Ми стремились прежде всего к решению задачи-максимум. В этом разделе мы рассмотрим некоторые менее известные теории 1912—1914 гг., в первую очередь теории Ишивары и Нордстрема, именно своеобразные единые теории электромагнитного и гравитационного полей, в которых ставилась в первую очередь задача-минимум. В 1912—1915 гг. Эйнштейн (отчасти вместе с М. Гроссманом) разработывал тензорно-геометрическую концепцию гравитации. Теории Ишивары и Нордстрема были тесно связаны со скалярными теориями гравитации: первая — с теорией Абрагама, вторая — с теорией Нордстрема [38]. Если теория Ишивары явным образом опиралась на ЭПП, то

¹⁴ Ранее мы не останавливались специально на этом аспекте теории Ми, хотя из закона сохранения энергии для тензора энергии-импульса поля, записанного в интегральной форме

$$\frac{d}{dx^4} \int T_i^k dx^1 dx^2 dx^3 = - \int (T_i^k n_k) d\sigma \quad (k = 1, 2, 3),$$

где n_k — единичный вектор нормали к достаточно удаленной от частицы поверхности, на которой справедлива обычная максвелловская электродинамика, следует, что поверхностный интеграл, стоящий в правой части, оказывается равным силе Лоренца. В результате теория Ми дает электродинамическое обоснование закона движения для электрона.

теория Нордстрема выглядела как равноправное объединение обоих полей в единой математической схеме и, таким образом, не связывалась с ЭПП. Правда, как мы увидим, никто, включая Нордстрема, не считал достигнутое объединение имеющим какой-либо физический смысл. Все же мы рассматриваем теорию Нордстрема в главе, посвященной теориям электромагнитно-полевого типа, не только потому, что она, подобно теориям Ми и Ишивары, была выдвинута в переломные 1912—1914 гг. и связана со скалярными теориями тяготения, но и потому, что Нордстрем, как и многие другие геттингенцы или воспитанники геттингенской традиции, в значительной мере разделял установки ЭПП.

Японский теоретик Дж. Ишивара, работавший в университете Тохоку в Сендаи, как и два других физика из этого университета — К. Тамаки и Т. Мидзуно, в 10-х годах активно пропагандировал и разрабатывал различные аспекты теории относительности и электродинамики движущихся тел. Вероятно, в эти годы существовали тесные контакты между университетом Тохоку и Геттингеном. Во всяком случае, в работах Ишивары чувствуется влияние геттингенских физиков: он стоит на позициях ЭПП, а теорию относительности считает ее развитием; кроме того, он значительную часть своих работ опубликовал на немецком языке, причем как раз в журнале геттингенских физиков «*Physikalische Zeitschrift*» [69].

Из принципа эквивалентности, вторично провозглашенного Эйнштейном в 1911 г., следовало, что скорость света можно рассматривать как меру гравитационного потенциала. Опираясь на эту идею, М. Абрагам, вышедший из Геттингена и с начала века бывший одним из лидеров ЭПП в Германии, разработал в 1911—1912 гг. скалярную теорию тяготения, в которой скорость света (а во втором варианте этой теории квадратный корень из нее) рассматривалась фактически как гравитационный потенциал. В качестве уравнений гравитационного поля Абрагам использовал четырехмерное, хотя и не лоренц-ковариантное обобщение уравнения Пуассона. Эйнштейн также разрабатывал, по крайней мере в первой половине 1912 г., скалярный подход, ограничиваясь, впрочем, только рассмотрением статического случая [38].

Ишиваре подход Абрагама, не связанный с казавшимся ему «метафизическим» принципом эквивалентности Эйнштейна и имеющий некоторые точки соприкосновения с ЭПП, казался более предпочтительным. Но и Абрагам, по мнению японского теоретика, не использовал в полной мере возможности своей теории, а именно возможность вывода уравнений гравитационного поля и выражения для тензора энергии-импульса этого поля из уравнений электромагнитного поля с переменной скоростью света. «Мы постулируем... вместе с Эйнштейном и Абрагамом,— писал Ишивара в 1912 г.,— что в пространстве постоянной скорости света существует только одно электромагнитное поле, но если скорость света изменяется в пространстве и во времени, то эти изменения приводят к возникновению гравитационного поля. Гравитационному полю теперь Абрагам приписывает некоторый четырехмерный тензор, зависящий

только от скорости света, компоненты которого представляют собой фиктивные натяжения, плотность энергии, поток энергии и плотность импульса. Но ставя во главу угла своей теории положения, касающиеся гравитационного тензора, Абрагам не анализирует их, и в результате его отношение к соответствующему электромагнитному тензору остается совершенно неясным. Но ведь следует иметь в виду, что электромагнитный 10-тензор (т. е. тензор 2-го ранга, имеющий 10 отличных от нуля компонент, именно симметричный тензор энергии-импульса.— *B. B.*) содержит в своих компонентах скорость света. Изменения ее должны, таким образом, приводить к возникновению дополнительных членов в уравнениях для закона сохранения энергии и импульса, которые, как это справедливо подчеркивает Эйнштейн, должны в совокупности представлять гравитационное поле» [70, с. 1190]. Задача, которую ставит перед собой Ишивара, вполне отвечает установкам ЭПП, о которой японский физик высказывался так: «Все же представляется целесообразным принять гипотезу равенства обеих названных скоростей (речь идет о скоростях распространения света и гравитационного поля, причем наличие последней следовало из гравитационных уравнений Абрагама.— *B. B.*) из простоты и созвучности с концепцией электромагнитной основы всех физических теорий» [70, с. 1189]. «В дальнейшем,— объяснял цель своей работы Ишивара,— я хотел бы стать на сторону Абрагама до тех пор, пока я не буду при обсуждении физической теории затрагивать метафизическую проблему пространства. Я хотел бы предпринять попытку вывести соотношения теории Абрагама для гравитационного тензора, а также его положение о пропорциональности тяжести и энергии из фундаментальных уравнений электромагнитного поля [там же].

Ишивара в следующей форме записывает максвелловские уравнения, имея в виду переменность скорости света и особую роль \sqrt{c} во второй теории Абрагама, на которую он опирается, точнее, которую он пытается вывести:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}(\mathbf{H} \sqrt{c}) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{E}}{\sqrt{c}} \right) + \rho \frac{\mathbf{v}}{c}, & \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{H}}{\sqrt{c}} \right) &= 0, \\ -\operatorname{rot}(\mathbf{E} \sqrt{c}) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{H}}{\sqrt{c}} \right), & \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{E}}{\sqrt{c}} \right) &= \frac{\rho}{\sqrt{c}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Естественно, эти уравнения при $c = \text{const}$ переходят в обычные уравнения Максвелла. Опираясь на эти уравнения, Ишивара получает следующее обобщенное выражение для закона сохранения энергии-импульса:

$$\rho \mathbf{F}^e + \frac{\eta^e}{c} \operatorname{grad} c = \operatorname{div} T^e. \quad (16)$$

Здесь T^e — тензор энергии-импульса электромагнитного поля; η^e — плотность энергии этого поля; \mathbf{F}^e — электромагнитная 4-сила, отнесенная к единице объема. Второй член левой части интерпретиру-

вался им как гравитационная сила. Это означало, что электромагнитное поле порождало гравитационное поле, причем выражение для компонент тензора энергии-импульса гравитационного поля он в отличие от Абрагама не постулировал, а вывел, согласовав их с уравнениями гравитационного поля Абрагама. Конечно, это был только частичный синтез электромагнетизма и гравитации, поскольку гравитация порождалась не только электромагнитным полем, но и веществом. Полное сведение гравитации к электромагнетизму потребовало бы решения задачи-максимум, т. е. той задачи, которую ставила перед собой теория Ми. В дальнейшем Ишивара продолжал разрабатывать эту теорию как в плане более последовательного ее согласования с теорией относительности, пытаясь ограничить справедливость специального принципа относительности бесконечно-малыми областями пространства-времени, так и в связи с задачей-максимум, возвращаясь фактически к идее электромагнитной природы массы электрона [71].

Обратимся теперь к теории Нордстрема, представляющей собой скорее чисто формальное, феноменологическое объединение электромагнитного и гравитационного полей в единую математическую схему. Опираясь на скалярный подход Абрагама и учитывая критику его теории Эйнштейном с позиций релятивистской программы, финский теоретик Г. Нордстрем, получивший геттингенскую выучку, в 1912—1913 гг. разработал два варианта лоренц-ковариантной скалярной теории гравитационного поля. Отсылая за подробностями к нашей работе, где рассмотрены обе теории Нордстрема и их роль в генезисе общей теории относительности [38], отметим здесь только, что 2-я теория допускает общековариантную формулировку, которая впервые была дана Эйнштейном и Фоккером в 1914 г. Строго говоря, эта теория выходила за рамки СТО, так как линейный элемент в ней выражался следующим образом:

$$ds^2 = \Phi \sum_i dx_i^2,$$

где Φ — гравитационный потенциал, и это означало, что она обладала конформно-инвариантными свойствами, так же как и уравнения Максвелла. Из калибровочной (или градиентной) симметрии максвелловских уравнений непосредственно следовало поэтому, что гравитационные поля не оказывают никакого влияния на электромагнитные явления (как известно, в теории Нордстрема отсутствует искривление световых лучей). Точно так же и электромагнитное поле ввиду обращения в нуль следа тензора энергии-импульса электромагнитного поля не оказывало влияния на гравитацию.

Общность теоретико-инвариантных свойств уравнений Нордстрема и Максвелла, а также и структуры самих уравнений позволила Нордстрему весьма элегантно образом, а именно путем введения пятимерного пространства, дать единую пятимерную формулировку системы уравнений гравитации и электромагнетизма [72].

Если напряженности электромагнитного поля, образующие так называемый 6-вектор (т. е. антисимметричный тензор 2-го ранга),

обозначить $f_{xy}, f_{yz}, f_{xz}, f_{xu}, f_{yu}, f_{zu}$, где $u = ict$, а 4-вектор напряженности гравитационного поля (связанный со скалярным потенциалом) обозначить $f_{ux}, f_{uy}, f_{uz}, f_{uw}$, где w — пятая, пока совершенно формально введенная переменная, то уравнения гравитационного и электромагнитного полей можно записать, как это показал Нордстрем, в следующей симметричной форме:

$$\frac{\partial f_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial f_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial f_{xu}}{\partial u} + \frac{\partial f_{xw}}{\partial w} = \frac{1}{c} t_x,$$

$$\frac{\partial f_{ux}}{\partial x} + \frac{\partial f_{uy}}{\partial y} + \frac{\partial f_{uz}}{\partial z} + \frac{\partial f_{uw}}{\partial w} = \frac{1}{c} t_u, \tag{17}$$

$$\frac{\partial f_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial f_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial f_{wz}}{\partial z} + \frac{\partial f_{wu}}{\partial u} = \frac{1}{c} t_w,$$

$$\frac{\partial f_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial f_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial f_{xy}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial f_{zw}}{\partial y} + \frac{\partial f_{wy}}{\partial z} + \frac{\partial f_{yz}}{\partial w} = 0,$$

$$\frac{\partial f_{zu}}{\partial y} + \frac{\partial f_{yu}}{\partial z} + \frac{\partial f_{yz}}{\partial u} = 0$$

$$\frac{\partial f_{yu}}{\partial x} + \frac{\partial f_{ux}}{\partial y} + \frac{\partial f_{xy}}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial f_{uw}}{\partial z} + \frac{\partial f_{wz}}{\partial u} + \frac{\partial f_{zu}}{\partial w} = 0. \tag{18}$$

Нордстрем так комментирует полученную им систему уравнений: «Обе системы уравнений (т. е. системы (17) и (18).— *В. В.*) совершенно симметричны относительно переменных x, y, z, u, w . Они, естественно, не имеют пока никакого физического значения. Если приравнять нулю все частные производные по w , то получается, что эти уравнения переходят в уравнения электромагнитного и гравитационного полей (в случае гравитации — в уравнения теории Нордстрема.— *В. В.*) при условии, что величины t_x, t_y, t_z, t_u отождествляются с компонентами 4-тока, а $-\frac{1}{c} t_w$ — с плотностью гравитационной массы покоя. Первые четыре уравнения в обеих системах — уравнения Максвелла в форме Минковского; последнее уравнение системы (17) — основное уравнение гравитационного поля, а шесть остальных уравнений системы (18) выражают безвихревой характер гравитационного поля. Это значение уравнений (17) и (18) показывает, что правомерно рассматривать пространственно-временной мир как плоскость, лежащую в 5-мерном мире. В этом 5-мерном мире t_m — компоненты 5-вектора, а f_{mn} — компоненты 10-вектора (т. е. антисимметричного тензора 2-го ранга.— *В. В.*). f_{mn} полностью характеризует физическое состояние эфира. Пятимерный мир имеет одну выделенную ось, ось w ; четырехмерный пространственно-временной мир ортогонален этой оси, и во всех точках полные производные компонент f по w равны нулю» [72, с. 505]. Если ввести понятие пятимерного потенциала, то не-

трудно в объединенной форме записать выражения для закона сохранения энергии-импульса, а также волновые уравнения полей. Учитывая возможность общековариантной формулировки теории Нордстрема, а также ее явный выход за рамки лоренц-ковариантности, можно сказать, что эта пятимерная единая теория гравитации и электромагнетизма была, в сущности, первым прообразом единых геометризованных теорий поля, хотя идея геометризации физических взаимодействий выражена в ней скорее в косвенной форме. Но все же в теории был использован расширенный, пятимерный пространственно-временной континуум, и именно на этой, геометрической, основе оба, электромагнитное и гравитационное, поля удавалось объединить в единую структуру, описываемую пятимерным антисимметричным тензором второго ранга. Кроме того, как показали Эйнштейн и Фоккер, гравитационная теория Нордстрема, а следовательно, и его единая пятимерная теория допускали общековариантную формулировку, причем линейный элемент в ней отличался от линейного элемента пространства-времени Минковского. Это означало фактически использование геометрии искривленного пространства-времени, в которой ход часов и длина масштабных стержней зависели от гравитационного потенциала (обратно пропорционально).

Конечно, объединение, предпринятое Нордстремом, носило явно формальный характер, требование обращения в нуль всех производных напряженностей по пятой переменной w не имело физического обоснования, совершенно неясен был геометрический и тем более физический смысл пятого измерения. И все же сама возможность такого пятимерного представления гравитации и электромагнетизма наводила на мысль о глубоком родстве этих взаимодействий, которое, возможно, коренилось в геометрии пространства-времени, обобщенной тем или иным образом. «Развитая выше теория,— писал Нордстрем в конце своей работы,— дает, как мы видели, формальное преимущество благодаря тому, что электромагнитное и гравитационное поля могут быть поняты как единственное (единое) поле. Нового физического содержания при этом, конечно, не возникает. Между тем я не исключаю, что найденная форма симметрии может иметь более глубокую основу» [44, с. 506].

Хотя Нордстрем, конечно, испытал влияние электромагнитной концепции физики (он использовал, в частности, понятие эфира), его вариант объединения электромагнитного и гравитационного полей фактически выходил за рамки ЭПТ и, безусловно, содержал элементы подхода, основанного на программе ЕГТП. Правда, не вполне ясно, повлияла ли эта ранняя попытка Нордстрема ввести пятимерие в физику в целях объединения гравитации и электромагнетизма на первые классические исследования по программе ЕГТП (т. е. на работы Гильберта, Г. Вейля, Т. Калуцы). Гильберт и Вейль ссылались на Ми как на главного предшественника; впрочем, в книге «Пространство, время, материя» при изложении своей единой теории Вейль упоминает и Нордстрема. Калуца же, с чьим

именем прочно связана идея пятимерного подхода в русле программы ЕГТП, в своей классической статье 1921 г. о работе Нордстрема не упоминает (см. главу 4).

ВЫВОДЫ

Итак, мы рассмотрели в этой главе формирование ЭПП, пришедшей на смену классико-механической программе (КМП) и впервые придавшей точное физическое значение континуалистскому идеалу научного знания, тематически (в смысле Дж. Холтона [73]) восходящему к Аристотелю и Декарту. ЭПП оказалась первой полевой программой, опиравшейся на прочный физический фундамент (максвелловскую теорию электромагнитного поля, электронную теорию Лоренца). Именно с провозглашением ЭПП был связан, как мы видели, один из важнейших этапов в развертывании научной революции в физике в начале XX в.

На основе этой программы были выдвинуты такие детально разработанные проекты синтеза физики, как эйнштейновские единые теории поля 1908—1910 гг., «теория материи» Ми 1912 г., теории Ишивары и Нордстрема (1912—1914), которые, как мы увидим, сыграли определенную роль в генезисе программы ЕГТП, в частности в разработке теорий Гильберта и Вейля.

СТО и кванты со временем (примерно к началу второго десятилетия XX в.) поставили под сомнение претензии ЭПП. Но «полевой идеал единства» (выражение Гильберта), сформировавшийся в русле этой программы, привлекал многих теоретиков. Он получил значительную поддержку благодаря успешному завершению релятивистской теории гравитационного поля, опиравшейся на расширенную релятивистскую программу.

Глава вторая
Общая теория относительности —
ядро программы
единых геометризованных теорий поля

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ПРОГРАММА
И ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Процесс формирования общей теории относительности (ОТО), явившейся одновременно последовательной релятивистской теорией гравитационного поля, детально рассмотрен нами ранее [38]. Здесь мы только коснемся некоторых особенностей этого процесса, связанных с генезисом программы ЕРТП. СТО по своей сути была теорией программного типа. Эта программность ее выражалась в том, что она требовала перестройки фактически всей физики, такой перестройки, чтобы основные уравнения физических теорий (механики, гидродинамики и теории упругости, электродинамики, электронной теории и оптики, кинетической теории теплоты и термодинамики и т. д.) стали лоренц-ковариантными и в пределе малых скоростей частиц вещества сводились к классическим. Формально именно в этом заключалась новая, релятивистская программа (РП), выглядывавшая по сравнению с ЭПП значительно более феноменологичной. Она, безусловно, способствовала синтезу физики, но на какой-то совершенно новой основе, казавшейся многим слишком формальной и потому явно недостаточной. Поэтому РП нередко уживалась и с понятием эфира, и в какой-то мере с самой ЭПП, хотя последовательная приверженность установкам РП как будто исключала использование понятия эфира и универсалистские претензии ЭПП. От многих ускользал важный содержательный подтекст РП, связанный с выдвиганием на первый план пространственно-временных понятий, теоретико-инвариантного подхода, а также с фундаментальностью понятия классического поля (хотя и не обязательно электромагнитного).

В сущности, релятивистскую программу, основанную на СТО, следовало бы назвать релятивистско-полевой, учитывая фундаментальное значение понятия поля в структуре этой теории. К началу второго десятилетия XX в. РП достигла больших успехов: была создана релятивистская механика системы и сплошной среды, заложены основы релятивистской механики твердого тела, термодинамики, электродинамики сплошной среды. Сама СТО получила наконец убедительное экспериментальное подтверждение и широкое признание.

Определенные, хотя и не катастрофические трудности РП испытывала при релятивистской перестройке теории тяготения. А. Пуанкаре и затем Г. Минковский показали, что ньютоновский закон тяготения можно естественным лоренц-ковариантным образом обобщить, устранив дальнедействующий характер гравитации. Но соответствующий элементарный закон взаимодействия нельзя было получить из полевых уравнений, аналогичных уравнениям Максвелла. При попытке распространить СТО на гравитацию (1907) Эйнштейн столкнулся с фактом равенства инертной и гравитационной масс, в котором усмотрел основу для построения полевой теории тяготения, явно недооцениваемую как предшественниками, так и современниками (например, Пуанкаре и Минковским). Размышляя над этим фактом с позиций РП, он пришел к принципу эквивалентности (однородного гравитационного поля и равноускоренной системы отсчета), который, в свою очередь, привел Эйнштейна к выводу о необходимости расширения РП при попытке ее применения к проблеме тяготения. Фактически это подрывало основы РП, опиравшейся на СТО. К тому же было неясно, как именно надо расширить эту программу (т. е. какой класс допустимых преобразований должен был заменить преобразования Лоренца). Твердо веря в правильность своего принципа эквивалентности и не зная при этом, как справиться с указанными трудностями, Эйнштейн даже на время отошел от проблемы гравитации. Как мы видели, в 1908—1910 гг. он активно работал над квантовой теорией и, пожалуй, еще более напряженно над проблемой единой теории поля, из которой бы естественным образом можно было получить и электрон, и квантовые особенности поведения электромагнитного поля. Эти усилия Эйнштейна, с особой силой продемонстрировавшие его глубокую приверженность «теоретико-полевому идеалу единства», не увенчались, как мы знаем, успехом, и уже в 1910 г. он вернулся к проблеме гравитации. Сочетание принципа эквивалентности с требованиями РП означало, что при разработке релятивистской теории тяготения Эйнштейн фактически руководствовался расширенной релятивистской программой, которая в отличие от первоначальной РП не имела ясных очертаний, по крайней мере до 1913 г., когда Эйнштейн вместе с М. Гроссманом выдвинул тензорно-геометрическую концепцию гравитационного поля, неразрывно связанную с общим принципом относительности и его математическим эквивалентом — принципом общей ковариантности. Но тензорно-геометрическая теория гравитации Эйнштейна — Гроссмана при общековариантном в целом замысле содержала уравнения гравитационного поля, которые не удовлетворяли требованию общей ковариантности. Только в ноябре 1915 г. Эйнштейн и Гильберт сумели получить общековариантные уравнения гравитационного поля, завершив тем самым построение релятивистской теории тяготения, получившей название общей теории относительности. В сущности, только после этого контуры расширенной релятивистской программы стали ясно очерченными. Но в отличие от СТО, положившей начало РП, ОТО оказалась лишь теорией тяготения, и расширенная релятивистская

программа (РРП) в первоначальном виде не вышла за пределы гравитационной проблематики. И все же ОТО сыграла свою программную роль, именно при формировании программы единых геометризованных теорий поля (ЕГТП).

Тензорно-геометрическая концепция гравитации, согласно которой гравитация, физическое взаимодействие, имеющее полевую природу, отождествляется с геометрической, пространственно-временной структурой, означало радикальное переосмысление самого понятия классического поля, как оно было развито в электродинамике. Электромагнитное поле в теориях Максвелла и Лоренца рассматривалось как те или иные возмущения в эфире или, после того как понятие эфира в глазах многих ученых оказалось подорванным специальной теорией относительности, ему приписывалось значение самостоятельной физической реальности. Но в том и в другом случае оно рассматривалось как некоторая субстанция, погруженная в пространство и определенным образом распространяющаяся в этом пространстве и во времени (или, с точки зрения четырехмерной формулировки СТО, развитой Минковским, как некоторая субстанция, погруженная в четырехмерный «мир» Минковского). Четырехмерный потенциал или антисимметричный тензор 2-го ранга, тензор напряженностей электромагнитного поля не имели никакого геометрического значения, хотя трансформационные свойства этих величин, конечно, были связаны с геометрией пространства-времени. Геометрия «мира» Минковского была внешней по отношению к полю, и ее геометрические характеристики, например линейный элемент (метрика) или метрический тензор, были раз и навсегда заданными и не зависели ни от поля, ни от вещества.

Тензорно-геометрическая концепция гравитации радикально изменила понятие классического поля, вернее, изменила смысл именно гравитационного поля, которое после открытия СТО понималось примерно так же, как и электромагнитное. Оказалось, что требования релятивизма по отношению к гравитационному полю приводят к такому его истолкованию, когда оно описывает не только гравитационное взаимодействие, «но и поведение масштабов и часов, метрические соотношения (метрику) четырехмерного мира» (В. Паули). Действительно, потенциал совпадает с метрическим тензором четырехмерного риманова пространства, а напряженность поля — с аффинной связностью, определяющей структуру геодезических линий этого пространства. Таким образом, геометрия утрачивает свой априорный характер, становится динамической, а гравитационное поле геометризуется. «Это слияние двух раньше совершенно различных объектов — метрики и тяготения — должно рассматриваться, — писал в 1920 г. В. Паули, — как прекраснейшее достижение общей теории относительности» [63, с. 208].

В те годы физике было известно только два различных поля: электромагнитное, которое рассматривалось наравне с веществом по отношению к пространству-времени, и гравитационное, имеющее, таким образом, геометрическую природу. Всего за несколько лет до завершения ОТО Эйнштейн, а также Ми и некоторые другие физи-

ки, стремясь реализовать электромагнитно-полевой идеал единства физического знания, искали пути сведения к электромагнитному полю и вещества и гравитации. В свете же ОТО гравитационное поле выглядело более богатой и фундаментальной структурой, потому что оно описывалось значительно более сложной системой уравнений и имело глубокий пространственно-временной смысл. Поэтому для тех, кого продолжала волновать проблема теоретико-полевого синтеза физики, ОТО открывала новую возможность решения этой проблемы и потому приобретала программное значение.

ОТНОШЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА К УНИФИЦИРУЮЩИМ ВОЗМОЖНОСТЯМ ОТО

Хотя Эйнштейн считал ОТО обобщением СТО, неоднократно говорил о том, что ОТО радикально меняет представления о пространстве и времени и является фундаментальной теорией, относящейся к физике в целом, он также подчеркивал, что в физическом отношении ОТО является не более чем релятивистской теорией тяготения. Так он думал, по существу говоря, начиная с 1913 г., когда им (совместно с М. Гроссманом) была развита тензорно-геометрическая концепция гравитации, до 1919—1920 гг., когда его отношение к программе ЕГТН постепенно стало меняться и он вслед за Гильбертом и Вейлем встал на позиции этой программы.

Приведем несколько высказываний Эйнштейна, относящихся главным образом к 1915—1916 гг. и подтверждающих это. «Общая теория относительности не может дать нам о сущности остальных явлений природы ничего, что не было бы уже известно в специальной теории относительности. Мое мнение, высказанное недавно в этой связи, было в этом отношении ошибочным. Каждую физическую теорию, совместимую с частной теорией относительности, можно при помощи абсолютного дифференциального исчисления включить в схему общей теории относительности, причем последняя не дает какого-либо критерия допустимости физической теории», — писал Эйнштейн в конце своей знаменитой статьи, в которой он впервые получил правильные общековариантные уравнения гравитационного поля и которая означала завершение основ ОТО [74, с. 451]¹.

¹ Впрочем, в драматические ноябрьские дни, уже после возвращения Эйнштейна на путь общей ковариантности по отношению к полевым уравнениям, был момент, когда Эйнштейн думал иначе. Именно это имел он в виду, говоря (в приведенном высказывании) об ошибочности своего мнения, высказанного незадолго до своего последнего шага к правильным уравнениям тяготения. Речь идет о статье, представленной 11 ноября 1915 г. [75]. В ней Эйнштейн, пытаясь устранить противоречивость укороченного варианта полевых уравнений

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik}.$$

выдвинул гипотезу об «электромагнитно-подобном» строении материи, выражавшуюся в предположении о «бесследовости» тензора энергии-импульса материи T_{ik} . В сущности, в этой короткой заметке, которую сам Эйнштейн две

А через две недели после этого он примерно о том же писал Зоммерфельду: «Последняя (т. е. общая теория относительности.— В. В.) по сути дела дает закон гравитационного поля, причем совершенно однозначно, если удовлетворить требованию общей ковариантности... Наоборот, любая другая теория, удовлетворяющая специальной теории относительности, должна перейти путем преобразования в общую теорию относительности, по последняя не дает никакого нового критерия. Вы видите, следовательно, что я ничем не могу Вам помочь» [68, с. 194]. Вероятно, Зоммерфельд думал о применении ОТО к движению электрона в атоме, тем более что именно в это время он получил свой замечательный результат, относящийся к учету СТО при движении электрона (при этом перигелий эллиптической орбиты электрона получал добавочное вращение, что приводило к дополнительному расщеплению спектральных линий водородоподобных атомов). Эйнштейн же полагал, что переход к ОТО в рассматриваемой ситуации не должен привести к новым физическим результатам. В письме к М. Бессо от 3 января 1916 г. Эйнштейн заметил, в частности: «Анализа размерностей, согласно которому электроны и кванты требуют особой \hbar -гипотезы, независимой от гравитации, остается, таким образом, правильным» [56, с. 49]. По-видимому, речь здесь идет о соотношении $\hbar \simeq e^2/c$, связывающем постоянную Планка, заряд электрона и скорость света и не включающем гравитационную постоянную. Вспомним, что этим соотно-

недели спустя считал совершенно ошибочной, был предложен своеобразный подход к построению единой полевой теории материи, согласно которому гравитационное и электромагнитное поля рассматривались наравне и в равной мере вносили вклад в образование частиц, обладающих массой покоя. По существу, эйнштейновский подход заключался в том, чтобы тензор T_{ik} связать исключительно с электромагнитным полем или, во всяком случае, с еще неизвестными «безмассовыми» полями, которые, так же как электромагнитное поле, не вносят вклад в след тензора T_{ik} , и происхождение материи (с массой покоя, или ненулевым следом T) истолковать как результат взаимодействия электромагнитного (или квазиэлектромагнитного) и гравитационного полей. Иначе говоря, отличным от нуля должен был оказаться след тензора $T + t$, где t_{ik} — компоненты энергии-импульса гравитации. «...Вспомним,— писал Эйнштейн в этой работе,— что, согласно нашим знаниям, „материю“ не следует понимать как нечто изначально заданное, физически элементарное. Есть еще немало людей, которые надеются, что можно будет свести материю к чисто электромагнитным процессам, однако эти процессы во всяком случае происходили бы в соответствии с усовершенствованной по сравнению с электродинамикой Максвелла теорией» [75, с. 436]. Предположив, что и в этой (еще не существующей) теории след тензора энергии-импульса обращается в нуль и «что существенной составной частью „материи“ ... являются гравитационные поля», он приходит к выводу о том, что «в действительности положительна лишь величина $\sum_{\mu} (T_{\mu}^{\mu} + t_{\mu}^{\mu})$, а $\sum_{\mu} T_{\mu}^{\mu}$ всюду обращается в нуль» [75, с. 436]. Разумеется, здесь еще не было никакой единой теории, но все-таки содержалась, вне всякого сомнения, мысль о фундаментальности, первичности электромагнитного и гравитационного полей (при этом, правда, Эйнштейн считал, что необходима определенная модификация электродинамики Максвелла) и о сводимости вещества, точнее, частиц, обладающих массой покоя, к некоторой комбинации этих полей.

пением он руководствовался при разработке своей единой полевой теории квантов и электрона 1908—1910 гг.

Таким образом, Эйнштейн полагал, что «общий принцип относительности, не налагая никаких новых ограничений, дает возможность точно описать влияние гравитационного поля на все процессы без привлечения каких-либо новых гипотез» [76, с. 493]. Эта фраза взята из знаменитой мартовской работы Эйнштейна «Основы общей теории относительности» (1916), впервые содержавшей полное, систематическое изложение ОТО. Говоря о «новых гипотезах», он имел в виду прежде свою гипотезу об «электромагнитно-подобной» структуре материи. И хотя Эйнштейн не считал, по-видимому, окончательно решенным вопрос о роли гравитации в строении микромира, в 1915—1917 гг. (а возможно, вплоть до 1919 г.) он крайне скептически относился к возможному значению ОТО как для решения проблемы строения вещества, так и для разработки нетривиального объединения гравитации и электромагнетизма. «В частности, может остаться открытым вопрос,— писал Эйнштейн в упомянутой выше мартовской статье,— о том, смогут ли теория электромагнитного поля и теория гравитационного поля совместно служить базой для теории материи. Общий постулат относительности в принципе ничего не может сказать об этом. В процессе развития теории выяснится, смогут ли электродинамика и учение о тяготении вместе дать то, что не удавалось одной лишь первой теории» [76, с. 493]. Все-таки последняя фраза свидетельствует о том, что Эйнштейн не исключал возможности такого объединения электромагнетизма и гравитации, которое бы смогло «служить базой для теории материи».

В следующем разделе мы рассмотрим как раз первую теорию такого рода, развитую Гильбертом, который в том же знаменательном ноябре 1915 г., когда Эйнштейн бился над общековариантными уравнениями поля, также решил проблему этих уравнений, но по-другому, считая своей главной задачей построение единой полевой теории физического мира. Несколько опережая события, заметим, что Эйнштейн весьма критически относился к гильбертовскому варианту полевого синтеза физики. Более того, в 1916 г., набросав теорию гравитационных волн, Эйнштейн заметил: «...атом вследствие внутриатомного движения электронов должен излучать не только электромагнитную, но и гравитационную энергию, хотя и в ничтожном количестве. Поскольку в природе в действительности ничего подобного не должно быть, то, по-видимому, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации (т. е. ОТО.— В. В.)» [77, с. 522]. Таким образом, в 1916 г. он больше склонялся к мысли, что не квантовую теорию, или учение об атоме, следует выводить из ОТО или из некоторой единой полевой теории гильбертовского типа, а, наоборот, осознавая классический характер ОТО, дополнить ее при обсуждении проблем физики микромира квантовыми представлениями. Суммируем сказанное. В 1915—1916 гг. (и, по-видимому, вплоть до 1918—1919 гг.) Эйнштейн рассматривал ОТО как

теорию гравитационного поля, едва ли способную пролить какой-либо новый свет на проблему строения материи. Более того, он полагал, что при рассмотрении гравитационных явлений в микромире ОТО нужно модифицировать с помощью квантовой теории. Возможно, негативной оценке Эйнштейном унифицирующих возможностей ОТО способствовало его явно отрицательное отношение к теории Гильберта, а также его прошлый неудачный опыт, связанный с разработкой единой полевой теории 1908—1910 гг.

ТЕОРИЯ ГИЛЬБЕРТА —

ПЕРВАЯ ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ, ОСНОВАННАЯ НА ОТО

В предыдущих работах [38, 78] мы уже рассматривали фундаментальную статью Гильберта «Основания физики» (1-е сообщение), доложенную им 20 ноября 1915 г. на заседании Геттингенского королевского научного общества [79], в которой им впервые были получены правильные по форме общековариантные уравнения гравитационного поля, а также четко сформулирован аналог 2-й теоремы Нетер, через два с половиной года обобщенной его ученицей Э. Нетер и доказанной ею. Но не вывод общековариантных уравнений гравитации сам по себе и не проблема законов сохранения в тензорно-геометрической теории тяготения интересовали Гильберта в первую очередь. Его занимали основания физики, и, поскольку речь шла о физике в целом, главную свою задачу он видел в разработке некоторой единой физической теории, объединяющей в себе и электромагнетизм, и гравитацию, и теорию электрона, и кванты. В упомянутых выше работах мы как раз сосредоточивали основное внимание или на проблеме гравитационных уравнений, или на проблеме законов сохранения в ОТО, т. е. на тех позитивных результатах, которые были получены Гильбертом в этой замечательной работе. Основной же его замысел, связанный с построением единой теории поля, так и остался нереализованным.

Еще раз обратимся к анализу гильбертовских «Оснований физики», концентрируя внимание прежде всего на том, каким образом в них решалась проблема создания единой теории поля, первой теории такого рода, опирающейся на ОТО. Одной из сквозных тем в творчестве Гильберта была аксиоматизация научного знания. Г. Вейль делил его научную биографию на шесть периодов: 1) теория алгебраических инвариантов (1885—1893), 2) теория алгебраических числовых полей (1893—1898), 3) основания геометрии (1898—1902), 4) интегральные уравнения (1902—1912), 5) физика (1910—1922), 6) основания математики в целом (1922—1930). Три из этих шести разделов (третий и два последних) целиком посвящены исследованию оснований, т. е. аксиоматике. Задолго до своих работ по физике, в 1900 г., он выдвинул как важнейшую научную задачу проблему аксиоматизации физики (в докладе «Математические проблемы» на II Международном конгрессе математиков в Париже). Речь идет о 6-й проблеме, которая, согласно Гильберту,

заклучалась в «аксиоматическом построении по этому же образцу (т. е. по образцу геометрии.— В. В.) тех физических дисциплин, в которых уже теперь математика играет выдающуюся роль» [80, с. 34]. Он имел в виду механику и тесно связанные с ней кинетическую теорию газов и статистическую механику (не случайно он объединял аксиоматизацию физики и теории вероятностей). Достойно внимания, что он предвидел значение теории непрерывных групп при решении этой проблемы [80, с. 35].

И в 1905 г., т. е. за пять лет до начала «физического» периода, Гильберт вместе с Минковским руководил знаменитым геттингенским семинаром по электронной теории и электродинамике движущихся тел [81]. Хотя эта деятельность не оставила следа в публикациях Гильберта (Минковского же она в конечном счете привела к четырехмерной теоретико-инвариантной формулировке СТО), едва ли можно усомниться в серьезности его «физических» интересов.

Первые физические работы Гильберта были посвящены применению теории интегральных уравнений к кинетической теории газов и теории излучения. Используя новые математические методы, он думал не только об улучшении вычислений, но и о выявлении на их основе аксиоматической структуры этих физических теорий. Постепенно его интересы все больше сдвигаются к наиболее фундаментальным проблемам физики, а именно к проблемам строения вещества и электромагнитно-полевого синтеза физики. С 1914 г. в Геттингене начинает работать семинар по структуре материи, организованный П. Дебаем по инициативе Гильберта. Дебай вспоминал впоследствии, что Гильберта привлекала проблема построения единой теории поля, основанной на обобщении максвелловских уравнений. По-видимому, — и это подтверждается гильбертовскими «Основаниями физики» — он находился под влиянием теории Ми. Вспомним также, что электромагнитно-полевая программа была весьма популярна среди геттингенских физиков и математиков (достаточно назвать имена М. Абрагама, Э. Вихерта, В. Кауфмана, В. Ритца, К. Шварцшильда, Г. Минковского и др.) [69].

Другой теорией, которая в не меньшей степени привлекала Гильберта, была тензорно-геометрическая теория гравитации, первоначальный набросок которой был дан Эйнштейном в совместной работе с М. Гроссманом в 1913 г. Об этом свидетельствует приглашение Эйнштейна в Геттинген летом 1915 г. К сожалению, мало что известно о встрече Гильберта и Эйнштейна в это лето. Имеется только один известный нам документ — письмо Эйнштейна к Зоммерфельду от 15 июля 1915 г., в котором можно прочесть: «В Геттингене у меня была большая радость — было понято все до последних деталей. Гильберт меня совершенно очаровал. Выдающийся человек!» [68, с. 192]². Можно вспомнить, что, несмотря на успехи тензорно-геометрической теории, она в это время находилась в некотором тупике, связанном с проблемой уравнений гравитационного поля. Эйнштейн ошибочно считал, что при общековариантном кар-

² Перевод уточнен [38, с. 314].

касе теории в целом сами уравнения поля не могут быть общековариантными. Поэтому слова о том, что «было понято все до последних деталей» могли в какой-то мере относиться к проблеме требования общей ковариантности по отношению к полевым уравнениям гравитации и к тому, что и Гильберт понял эту теорию.

В своих «Основаниях физики» Гильберт и попытался соединить идеи теории материи Ми и эйнштейновской теории тяготения, в которых, как мы знаем, основополагающую роль играли «теоретико-полевой идеал единства», принципы инвариантности и вариационные принципы. В сочетании этих теорий при определенной их модификации, конечно использующих столь мощные математические структуры, как теорию непрерывных групп преобразований и их инвариантов, вариационное исчисление и риманову геометрию, Гильберт увидел возможность установить наконец основания физики и построить единую физическую теорию.

Рассмотрим теорию Гильберта несколько более подробно. Исходные положения и истоки теории намечены им уже в первых фразах статьи: «Грандиозные задачи, поставленные Эйнштейном, а также остроумно разработанные для их решения методы, его глубоко идущие мысли и образование понятий, с помощью которых Ми строил свою электродинамику, открыли для исследований по основаниям физики новые пути. Я хотел бы в последующем, следуя аксиоматическому методу и исходя, по существу, из двух аксиом, составить новую систему основных уравнений физики. Эти уравнения, обладая идеальным изяществом, содержат одновременно решение задач Эйнштейна и Ми» [79, с. 589]. Таким образом, речь идет о теории, содержащей в себе релятивистскую тензорно-геометрическую теорию гравитационного поля и теорию Ми, т. е. нелинейную электродинамику, которая в перспективе давала как будто решение проблемы материи на электромагнитно-полевой основе.

В основу теории кладется пространственно-временное многообразие с координатами w_s ($s = 1, 2, 3, 4$). Затем постулируется, что физическое событие в точке w_s полностью характеризуется десятью гравитационными потенциалами $g_{\mu\nu}$ и четырьмя электродинамическими потенциалами q_s , которые соответственно являются симметричным тензором второго ранга и четырехвектором по отношению к произвольным непрерывным преобразованиям координат w_s . Интересно, что, хотя риманова структура многообразия явным образом не постулируется, она все же предполагается, поскольку в дальнейшем используется, по существу, теория Эйнштейна — Гроссмана, образовавшая впоследствии костяк ОТО, в частности появляются тензор кривизны риманова пространства и его двухиндексный и скалярный аналоги. При этом гравитационные потенциалы в свете ОТО или ее первоначального варианта имеют прозрачную геометрическую интерпретацию: они являются компонентами метрического тензора пространственно-временного риманова многообразия. Электродинамические же потенциалы q_s , вводимые Гильбертом наравне с $g_{\mu\nu}$, такого смысла не имеют и фигурируют в теории несколько внешним образом. Далее предполагается, что полевые уравнения

выводимы из общековариантного вариационного принципа с лагранжианом («мировой функцией»), зависящим от потенциалов $g_{\mu\nu}$, q , и их производных $\partial g_{\mu\nu}/\partial w_i$, $\partial^2 g_{\mu\nu}/\partial w_i \partial w_k$, $\partial q_s/\partial w_i$. Эту формулировку динамического закона теории Гильберт расщепляет на две аксиомы: «аксиому Ми о мировой функции», в которой постулируется вариационная структура уравнений поля с лагранжианом H :

$$\delta \int H \sqrt{g} d\omega = 0, \quad (1)$$

и «аксиому об общей инвариантности», в которой утверждается, что функция H должна быть «инвариантна по отношению к любому преобразованию мировых параметров w_s », и которую он вполне мог бы назвать «аксиомой Эйнштейна». В примечании к этой, последней, аксиоме он писал, что «в только что сформулированной аксиоме 2 основная мысль Эйнштейна об общей ковариантности находит свое простейшее выражение». Не сделал он этого потому, что, как он заметил в этом же примечании, «у Эйнштейна принцип Гамильтона играет только второстепенную роль, и его функции H никоим образом не являются общими инвариантами и не содержат электрических потенциалов» [79, с. 589].

Лагранж-эйлеровские уравнения этой вариационной задачи, связанные с гравитационными потенциалами $g_{\mu\nu}$, естественно было отождествить с десятью уравнениями гравитационного поля, а четыре уравнения, связанные с варьированием электродинамических потенциалов, — с уравнениями электромагнитного поля. Каким же образом предполагалось связать или объединить гравитацию, электромагнетизм (чисто полевые явления по определению) и «материю», ассоциируемую с частицами, обладающими массой покоя, прежде всего электронами? Схема объединения была двойной. «Материя» предполагалась сводимой к электромагнитному полю точно так же, как в теории Ми, и здесь Гильберт ничего нового не внес. Гравитационное же и электромагнитное поля объединялись в теории Гильберта совершенно новым способом, основанным фактически на чисто математической теореме, согласно которой четыре уравнения электромагнитного поля можно было рассматривать как следствие десяти уравнений гравитационного поля, подобно тому как уравнения движения частиц в ОТО можно рассматривать как следствие полевых уравнений тяготения. Сразу заметим, что речь идет фактически о второй теореме Нетер, специализированной для случая, когда бесконечная непрерывная группа зависит от четырех произвольных функций пространства-времени. «Основой для построения моей теории, — писал Гильберт, — служит математическое предложение, доказательство которого я изложу в другом месте». И дальше следовала формулировка этой теоремы: «Если выражение J инвариантно по отношению к любым преобразованиям и содержит n величин и их производных и если из условия

$$\delta \int J \sqrt{g} d\omega = 0$$

составить n лагранжевых вариационных уравнений для этих n ве-

лично, то в этой инвариантной системе n дифференциальных уравнений четыре всегда являются следствием $n - 4$ остальных, в том смысле, что всегда четыре, не зависящие одна от другой линейные комбинации этих n дифференциальных уравнений и их полных производных тождественно удовлетворяются» [79, с. 589]. Действительно, в этой теореме мы узнаем частный случай второй теоремы Нетер, доказанной спустя два с половиной года приехавшей в Геттинген Эмми Нетер³.

Итак, «теорема I» Гильберта, являющаяся частным случаем второй теоремы Нетер, позволяла рассматривать уравнения электродинамики как следствие уравнений гравитационного поля. «...На основании этого математического предложения (т. е. „теоремы I“.— В. В.),— писал Гильберт,— мы можем высказать утверждение, что в указанном смысле электродинамические явления суть следствия тяготения» [79, с. 591]. Интересно, что проблему объединения гравитации и электромагнетизма Гильберт считал имеющей глубокие корни в Геттингене. За его словами, приведенными выше, следует замечание: «В этом результате я вижу простое и поразительное решение проблемы Римана, который первым пытался установить теоретически связь между тяготением и светом» [79, с. 591].

Затем Гильберт специализирует вид лагранжиана, вводя тем самым еще одну аксиому. Он постулирует следующее соотношение:

$$H = K + \mathcal{L}, \quad (2)$$

где K — скалярная кривизна (гравитационная часть лагранжиана), а \mathcal{L} — фактически электромагнитная часть лагранжиана, зависящая, конечно, не только от q_s и q_{sh} , но и от g^{uv} (для упрощения вычислений он предполагает, что \mathcal{L} не содержит g). Используя несложные, но несколько громоздкие вычисления, характерные для вариационного исчисления, Гильберт получает также важный результат о связи электромагнитной части лагранжиана и действия с тензором энергии-импульса электромагнитного поля. Эта связь осуществлялась посредством варьирования метрического тензора электромагнитной части интеграла действия. В теории Гильберта «материя» сводилась к электромагнитному полю в соответствии с теорией Ми. Поэтому указанный результат сформулирован так: «...электромагнитный тензор энергии Ми есть не что иное, как инвариантный тензор, получающийся путем дифференцирования инварианта \mathcal{L} по потенциалам тяготения g^{uv} при указанном переходе к пределу» [79, с. 596]. В этом результате Гильберт усматривал

³ Эта теорема в формулировке самой Э. Нетер звучит следующим образом: «Если интеграл I (т. е. интеграл $I = \int f(x, u, du/dx, \dots) dx$, где u — основные величины, в теории Гильберта это g_{uv}, q_s .— В. В.) инвариантен по отношению к группе $G_{\infty, r}$ (т. е. бесконечной непрерывной группе, преобразования которой зависят от r произвольных функций $p(x)$ и их производных.— В. В.), в которой встречаются производные до σ -й производной, то имеют место r тождественных соотношений между лагранжевыми выражениями и их производными до σ -го порядка» [82, с. 614]. История установления теорем Нетер рассмотрена в нашей книге [78].

подтверждение своей мысли о наличии глубокого родства между ОТО и теорией Ми. «Это обстоятельство, — писал он, имея в виду отмеченный результат, — впервые указало мне на необходимость существования тесной связи между общей теорией относительности Эйнштейна и электродинамикой Ми и дало мне доказательство справедливости развитой здесь теории» [там же].

Представив далее лагранж-эйлеровские уравнения, соответствующие уравнениям электродинамики, в сокращенной форме

$$[V\bar{g}\mathcal{L}]_h = 0 \quad (3)$$

и используя несложные вариационные выкладки, опирающиеся на два формально-математических утверждения (теоремы II и III)⁴, Гильберт получает четыре тождественных соотношения между $[V\bar{g}\mathcal{L}]_h$ и их производными

$$\sum_m \left\{ M_{mv} [V\bar{g}\mathcal{L}]_m + q_v \frac{\partial}{\partial w_m} [V\bar{g}\mathcal{L}]_m \right\} = 0, \quad (4)$$

гарантированные теоремой I Гильберта (заметим, что толкование полученных тождеств как уравнений электродинамики существенно опирается на уравнения гравитационного поля). «Это есть точное математическое выражение, — писал он в конце вывода указанных тождеств, — высказанного выше утверждения о характере электродинамики как следствия тяготения» [79, с. 597—598].

В качестве простейшего «материального» лагранжиана Гильберт рассматривал модельный лагранжиан теории Ми в виде

$$\mathcal{L} = \alpha Q + \beta q^2, \quad (5)$$

где α и β — постоянные, а Q и q выражаются формулами

$$Q = \sum_{h,l,m,n} M_{mn} M_{lh} g^{mh} g^{nl}, \quad q = \sum_{k,l} q_k q_l g^{kl}, \quad (6)$$

причем $M_{nm} = q_{mn} - q_{nm}$.

Итак, в теории Гильберта «материя» предполагалась сводимой к электромагнитному полю совершенно таким же образом, как в теории Ми. Тем самым нелинейная электродинамика Ми, понимаемая как единая полевая теория материи, оказывалась существенной частью новой единой теории. Новизна же последней заключалась в том, как решалась проблема взаимоотношения гравитации и электромагнетизма. Кстати говоря, в теории Ми эта проблема оставалась фактически нерешенной: гравитация не включалась в эту теорию. В теории же Гильберта гравитация не просто была существенной, она приобретала характер наиболее фундаментального взаимодействия, уравнение которого, по мнению Гильберта, заключали в себе уравнения электромагнитного поля. Теория же гравитационного поля совпадала, в сущности, с ОТО. Но геометрия про-

⁴ Эти теоремы устанавливают наличие некоторых фундаментальных тождеств, имеющих место для общековариантных скаляров, которые являются или функциями $g^{\mu\nu}$, $g^{\mu\nu}_i$, $g^{\mu\nu}_{hl}$, q_a , q_{ab} , или функциями только $g^{\mu\nu}$ и их производных.

странства-времени не расширялась тем или иным образом, она оставалась римановой.

Таким образом, теория была дважды редукционистской: материя сводилась к электромагнитному полю, а уравнения электромагнитного поля выводились из уравнений гравитационного поля.

Способ сведения электромагнетизма к гравитации, использованный в теории Гильберта, был весьма своеобразным и не имел аналогов в прошлом. Сведение к механике означало либо построение механических моделей, либо сведение к уравнениям классической механики, при этом все основные величины получали механическое толкование. Сведение к электродинамике, включение теории в рамки ЭПП подразумевали возможность получения основных уравнений этой теории из полевых уравнений Максвелла, стандартных или обобщенных. При этом основные элементарные объекты теории, например частицы, обладающие массой покоя, как и само понятие механической массы, предполагалось получить как некоторые решения полевых уравнений или свойства этих решений.

Сведение электромагнетизма к гравитации в теории Гильберта не обладало многими из указанных черт. Главным отличием было, во-первых, постулирование с самого начала основных электродинамических величин q , несводимых к гравитации, например к гравитационным потенциалам. Далее, вторая теорема Нетер, в частности «теорема I» Гильберта, не указывала, какие именно четыре уравнения следует рассматривать как производные, а какие десять — основными. Например, в качестве основных можно было принять шесть гравитационных уравнений и четыре электродинамических. Наконец, сам способ установления зависимости уравнений электромагнетизма от уравнений гравитации был крайне формальным. Вероятно, физически его можно было попытаться истолковать как определенное следствие принципа общей относительности, в какой-то мере подобное тому, как переход от рассмотрения электростатических явлений в некоторой (покоящейся) системе отсчета к использованию класса инерциальных систем приводит к необходимости введения магнитного поля. Правда, гравитации можно было приписать более фундаментальный статус, поскольку именно она отождествлялась с геометрией пространства-времени, а электродинамические потенциалы q , не имея прямого отношения к геометрии.

Трактовка электромагнетизма как следствия тяготения, принятая в теории Гильберта (т. е. основанная на второй теореме Нетер), опирается на тот факт, что число измерений пространства-времени совпадает с числом компонент электромагнитного потенциала и соответственно с числом уравнений Максвелла, получаемых посредством варьирования из электродинамического действия. Ведь число функций, определяющих группу общей ковариантности, равно размерности пространства-времени, а как раз это число определяет количество производных уравнений в соответствии со второй теоремой Нетер.

В сущности, Гильберт очень четко впервые использовал хорошо известное теперь свойство ОТО, действительно связанное со второй

теоремой Нетер (хотя это и не всегда оговаривается), заключающееся в том, что благодаря требованию общей ковариантности «уравнения гравитационного поля содержат четыре условия, которым должны удовлетворять материальные процессы». «Эти условия,— писал далее Эйнштейн (в статье, законченной в марте 1916 г.),— и представляют собой уравнения материального процесса, если последний может быть описан четырьмя независимыми друг от друга дифференциальными уравнениями» [76, с. 492—493]. В этом месте Эйнштейн дает ссылку на гильбертовские «Основания физики», в которых в качестве этих дифференциальных уравнений были использованы максвелловские уравнения электродинамики, точнее, их обобщения, характерные для теории Ми.

Вслед за Эйнштейном в литературе по ОТО постепенно утвердилась именно такая точка зрения на четыре тождественных соотношения, вытекающих из второй теоремы Нетер. Поскольку они присутствовали в любой общековариантной теории при наличии как электромагнитного поля, так и произвольной материи, эти тождества в силу уравнений гравитации Эйнштейна следовало рассматривать как четыре условия на тензор энергии-импульса материи, интерпретируемые как обобщение дифференциального закона сохранения энергии-импульса материи в присутствии гравитационного поля. Точно так же интерпретировал тождества, связанные со второй теоремой Нетер, Паули в своей классической статье-монографии по теории относительности [63, с. 225—226]. В настоящее время эти тождества чаще всего интерпретируют геометрически, как тождества Бьянки (точнее, упрощенные тождества Бьянки) [83, с. 334].

Теория Гильберта как будто явно не касалась вопросов, связанных со строением атома и квантами. Но Гильберт надеялся на то, что дальнейшая разработка теории ввиду ее фундаментальности (не случайно эту свою работу он назвал «Основания физики») в конечном счете приведет к объяснению и электрона, и квантовых особенностей поведения излучения и микрочастиц. «...Как я убежден,— писал он в конце своей работы,— при помощи составленных здесь уравнений будут разъяснены сокровеннейшие, до сих пор скрытые явления внутри атома, и на их основе должно оказаться возможным вообще свести все физические постоянные к математическим постоянным» [79, с. 598].

Сравнительно недавно была найдена переписка между Эйнштейном и Гильбертом в ноябре 1915 г., предшествующая непосредственно обсуждаемому здесь докладу Гильберта и решающим работам Эйнштейна, в которых была завершена ОТО [84]. Не вникая в детали этой переписки, несомненно сыгравшей немалую роль как в процессе завершения ОТО, как и в разработке Гильбертом его единой теории поля, остановимся здесь только на трех вопросах, связанных с ней.

Во-первых, как явствует из этой переписки, в частности из письма Гильберта от 14 ноября, именно к этому дню, а возможно и чуть раньше, Гильберт уже закончил свою работу. В этом письме,

по-видимому, был дан набросок его теории, хотя основные формулы и выкладки отсутствовали.

Во-вторых, Эйнштейн после своего доклада в Берлинской академии наук, представленного 11 ноября, в котором он использовал идею «бесследовости» тензора энергии импульса (или, другими словами, идею электромагнитно-подобного строения материи), чтобы достичь общей ковариантности уравнений гравитационного поля, в письме от 12 ноября сообщает об этом Гильберту, а 14 ноября Гильберт сообщает ему, в свою очередь, о своей единой теории поля. Это дает некоторое основание предполагать, что упомянутая эйнштейновская работа (доложенная 11 ноября) могла оказаться для Гильберта некоторым, по крайней мере дополнительным, стимулом.

Накопец 18 ноября, в день представления Эйнштейном его третьей ноябрьской академической работы о перигелии Меркурия, после получения им накануне копии текста гильбертовского доклада, содержавшего единую теорию Гильберта, Эйнштейн сообщает Гильберту о фактическом совпадении его гравитационных уравнений с гильбертовскими (при этом он, по-видимому, принимал во внимание «бесследовость» тензора энергии-импульса «материи» в теории Гильберта) и о своем успешном расчете движения перигелия Меркурия. Гильберт же в ответном письме от 19 ноября пишет, в частности, о том, что, если бы он умел считать так же быстро, как Эйнштейн, он объяснил бы, почему электрон в атоме водорода не излучает.

Таким образом, Гильберт в отличие от Эйнштейна, по крайней мере до перехода автора ОТО к началу 20-х годов на позиции программы ЕГТП, прочно встал на эти позиции, хотя его полевая программа, несмотря на фундаментальное значение для нее ОТО, в определенном смысле была редукционистской, поскольку электромагнитное поле в теории Гильберта не имело равноправного с гравитационным полем геометрического статуса.

Как же была встречена теория Гильберта научной общественностью? Ведь речь, в сущности, шла о глобальном теоретическом замысле. Г. Вейль, например, вспоминал впоследствии, что «в то время в кружке Гильберта (в который входили Ф. Клейн, Р. Курант, А. Ланде, П. Дебай, М. Борн, П. Эвальд и др.— В. В.) царил очень радужное настроение; мечта о некотором универсальном законе, управляющем как космосом в целом, так и всеми атомными ядрами, казалась почти воплощенной» [85, с. 359]. Вероятно, теория Гильберта произвела большое впечатление и на самого Вейля, который неоднократно подчеркивал, что «работа Гильберта может рассматриваться как предвестник единой теории гравитации и электромагнетизма» [там же].

Эйнштейн ознакомился с теорией Гильберта за несколько дней до ее обнародования. Очевидно,— и об этом можно судить по некоторым его высказываниям из последней, ноябрьской публикации 1915 г. и из мартовской статьи «Основы общей теории относительности» — он не принял теорию Гильберта прежде всего в той части,

которая относилась к электродинамике, ее обобщению в духе Ми в способу ее включения в теорию тяготения. В письме к Зоммерфельду от 9 декабря 1915 г. он выразил сомнение в плодотворности применения ОТО к проблемам электрона и строения атома, а также к теории Гильберта в той ее части, где она «тесно примыкает к теории Ми» [68, с. 194]. В письме к Эренфесту от 24 мая 1916 г. Эйнштейн так охарактеризовал теорию Гильберта: «Гильбертовское изложение мне не нравится. Оно излишне специально в части, касающейся материи (имеется в виду теория Ми.— В. В.), излишне усложнено и не вполне корректно в построении (плутни сверхчеловека для завуалирования метода)» [57, с. 136]. «Излишнюю усложненность», по-видимому, Эйнштейн видел в гильбертовских „теоремах I и II“, лишенных, как ему казалось, физического содержания и выглядевших весьма сложно, а некорректность построения, возможно, усматривал в необоснованности выделения именно четырех электродинамических уравнений в качестве нетеровских тождеств.

Приведем весьма яркое высказывание Эйнштейна о теории Гильберта, адресованное Г. Вейлю (в письме от 23 ноября 1916 г.): «Гильбертовский подход к материи кажется мне ребяческим, я имею в виду ребенка, не знающего коварства окружающего мира... Во всяком случае невозможно согласиться с тем, чтобы серьезные соображения, вытекающие из принципа относительности, связывались со столь рискованными и необоснованными гипотезами относительно строения электрона или материи. Я охотно признаю, что поиски подходящей гипотезы или функции Гамильтона составляют сегодня одну из важнейших задач теории. Но „аксиоматический метод“ мало что может здесь дать» [57, с. 136]. Эйнштейн снова подчеркивает главный пункт теории Гильберта, вызывавший у него возражение, — «рискованные и необоснованные гипотезы относительно строения электрона или материи», заимствованные из теории Ми. Эйнштейну, для которого физические соображения имели первостепенное значение даже при создании столь абстрактной и математически изощренной теории, каковой была ОТО, казались «ребяческими», самонадеянными попытки математика чисто аксиоматическим путем разрешить основные трудности физики, построить единую полевою теорию. Вместе с тем, подчеркивая важность поисков «подходящей функции... Гамильтона», Эйнштейн, как можно думать, имел в виду построение некоторой единой полевою теории гравитации, электромагнетизма и «материи». При этом, по-видимому, поиски подходящего лагранжиана для материальной части физической реальности (исключающей гравитацию) он считал задачей, вполне заслуживающей внимания. Таким образом, можно предполагать, что к концу 1916 г. он не считал абсурдной мысль о некоторой единой теории поля, включающей описание «материи». Но путь Ми и Гильберта он расценивал как бесперспективный. Для геометризации же электромагнитного поля он, вероятно, также не видел физических оснований.

Дневниковые записи швейцарского писателя Р. Я. Гумма, который в мае 1917 г. приезжал в Берлин и встречался с Эйнштейном,

в какой-то мере противоречат сделанному предположению. Гумм сравнительно подробно рассказывает о своих беседах с Эйнштейном, в которых обсуждалось, в частности, и отношение основоположника теории относительности к теории Гильберта. Швейцарский писатель в те годы слушал лекции по физике и математике в Геттингенском университете и, по-видимому, вполне ориентировался в обсуждаемых вопросах. Эйнштейн рассказывал о своем отношении к математике, о том предпочтении, которое он отдает наглядным, физическим представлениям. «Эйнштейн очень осторожен и — физик до мозга костей; он не спешил броситься в атаку на всеобщее, как мы в Геттингене, — писал Гумм, в ту пору, по всей вероятности, вполне разделявший „радушное настроение“, царившее в гильбертовском окружении в связи с теорией Гильберта. — ...Я высказался в том смысле, что он мог бы использовать квантовую теорию, чтобы модифицировать теорию гравитации, в отличие от Гильберта, которому хотелось вывести квантовую теорию из теории гравитации». И дальше Гумм рассказывает о подробной оценке Эйнштейном теории Гильберта: «...из этого ничего не получится (т. е. нельзя вывести квантовую теорию из теории гравитации. — В. В.), несмотря на то что теория гравитации более обща. Идея относительности не может дать ничего большего, чем теорию гравитации. Мысль о том, чтобы построить силой своей фантазии картину мира, можно было бы назвать прекрасной; она могла бы дать известные результаты. Но история учит, что подобные попытки всегда заканчиваются неудачей... Разнообразие тензоров (или соответствующих лагранжианов. — В. В.) так велико, что невозможно сказать, какие из них следует выбрать для обоснования электродинамики (здесь, по-видимому, речь идет об электродинамической части теории Гильберта. — В. В.). К тому же экспериментальные данные слишком скудны, они еще не дают надежной путеводной нити» [57, с. 126—127].

Таким образом, основоположник ОТО и геометрической концепции гравитации, сам приверженец «теоретико-полевого идеала единства физики», был настроен весьма негативно по отношению к теории Гильберта. Это было вызвано не только тем, что теория включала в себя нелинейную электродинамику Ми, отвергнутую большинством физиков, и в том числе Эйнштейном, но и значительной оторванностью гильбертовской единой теории от коренных физических проблем, ее математической абстрактностью (теория строилась аксиоматически, основная идея синтеза гравитации и электромагнетизма носила формально-математический характер и т. д.).

Тем не менее гильбертовские «Основания физики» отличаются богатством содержания и являются одной из наиболее цитируемых классических работ по ОТО. Напомним, что в ней были впервые получены правильные по форме общековариантные уравнения гравитационного поля (при этом, правда, в уравнениях фигурировал тензор энергии-импульса материи, соответствующий нелинейной электродинамике Ми), впервые с большой глубиной были рассмотрены проблемы закона сохранения энергии-импульса в общекова-

риантной теории поля, сформулирована вторая теорема Нетер для случая группы общей ковариантности, установлена связь тензора энергии-импульса материи с варьированием гравитационных потенциалов. Гильбертовский вывод гравитационных уравнений из вариационного принципа со скалярной кривизной в качестве гравитационной части лагранжиана стал классическим. Итак, основной вклад геттингенского математика в физику в данном случае оказался связанным с собственно ОТО, хотя он был получен в рамках единой теории. Отметим здесь одно парадоксальное обстоятельство: единая теория Гильберта в отличие от всех последующих единых геометризованных теорий поля была, в сущности, теорией более узкой, чем сама ОТО, потому что от ОТО она отличалась лишь специализацией тензора энергии-импульса материи. При отсутствии же материи обе теории совпадали.

Гильбертовский вклад в ОТО достаточно полно отражен в цитированных выше фундаментальных книгах Паули и Вейля по ОТО, написанных в 1920 и 1918 гг. Перечисляя многие результаты Гильберта, полученные в рамках его единой теории, Паули нигде даже не упомянул об этой теории, из чего можно заключить, что он не принимал всерьез гильбертовский способ объединения гравитации и электромагнетизма. Во-первых, он, как и Эйнштейн, считал теорию Ми физически некорректной, а во-вторых, нетеровские тождества ввиду их универсального характера предпочитал истолковывать как выражение для дифференциального закона сохранения энергии-импульса. Примерно такова же оценка Вейля в классической статье по единой теории (1918) [86] и в его книге «Пространство, время, материя» [62]. В статье 1918 г., содержащей первое изложение единой теории поля Вейля, имеется ссылка на гильбертовские «Основания физики», но только в связи с законом сохранения энергии-импульса, в частности с его соответствием бесконечно малым преобразованиям координат. Впрочем, как мы уже отмечали, впоследствии Вейль называл единую теорию Гильберта «предвестником единой теории гравитации и электромагнетизма», имея в виду и свою единую теорию, и последующие единые геометризованные теории поля. Вероятно, замысел Гильберта был близок Вейлю, но конкретный гильбертовский вариант реализации этого замысла (опирающийся на вторую теорему Нетер) не казался ему перспективным.

В 1916—1917 гг. Гильберт опубликовал еще две работы по ОТО: второе сообщение «Основания физики» [87] и фрагмент из переписки с Ф. Клейном по проблеме законов сохранения в ОТО [88]. Вопросы единой теории поля в этих работах не затрагиваются. Основное внимание в них концентрируется на таких принципиальных проблемах ОТО, как проблемы причинности, сохранения энергии-импульса.

Постепенно интересы Гильберта все больше смещались в сторону исследования оснований математики. После появления в 1918 г. единой, на этот раз действительно геометризованной в принятом смысле слова, теории Вейля, одного из самых выдающихся учеников Гильберта, он, казалось, мог бы вернуться к «основаниям фи-

зики». Но, как писал Борн Эйнштейну в начале 1923 г., «Гильберт следит за этим (т. е. за работами по гравитации и единым теориям поля.— В. В) вполглаза, поскольку он с головой ушел в свое новое обоснование логики и математики» [89, с. 42]. Несмотря на это, Гильберт несколько неожиданным образом в 1924 г. перепечатал с небольшими изменениями обе части «Оснований физики» в одном из наиболее известных математических журналов — в «Mathematische Annalen» [90]. Можно предположить, таким образом, что Гильберт хотел напомнить научной общественности, что столь популярное в начале 20-х годов направление, связанное с разработкой единых теорий гравитации и электромагнетизма и основанное на ОТО, восходит к его работе 1915 г. [91]. Это позволяет заключить, что и в это время он, по-видимому, продолжал считать свой способ объединения вполне корректным и во многих пунктах эквивалентным новейшим вариантам Вейля, Эйнштейна и др. «Со времени публикации моего первого сообщения появились важные работы по этому вопросу,— писал он, имея в виду работы по единым геометризованным теориям поля,— я упомяну лишь блестящие и глубокие исследования Вейля и богатые новыми идеями работы Эйнштейна. Однако как Вейль приходит в конечном счете к установленным мною уравнениям, так и Эйнштейн, который, хотя и повторяет о различии исходных положений наших теорий, в своих последних публикациях возвращается непосредственно к уравнениям моей теории» [90, с. 259].

Гильберт полагал, что развитие единых теорий поля происходит в русле, указанном им еще в 1915 г.: «Я твердо верю, что теория, развиваемая мною здесь, содержит твердую сердцевину (einen bleibenden Kern) и указывает рамки, внутри которых достаточно места для построения в будущем физики, удовлетворяющей теоретико-полевого „идеалу единства“» [там же].

Это не означает, что Гильберт недооценивал новейшие исследования Вейля и Эйнштейна. В 1926 г. конкурсная комиссия по присуждению премии Н. И. Лобачевского, в которую входили казанские ученые Н. Н. Парфентьев, П. А. Широков и др., обратилась к Гильберту с просьбой дать отзыв о работах Г. Вейля по дифференциальной геометрии, теории группы и общей теории относительности, прежде всего о его книге «Пространство, время, материя». Лидер геттингенских математиков дал высокую оценку трудам своего ученика, отметив, впрочем, и здесь связь его единой теории поля, которой в своем отзыве он придавал особое значение, со своей теорией 1915 г.: «Книга Вейля „Пространство, время, материя“ (5-е изд.) является значительным, выдающимся исследованием по эйнштейновской теории гравитации, а именно исследования Вейля непосредственно примыкают к тому направлению эйнштейновской теории гравитации, которое было развито мной на пути объединения теории тяготения Эйнштейна с электродинамикой Ми» [92, с. 66]. Вполне справедливо отметив далее, что Вейль, как и он в 1915 г., использовал в качестве основных величин состояния десять гравитационных и четыре электродинамических потенциалов,—

и уже это одно во многом определило структуру всех будущих единых геометризованных теорий гравитации и электромагнетизма — Гильберт вместе с тем подчеркнул и фундаментальное отличие теории Вейля, именно существенно геометрический характер электромагнетизма. «Однако Вейлю, — писал он, — удалось всем 14 величинам состояния $g_{\mu\nu}$, q , придать естественный геометрический смысл и тем самым эту систему четырнадцати потенциалов слить в одно органическое целое» [92, с. 66].

Гильбертовский подход, его единую теорию поля Эйнштейн всегда связывал, с одной стороны, с теорией Ми, а с другой — с теорией Вейля. Так, в одной из первых своих работ по единым теориям поля, опубликованной в 1919 г., Эйнштейн писал: «Как яи стройна с формальной точки зрения эта теория, развитая Ми, Гильбертом и Вейлем, все же физические результаты не могут до сих пор нас удовлетворить» [93, с. 664].

ВЫВОДЫ

ОТО, таким образом, явила собой первый пример геометризованной теории поля, именно теории гравитационного поля. Она возникла в результате развития релятивистской программы, которая сама претерпела существенные изменения (от РП, основанной на СТО, к несколько неопределенному образу расширенной релятивистской программы, связанному с осознанием необходимости распространения принципа относительности на произвольно ускоренные системы отсчета, и затем к РРП, опирающейся на ОТО). Эйнштейн полагал, что ОТО является не более чем релятивистской теорией тяготения, и считал, по крайней мере в 1915—1918 гг., что она не может дать ничего нового для решения проблемы строения материи. Наоборот, он думал, что при рассмотрении гравитационных явлений в микромире ОТО придется модифицировать с помощью идей квантовой теории.

Все-таки сама идея геометризации физических взаимодействий, содержащаяся в ОТО, казалось, открывала перед физикой совершенно новые перспективы реализации «теоретико-полевого идеала единства» физического знания. Однако сначала была сделана попытка объединения гравитации и электромагнетизма, опиравшаяся не столько на саму идею геометризации, сколько на один из основных принципов ОТО — принцип общей ковариантности и на идею электромагнитно-подобного строения материи, получившую разработку в рамках электромагнитно-полевой программы, в частности в теории Ми. Это было сделано лидером геттингенской математической школы Д. Гильбертом, увидевшим в объединении ОТО и теории Ми возможность построения единой полевой теории физических явлений и в результате, аксиоматической схемы физики в целом. Теория Гильберта была, таким образом, первой единой теорией поля, объединившей в себе гравитацию, электромагнетизм и материю на основе ОТО.

Но теория Гильберта включала в себя как существенный элемент физически неудовлетворительную теорию Ми. Кроме того, сам способ объединения гравитации и электромагнетизма, точнее, сведение уравнений электромагнитного поля к уравнениям гравитации был недостаточно обоснованным, неоднозначным и весьма формальным. К проблеме материи теория фактически не подошла, во всяком случае здесь она не давала ничего нового по сравнению с теорией Ми. За пределами Геттингена, где с большими надеждами смотрели на нее, теория, по существу, не получила признания. И тем не менее она содержала ряд важных элементов, присущих будущим единым геометризованным теориям поля, и справедливо была оценена впоследствии Г. Вейлем, автором первой подлинно единой геометризованной теории поля, «как предвестник единой теории гравитации и электромагнетизма». При этом не менее существенным было и то, что Вейль был учеником Гильберта, который сильно повлиял на все его творчество.

Глава третья

Теория Вейля — первая подлинно геометризованная единая теория поля

Хотя теория Гильберта была и единой, и в известной мере геометризованной, а также имела ясно сформулированную программу сведения частиц к полю, она обладала двумя принципиальными отличиями от главного направления в развитии программы ЕГТП. Во-первых, она, подобно единым электромагнитным теориям поля, носила редуccionистский характер. Уравнения электродинамики, совпадающие с уравнениями теории Ми, могли рассматриваться как следствие уравнений гравитационного поля, а электрон и другие частицы сводились к электромагнитному полю (в соответствии с теорией Ми).

Во-вторых, теория Гильберта опиралась на электродинамику Ми, страдавшую существенными изъянами, о чем говорилось выше. В результате объединение гравитации и электромагнетизма не было связано с расширением римановой геометрии и истолкованием электромагнитного поля как геометрического феномена. Первой единой теорией поля такого рода стала теория Вейля, послужившая моделью всей программы ЕГТП (1918).

Сразу же отметим несколько важных обстоятельств, связанных, по-видимому, с созданием теории Вейля. Вейль был математиком, учеником Гильберта и воспитанником Геттингена, где он учился и преподавал почти 10 лет (с 1904 по 1913 г., с годичным перерывом, во время которого он был в Мюнхене). С 1913 до 1930 г. он преподавал в Цюрихе. Он застаёт здесь Эйнштейна, который в это время вместе с М. Гроссманом напряженно работал над созданием ОТО (в 1914 г. Эйнштейн переехал в Берлин). Известен также глубокий и рано проявившийся интерес Вейля к философии, и в частности к философии математики и естествознания. В вопросе об основаниях математики Вейль стоял на позициях интуиционизма, выдвинутого Л. Брауэром и противостоящего гильбертовскому формализму. Мы увидим, что эти особенности биографии и творческого пути Вейля сыграли роль определенных предпосылок для его работы над единой теорией поля, которая, таким образом, не была случайным эпизодом в его деятельности.

Теория Вейля до сих пор поражает глубиной замысла, математической простотой и элегантноcтью его реализации. В ней особенно ярко проявляются основные черты программы ЕГТП. Поэтому мы сравнительно подробно рассмотрим основы этой теории, как они были сформулированы Вейлем в его первой работе (1918). Вместе с тем этот первый вариант теории, как сразу же заметил Эйнштейн, незадолго до этого критиковавший единые теории Ми и

Гильберта, наталкивался на значительные трудности физического характера. Вейль пытался усовершенствовать концептуальную структуру своей теории в ряде последующих работ (вплоть до 1923 г.). Но Эйнштейн и Паули, отдавая должное глубине и красоте вейлевского замысла, продолжали считать основания теории физически не оправданными, а последовательную реализацию этого замысла (построение уравнений поля и их решение) практически неосуществимой.

Несмотря на это, теория Вейля оказала решающее влияние на последующие единые геометризованные теории поля, возникшие в начале 20-х годов (прежде всего на теории А. Эддингтона, 1921, Т. Калуцы, 1921, А. Эйнштейна, 1923, и др.). Э. Шредингер в 1922 г. пытался более тесно связать теорию Вейля с квантовой теорией, и, как мы увидим, есть веские основания предполагать, что эта попытка сыграла некоторую роль в формировании идей волновой механики.

НАУЧНО-КОММУНИКАТИВНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ

После окончания гимназии в Альтоне в 1903 г. Вейль поступает в Геттингенский университет, который был избран им потому, что один из наиболее известных профессоров математики в Геттингене — Д. Гильберт был кузеном директора окончной Вейлем гимназии. Он начал казаться бы с вводного курса о квадратуре круга и понятии числа, объявленного Гильбертом и оказавшегося в действительности очень сложным. «Большая его часть была выше моего понимания, — вспоминал впоследствии Вейль. — Но двери нового мира уже распахнулись передо мною, и я недолго сидел у ног Гильберта, пока в моем молодом сердце не созрело окончательное решение всеми средствами стремиться прочесть и изучить все, что написал этот человек» [85, с. 321]. Чем привлекал его Гильберт? Конечно, это был выдающийся математик, прославивший свое имя работами по алгебраической теории инвариантов, алгебраическим числовым полям, основаниям геометрии. Но Вейля привлекали в нем и чисто человеческие качества: «...оптимизм... его духовная страсть, непоколебимая вера в высшую ценность науки, твердая уверенность в способности разума находить простые и ясные ответы на простые и ясные вопросы». Первые свои студенческие каникулы он провел, изучая знаменитую работу Гильберта по алгебраическим числовым полям, о которой он писал впоследствии: «На самом деле... обзор представляет собой жемчужину математической литературы. Даже сегодня, спустя почти пятьдесят лет, изучение этой книги необходимо для любого, кто пожелает стать специалистом в теории алгебраических чисел». Летние месяцы, отданные изучению гильбертовской работы, по признанию Вейля, были самыми счастливыми в его жизни.

Столь же сильное потрясение испытал Вейль после изучения «Оснований геометрии» Гильберта [94]. Его «гимназическое канти-

анство» (см. ниже) было повергнуто в прах: «Здесь (в Геттингене.— В. В.) преподавал Давид Гильберт, незадолго перед этим (т. е. перед поступлением Вейля в Геттингенский университет.— В. В.) опубликовавший свой эпохальный труд „Основания геометрии“. От него повеяло на меня духом современной аксиоматики... Для исследования логической взаимосвязи аксиом к делу привлекается так называемая неевклидова геометрия, существовавшая к тому времени уже без малого столетие, но, кроме того, конструируется главным образом на арифметической базе еще множество других необычных геометрий. Жесткая связь кантовского учения с евклидовой геометрией представилась теперь чем-то наивным. Под этим сокрушительным ударом рухнуло в моих глазах здание кантовской философии, которой я был предан всем сердцем» [95, с. 633]¹.

Эти сравнительно ранние события в интеллектуальной жизни молодого Вейля во многом определили его понимание математического творчества, интересы, характерное для него сочетание математических исследований с размышлениями о философских корнях математических понятий. Гильберт стал для него образцом математика и настоящим учителем. В 1907 г. Вейль закончил университет и в этом же году защитил под руководством Гильберта диссертацию по сингулярным интегральным уравнениям. В 1910 г. он стал приват-доцентом и преподавал в Геттингене до 1913 г.

Диссертационная тема и первые научные работы были непосредственно связаны с гильбертовской теорией интегральных уравнений. Как раз с 1902 по 1912 г. (по периодизации гильбертовского творчества, данной впоследствии Вейлем) определяющей тематикой в деятельности Гильберта были интегральные уравнения [85, с. 308]. На этом пути, как известно, возникло знаменитое «гильбертово пространство» последовательностей с суммируемым квадратом, которое, как показали вскоре Э. Фишер и Ф. Рисс, оказалось изоморфным пространству функций с интегрируемым по Лебегу квадратом. Формализм бесконечномерного гильбертова пространства нашел эффективные применения в спектральной теории интегральных уравнений, а затем и дифференциальных уравнений. «На территории анализа была открыта золотая жила, которая сравнительно легко поддавалась разработке и которая не скоро должна была истощиться,— писал Вейль об этих исследованиях.— ...Вокруг Гильберта организовалась большая международная школа математиков, а интегральные уравнения вошли в моду не только в Германии, но и во Франции... Общим результатом всей этой деятельности стало значительное изменение во взглядах на анализ» [85, с. 355]. Через полтора десятилетия «произошло удивительное событие: спектральная теория в гильбертовом пространстве оказалась подходящим математическим аппаратом для новой квантовой физики, начало которой было положено Гейзенбергом и Шредингером в 1925 г.» [85, с. 355].

Работы Вейля, написанные в первый геттингенский период

¹ Фрагменты из этого доклада Вейля здесь и далее цит. в пер. А. В. Ахутина.

(1908—1913), почти целиком относились к области этой новой ветви анализа. Заметим, что его исследования по спектральной теории обыкновенных дифференциальных уравнений 1909—1910 гг., прежде всего исследование сингулярных случаев, были впоследствии использованы Шредингером в его классических статьях по волновой механике.

По упомянутой выше вейлевской периодизации научной деятельности Гильберта период интегральных уравнений (1902—1912) перекрывается с периодом его физических исследований (1910—1922) [85, с. 309]. Конечно, это увлечение Гильберта физикой не прошло бесследно и для Вейля. Как и для Гильберта, путь Вейля в физику был связан с приложениями интегральных уравнений и спектральной теории к физическим задачам. Асимптотике собственных частот колеблющихся континуумов (мембран, электромагнитных резонаторов и т. д.) был посвящен ряд работ Вейля 1911—1915 гг.

Хотя воздействие Гильберта на Вейля было определяющим, не следует сбрасывать со счетов и влияние другого лидера геттингенской математики — Ф. Клейна. Выдающиеся геометрические исследования Клейна, знаменитые лекции по теории римановых поверхностей, установка на постоянный контакт математики и физики были, несомненно, восприняты Вейлем. Лекции по теории римановых поверхностей в 1911—1912 гг. составили содержание его первой книги «Идея римановой поверхности» (1913), написанной скорее под влиянием Клейна, чем Гильберта. Вейлю были близки также клейновские идеи о роли интуиции в математике. В одной из первых своих работ общего характера он подчеркивал, что новые идеи в математике возникают не столько аксиоматическим путем, сколько на основе глубоких, но интуитивных соображений: «Несмотря на это, действительную ценность и значение нынешней системы понятий логизированной математики я вижу в том, что ее понятия, без ущерба для истинности ее утверждений, остаются наглядными, открытыми для созерцания (*anschauungsmäßig*). Я полагаю, что человеческий разум никаким другим путем не способен подняться от данной реальности к математическим понятиям. Применимость нашей науки является тогда лишь симптомом ее укорененности в «почве», а не самостоятельным ее признаком. И математика, это гордое дерево с обширной кроной, ветвящейся в эфире, силу свою тысячью корнями высасывает из почвы реальных созерцаний и представлений (*aus dem Erdboden wirklichen Anschauungen und Vorstellungen*). Было бы роковой ошибкой обрезать эти корни ножами ограниченного утилитаризма или лишить это дерево почвы, на которой оно произросло» [69, с. 374].

Вейлевские лекции по теории римановых поверхностей были написаны в «геометрическом стиле» Клейна и, кстати говоря, означали некоторый поворот Вейля к геометрии.

Дух Геттингена, наиболее ярко воплотившийся в трудах Клейна и Гильберта, вошел в плоть и кровь исследований Вейля, хотя он, покинув Геттинген в 1913 г., в течение длительного времени работал в Цюрихе (до 1930 г., когда он вернулся в Геттинген, чтобы

занять кафедру Гильберта после ухода последнего в отставку). Именно к цюрихскому периоду относится «золотое десятилетие» в творчестве Вейля (1917—1927), связанное с его выдающимися исследованиями по дифференциальной геометрии, проблеме континуума и основаниям математики, общей теории относительности и единой геометризованной теории электромагнитного и гравитационного полей, теоретико-групповому анализу проблемы пространства, теории представления непрерывных групп и квантовой механике.

В 1913 г. произошли два важных события в жизни и творческой биографии Вейля. Он женился на студентке, ученице знаменитого геттингенского философа Э. Гуссерля Елене Джозеф, и затем (осенью 1913 г.) переехал в Цюрих, став профессором и заняв кафедру геометрии в знаменитом Цюрихском политехникуме, где преподавали ранее Минковский и Гурвиц, где учился автор теории относительности, который в это время также преподавал в политехникуме и напряженно работал вместе с М. Гроссманом над релятивистской теорией тяготения. О влиянии первого события на духовную эволюцию Вейля будет сказано ниже. А непосредственный контакт с Эйнштейном и изучение первого варианта общей теории относительности, теории Эйнштейна — Гроссмана, вероятно, произвели на него неизгладимое впечатление. Весной 1914 г. Эйнштейн переехал в Берлин. Вскоре после начала первой мировой войны Вейля призвали на военную службу. В 1915 г. он вернулся в политехникум и начал заниматься общей теорией относительности, в частности читать курс по теории Эйнштейна (с 1916 г.). В этом же году начинается переписка с Эйнштейном, отдельные фрагменты которой цитируются в книге Зелига [57]. Первой опубликованной работой Вейля в этой области стала его статья «К теории тяготения», поступившая в редакцию «Annalen der Physik» в августе 1917 г. [96].

По-видимому, интерес Вейля к общей теории относительности был вызван не только его контактами с Эйнштейном. Начиная с лета 1914 г. Гильберт проявлял повышенный интерес к фундаментальным проблемам физики, а после встречи с Эйнштейном в июле 1915 г. и сам предпринял попытку объединить весьма импонировавшую ему теорию материи Ми с идеями общей теории относительности. Эта попытка, как мы знаем, увенчалась в ноябре 1915 г. открытием общековариантных уравнений гравитации (практически одновременно с Эйнштейном) и созданием первой единой теории электромагнитного и гравитационного полей, основанной на общей теории относительности (см. гл. 2 настоящей работы). В 1916—1918 гг. в Геттингене вслед за Гильбертом многие математики и физики с энтузиазмом восприняли идеи теории Эйнштейна и включились в разработку новой теории. Помимо корифеев Геттингена Гильберта и Клейна, ряд важных работ выполнили также Э. Нетер, Г. Герглотц и др. [78]. Интерес математика Вейля к общей теории относительности не был, таким образом, аномалией. В свете сказанного было бы странным, если бы он прошел мимо этой теории.

Несколько слов о статье «К теории тяготения». Вслед за Гильбертом, Лоренцем и Эйнштейном Вейль в более простой, прозрачной

форме устанавливает единый вариационный принцип, из которого получает полевые уравнения гравитации и электродинамики, а также уравнения движения материи. Затем весьма глубоко обсуждает проблему сохранения энергии-импульса в общей теории относительности. Он далее рассматривает ряд конкретных точных решений уравнений гравитации, вводя при этом в рассмотрение декартовы координаты вместо полярных, в частности вслед за Рейснером рассчитывает поле заряженного шара, а также статические поля заряженной и незаряженной материи, обладающие аксиальной симметрией. Многие из этих результатов стали классическими и многократно цитировались в последующих работах по гравитации [63].

Вейль, вероятно, очень интересовался и единой теорией Гильберта. Еще в 1916 г. он, по-видимому, писал Эйнштейну о своем восхищении общей теорией относительности и спрашивал его о теории Гильберта. Об этом можно судить по письму Эйнштейна к Вейлю от 23 ноября 1916 г., в котором он выражает удовлетворение по поводу высокой оценки Вейлем ОТО: «Меня очень радует, что Вы восприняли общую теорию относительности столь тепло и радушно. Хотя у нее пока немало противников, меня утешает то обстоятельство, что средняя сила ума всех сторонников теории намного превосходит силу ума ее противников. Это своего рода объективное свидетельство естественности и разумности теории...» [57, с. 136]. Вслед за этим Эйнштейн критикует Гильберта, в частности использование им теории Ми и «аксиоматического метода» (эта часть письма цитировалась выше). Вейль, очевидно, разделял точку зрения Эйнштейна на единую теорию Гильберта. Во всяком случае, в указанной выше статье 1917 г. он не следует гильбертовской идее рассматривать электромагнетизм как следствие уравнений гравитации. Скорее, согласно Вейлю, следствием общей ковариантности является закон сохранения энергии-импульса материи и его тождественный характер. Но, будучи учеником Гильберта, а также подлинным геттингенцем, он тем не менее настойчиво размышлял о возможности построения единой полевой теории на геометрической основе. Как справедливо отмечал Л. Р. Пайнсон, геттингенской традиции «математической физики», восходящей к Гауссу, Риману и Веберу, всегда было присуще стремление к построению математически изощренных теорий, нацеленных на всеобщий охват физических явлений [97, 98]. К такому синтезу физики стремились и Риман, и в известной мере Вебер; идеи электромагнитно-полевого объединения физики были близки Минковскому, Абрагаму, Вихерту и др. Геометризация тяготения подсказывала новую возможность реализации полевого синтеза физики.

ЗНАЧЕНИЕ ФИЛОСОФСКИХ ИНТЕРЕСОВ ВЕЙЛЯ

Если без учета влияния Гильберта, Клейна, Эйнштейна и «геттингенского духа» в целом трудно понять, каким образом и почему математик Вейль стал заниматься общей теорией относительности и

затем выдвинул свою замечательную единую теорию поля, то вопрос о стимулирующей роли философских интересов ученого при этом более проблематичен. Тем не менее краткий анализ философской эволюции Вейля представляется нам полезным.

Вейль является автором множества работ по философии и методологии физики и математики, которые, впрочем, были написаны уже после создания им единой теории поля. Наибольшую известность получила его книга «Философия математики и естествознания», впервые опубликованная в 1927 г. [99]. Автор одного из лучших очерков жизни и творчества Вейля М. Ньюмен писал: «Через всю жизнь пропес Вейль неослабный интерес к философским проблемам, равно как и свое убеждение в том, что эти проблемы неотделимы от научных, в частности математических, проблем. Это наложило отпечаток на всю его работу [100, с. 240].

Труды Вейля по философии науки были в 1954 г. отмечены премией им. Арнольда Реймона, учрежденной Лозанским университетом. В связи с этим он выступил с докладом «Познание и осознание» («Erkenntnis und Besinnung»), который имел подзаголовок «Воспоминания о жизни» [95]. Вейль в этом выступлении рассказал о своей философской эволюции, о своих философских исканиях, которыми сопровождалась его научная деятельность.

Первым сильным впечатлением в этой области было знакомство с кантовским учением о пространстве и времени, «которое сразу же чрезвычайно увлекло меня: одним толчком я был разбужен от „догматической дремоты“, и мир был моим мальчишеским умом радикальнейшим образом поставлен под вопрос» [95, с. 632]. Вейль в это время был учеником предпоследнего класса гимназии. Тем самым философская сущность пространства и времени и глубокий кантовский анализ этих категорий были предметом юношеских размышлений будущего математика.

Поступив в университет, Вейль, как мы уже отмечали, испытал огромное влияние Гильберта, в частности его знаменитых «Оснований геометрии». Уяснение множественности и равноправия геометрий обнаружило уязвимость кантовской концепции пространства, которая, как ему представлялось, придавала евклидовой геометрии априорный характер. Трудно представить, чтобы совершенно мимо Вейля прошли кардинальные преобразования в учении о пространстве и времени в физике, связанные с именами Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна и геттингенца Минковского. Думается, что эти события также сыграли важную роль в отходе Вейля от Канта.

Разочарование в Канте не отвратило Вейля от философии. Конечно, изучение математики и первые самостоятельные научные исследования требовали значительных усилий, но живой интерес к философским, особенно теоретико-познавательным, проблемам не исчезал. В эти годы (1905—1913) Вейль увлекался сочинениями Маха и Пуанкаре, философскую установку которых он сам впоследствии квалифицировал как «конструктивный позитивизм» (в числе произведений, которые он высоко ценил в то время, Вейль называл впоследствии «Науку и гипотезу» Пуанкаре [101], «Историю мате-

риализма» Ланге [102] и др.). Ему, вероятно, импонировали ориентация этих мыслителей на анализ конкретных методологических проблем естествознания и математики, антидогматическая направленность их работ, глубокое понимание собственно научных аспектов обсуждаемых философских проблем.

Мы уже говорили, что 1913 год был поворотным в жизни Вейля (женитьба на Е. Джозеф, переезд из Геттингена в Цюрих, встреча с Эйнштейном). Он был своеобразным поворотным моментом и в философской эволюции Вейля. «Спустя немного времени я женился на студентке-философе, ученице Эдмунда Гуссерля, основателя феноменологии, который работал тогда в Геттингене,— вспоминал он через 40 лет после описываемых событий.— Таким-то образом Гуссерль и стал тем, кто вывел меня из позитивизма и привел к более свободному взгляду на мир» [95, с. 637]².

Возможно, что Вейль и до знакомства с Е. Джозеф посещал лекции Гуссерля, который пользовался некоторой популярностью среди геттингенских физиков и математиков. С 1901 по 1906 г. Гуссерль был экстраординарным, а с 1906 по 1916 г. — ординарным профессором философии. Из геттингенских физиков, находившихся под известным влиянием Гуссерля, назовем, например, В. Фойгта и Э. Вихерта [69].

Отход от позитивизма и интерес к Гуссерлю совпали в жизни Вейля с переездом в Цюрих, где Вейль под влиянием цюрихского философа Ф. Медикуса увлекся философией Фихте, в котором он видел своеобразного предшественника гуссерлианской феноменологии. Впоследствии он ставил Фихте значительно выше Гуссерля. Едва ли, конечно, философские занятия Вейля, в частности Гуссерлем, оказали существенное влияние на его исследования по ОТО,

² В философской эволюции Вейля на первый взгляд, существенную роль играли случайные обстоятельства его жизни. Все же поворот к Гуссерлю в какой-то мере был вполне естественным для него. Во-первых, Гуссерль был поборником «строгой научности» философии. Во-вторых, основным объектом философского исследования по Гуссерлю раннего периода было научное познание, а главной проблемой — вопрос об «объективности познания». Вейлю, проявлявшему неподдельный интерес к философским проблемам научного знания, не могли не импонировать, например, такие высказывания Гуссерля: «Философу недостаточно того, что мы ориентируемся в мире, что мы имеем законы как формулы, по которым мы можем предсказывать будущее течение вещей и восстанавливать прошедшее. Он хочет привести в ясность, что такое суть по существу „вещи“, „события“, „законы природы“ и т. п. И если наука строит теории для систематического осуществления своих проблем, то философ спрашивает, в чем сущность теории, что вообще делает возможным теорию и т. п. Лишь философское исследование дополняет научные работы естествоиспытателя и математика и завершает чистое и подлинное теоретическое познание» [103, с. 6]. Наконец, Гуссерль начинал как математик, защитив в 1882 г. диссертацию у Вейерштрасса, ассистентом которого он был.

До своей женитьбы на Е. Джозеф Вейль одно время был увлечен певичей, очень религиозной девушкой, серьезно занимавшейся философией. Она посещала философский кружок, которым руководил «известный гегельянец». «Из этого, впрочем,— вспоминал впоследствии Вейль,— ничего не вышло, частью из-за моей человеческой незрелости, но частью также и из-за противоположности наших мировоззрений, между которыми трудно было перебраться мост» [95, с. 632].

а затем и по единой теории поля. Но в замечательных лекциях по ОТО, которые затем появились в виде знаменитой книги «Пространство. Время. Материя» (1918), некоторое влияние Гуссерля ощущимо.

Мы уже отмечали, что проблема пространства и времени волновала Вейля еще до поступления в университет и была связана с его живым интересом к философии. В лекциях по ОТО, как писал он в предисловии, его «привлекала возможность на примере этой большой темы показать взаимное проникновение философских, математических и физических идей» [64, с. 1]. Весьма «философичное» введение содержит несколько явно гуссерлианских страниц. Обсуждая философские проблемы познания действительности, Вейль использует термины Brentano и Гуссерля: «интенциональный объект», «сущностный анализ», «усмотрение сущности» и т. д. Отказываясь от обсуждения феноменологии Гуссерля и ее понимания Вейлем, приведем несколько высказываний последнего, в которых он рассматривает проблему познания физической реальности и пространства-времени с позиций Гуссерля. Теорию относительности он считает особенно ярким примером гуссерлианского «сущностного анализа». «В области физики, вероятно, впервые благодаря теории относительности стало совершенно ясно, что из данных нам в созерцании сущностей пространства и времени ни одна не входит в математически построенный физический мир... Формулируя эту мысль в виде общего принципа, можно сказать, что реальный мир, каждая из его составных частей... даны и могут быть даны лишь как интенциональные объекты актов сознания» [64, с. 9—10]. Далее Вейль разъясняет разницу между имманентными и трансцендентными объектами и обсуждение проблемы реальности заканчивает словами: «Природа реальных вещей такова, что они являются неисчерпаемыми по своему содержанию, к которому мы только можем путем все новых, иногда противоречивых опытов и их упорядочения неограниченно приближаться. В этом смысле реальная вещь — это предельное понятие (Grenzidee). На этом основан эмпирический характер всякого познания действительности» [64, с. 4]. В этом месте Вейль дает ссылку на Гуссерля: «Точная формулировка этой мысли теснейшим образом примыкает к работе Гуссерля „Идеи чистой феноменологии и феноменологической философии“ (Jahrb. für Philosophie und phänomenolog. Forschung. Bd. I, Halle, 1913)».

В цитированных выше воспоминаниях о своей философской эволюции Вейль приводит отрывок из этих же лекций, который нам не удалось найти в книге и который, возможно, более выукло обрисовывает вейлевское понимание сущностного анализа Гуссерля на примере проблемы пространства-времени: «Представленные здесь исследования о пространстве кажутся мне хорошим примером того сущностного анализа, к которому стремится феноменологическая философия, пример, типичный для тех случаев, когда речь идет о не-имманентной сущности. Историческое развитие проблемы пространства показывает нам, сколь трудно для нас, людей, погруженных в действительность, постигнуть нечто сущностное. Необходимо было

долгое развитие математики, широкое развертывание геометрических исследований от Евклида до Римана, со времен Галилея углубляющееся проникновение физики в природу и ее законы, постоянно, снова и снова стимулируемое эмпирией, наконец, гений нескольких великих умов — Ньютона, Гаусса, Римана, Эйнштейна, — чтобы оторвать нас от случайных, несущественных черт, с которыми мы остаемся ближе всего связанными» [95, с. 638]. «Метод, которым Эйнштейн построил общую теорию относительности, — говорил Вейль в лозаннском докладе в 1954 г., — и вывел справедливый в ее рамках закон тяготения, комбинирует сущностный анализ, математическое конструирование и экспериментальную проверку знаний» [там же].

После переезда в Цюрих, как мы уже упоминали, Вейль вместе с женой начал посещать семинар крупного специалиста по Фихте Ф. Медикуса, и постепенно Гуссерль в философских размышлениях Вейля стал отходить на второй план. По его мнению, последовательное развитие феноменологии Гуссерля должно было привести к той форме теоретико-познавательного идеализма, которую наиболее ярко выразил именно Фихте. «У Фихте, — писал Вейль в 1954 г., — нашел себе наиболее откровенное и сильное выражение тот метафизический идеализм, к которому в то время пачала робко нащупывать пути феноменология» [95, с. 637].

Увлечение Вейля Гуссерлем и особенно Фихте сопровождалось не только его интенсивной работой по ОТО, единой теории поля, дифференциальной геометрии, но и появлением новой тематики, глубоко захватившей его. Речь идет об основаниях математики, которыми издавна, хотя и с перерывами, занимался Гильберт. Но здесь ученик пошел не по стопам учителя. Наоборот, увлекшись в конце 10-х годов интуиционистской концепцией математики, выдвинутой голландским математиком Л. Брауэром, он вступил в конфликт с формально-аксиоматическим подходом Гильберта к основаниям математики. В 1918—1919 гг. появляются работы Вейля о континууме, исходным пунктом которых была констатация кризиса оснований математики, связанного прежде всего с известными антиномиями теории множеств. Выдвинутый им подход к обоснованию анализа оказался в некоторых пунктах родственным подходу основоположника интуиционизма Л. Брауэра. Узнав о работах последнего, Вейль становится решительным сторонником интуиционизма. В 1921 г. он выступает с большой статьей «О новом кризисе оснований математики» [104], в которой популяризирует и развивает идеи Брауэра³. В противовес Гильберту, считавшему опасной для

³ Вот несколько высказываний из этой статьи, характеризующих основные положения интуиционистской математики и отношение к ним Вейля. «Брауэровская (цит. по кн. [105] в переводе А. П. Юшкевича, в которой фамилия голландского математика (Brouwer) транскрибируется как Броуэр.— В. В.) идея проста, но вместе с тем глубока: здесь перед нами появляется „континуум“ (...), который никоим образом не разрешается в совокупность лежащих готовыми вещественных чисел, а скорее представляет собой среду свободного становления» [105, с. 102]. «Цена не экзистенциальная теорема (имеются в

математики интуиционистскую программу, Вейль видел в этой программе путь к разрешению кризиса оснований математики и будущее метаматематики. Большинство же друзей и коллег считали новое увлечение Вейля следствием его яркой, многогранной природы и его глубокого интереса к философским проблемам. Им казалось, что он испытывал «уноение, разрешая себе увлекаться или просто метаться между противоположными течениями, обуревавшими тот период» [106, с. 193].

Мы можем только строить предположения о том, в какой связи находились следующие три сферы размышлений, исследований и интересов Вейля:

1) философия Гуссерля и Фихте с последующим «восхождением» (начиная с 1922 г.) к немецкому философу-мистiku И. Экхарту (Майстеру Экхарту), своеобразному предтече немецкого классического идеализма (о связи учения Экхарта с философией Фихте см. [107, с. 209—210]).

2) ОТО, ЕГТП, исследования по дифференциальной геометрии и проблеме пространства;

3) основания математики и интуиционистская концепция Брауэра.

Во всяком случае, у Вейля, который так же серьезно и увлеченно изучал литературу, музыку, искусство и который всегда стремился связать между собой далеко отстоящие друг от друга области искусства, научного познания и философского анализа⁴, названные три области интересов и исследований, скорее всего, были взаимосвязаны. В ОТО и единых геометризованных теориях поля, по крайней мере в их вейлевском понимании, можно до некоторой степени усмотреть недвусмысленную перекличку со многими идеями и конкретными высказываниями Гуссерля (о понимании реальных вещей как предельных понятий и о «сущностном анализе» мы уже говорили выше)⁵. Характерный для геттингенских теоретиков последо-

виду „теоремы существования“¹, играющие фундаментальную роль в классической математике.— В. В.), а проводимое в доказательстве построение. Математика, как говорит мимоходом Броуэр, есть более деяние (Тип), чем учение» [105, с. 106]. «Именно таким образом нужно понимать мысль Броуэра, что нет никаких оснований верить в логический закон исключенного третьего» [105, с. 104]. «...Я теперь отказываюсь от своей прежней попытки (имеется в виду вейлевское обоснование анализа в книге „Континуум“.— В. В.) и присоединяюсь к Броуэру» [105, с. 107].

Главными положениями интуиционистской концепции Вейль считал идею становящейся свободной последовательности и отказ от закона исключенного третьего: «... основные моменты (этой концепции.— В. В.)— становящаяся свободная последовательность и отрицание аксиомы исключенного третьего — во всяком случае принадлежат Броуэру» [там же].

⁴ Весьма характерны для него следующие высказывания, например, «В своей работе я всегда пытался объединить истину с прекрасным (курсив наш.— В. В.)» [106, с. 209], или: «...меня... всегда влекла задача дать себе рефлексивный отчет о смысле и цели этих (т. е. математических и физических.— В. В.) исследований» [95, с. 631].

⁵ Примером «сущностного анализа» могло бы служить и предпринятое Вейлем обоснование необходимости расширения римановой геометрии до «чистой инфинитезимальной геометрии», положенной в основу его теории. Вынужден-

вательный математический и даже аксиоматический подход к физике, который пытались реализовать Гильберт и Вейль, созвучен следующему высказыванию Гуссерля: «...математическая форма рассмотрения во всех строго развитых теориях... является единственно научной формой, единственной, дающей систематическую замкнутость и завершенность и открывающей возможность понять все возможные вопросы и возможные формы их разрешения» [105, с. 84]. ОТО и тем более единая теория Вейля близки по своему замыслу и структуре к гуссерлианским «априорным естественным наукам», к которым он причислял «чистую геометрию» и «чистую механику» и которые он рассматривал как «пауки об универсальной структуре мира», как науки, «признанные установить те понятия и законы, без которых вообще непостижима природа» [108, с. 34].

Гуссерлианская феноменология с характерным для нее провозглашением интуиции как основного метода познания («всякая подлинно данная интуиция является законным источником познания и т. д.» [108, с. 22]) была благоприятной почвой для восприятия Брауэровского интуиционизма. В интуиционистских работах Вейля 20-х годов эта связь легко просматривается. Он писал, например, что «то зрение сущности (в гуссерлианском смысле.— *B.B.*), из которого происходят общие теоремы, всегда основывается на полной индукции, на первоначальной математической интуиции» [105, с. 26]. Брауэровское понимание непрерывного Вейль связывал с гуссерлианской концепцией соотношения части и целого [105, с. 78].

Философию Фихте Вейль считал, как мы видели, своеобразным развитием феноменологии Гуссерля. Размышления же над фихтевским учением могли служить дополнительным импульсом как для разработки интуиционистских идей, так и для философского углубления в ОТО и в область ЕГТП. Одной из наиболее характерных черт учения Фихте был его бесстрашный критицизм, который мог привлечь внимание Вейля: «...дух критики, стремление все проверить судом разума, неиспровержение всяких авторитетов, если они этой проверки не выдерживают,— вот что роднит Фихте с Кантом и с философией Просвещения». [107, с. 5]. Другой важной особенностью философии Фихте, которая должна была импонировать Вейлю, было признание фундаментальности, первичности деятельности, практически-правственного отношения к миру, хотя это признание сопровождалось идеалистическим столкновением практики. «Мы действуем,— писал Фихте,— не потому, что познаем, но познаем потому, что предназначены действовать; практический разум есть корень всякого разума» [107, с. 6]. Первый отмеченный аспект учения Фихте (его критицизм) был, вероятно, созвучен критической направленности размышлений Вейля об основаниях математики и интуиционистской концепции с ее резко выраженным критическим

ное затем разделение геометрии на «феноменальную», которая обнаруживается на опыте с помощью часов и линеек, и «сущностную», которая не может быть выявлена посредством измерительных процедур, но тем не менее схватывает глубинную сущность пространства-времени, гравитации и электромагнетизма, также в духе гуссерлианской теории познания [103, 108, 109].

отношением к классическому и формально-аксиоматическому подходам к обоснованию математики. Второй аспект (деятельностная концепция Фихте) находит свое непосредственное выражение в конструктивистском принципе интуиционизма: «Математика ... есть более деяние (Тип), чем учение» [105, с. 106] другая форма этого интуиционистского положения: «Существовать — значит быть построенным»⁶. Не случайно, по-видимому, Вейль впоследствии называл Фихте «конструктивистом чистой воды» [95, с. 642]. Глубокий интерес к философии у естествоиспытателей всегда сопряжен с их пристальным вниманием к основаниям своей науки. Именно в эти годы Вейль интенсивно исследует и основания математики, и основания физики.

Можно усмотреть определенную переключку между некоторыми идеями интуиционизма и исследованиями Вейля по физике, прежде всего по проблеме ЕГТП. Конструктивистский принцип «существовать — значит быть построенным», несомненно, родствен методологическому принципу наблюдаемости, сыгравшему большую роль в создании теории относительности и квантовой механики. «Исключение чрезмерно произвольных элементов», т. е. таких элементов, которым (в физике) нельзя придать операционально-измерительного смысла (например, понятия «абсолютного пространства» и «эфира») или которые (в математике) нельзя построить «конструктивно» (например, понятие точной верхней грани каждого непустого ограниченного множества вещественных чисел), было ключевым моментом и в истории теории относительности, и в развитии интуиционистской концепции математики⁷.

Интуиционистское понимание математического континуума как «непрерывной среды становления» переключается с приверженностью Вейля к континуалистской, полевой программе синтеза физики, со стремлением достичь этого за счет введения еще более «текучего» четырехмерного континуума, обобщающего понятие риманова пространства и описываемого геометрией Вейля. Характеризуя брауэровскую теорию континуума, Вейль писал: «Ледяной покров ... разбился вдребезги, и вскоре момент текучести стал полновластным господином над неизменностью. Брауэр построил строгую математическую теорию континуума, рассматривающую последний не как застывшее бытие, но как среду свободного становления» [105, с. 22]. При этом как физика, в свете ОТО и полевой программы, так и интуиционистская математика при несомненном преобладании аспек-

⁶ «Именно тезис „существовать — значит быть построенным“ явился исходным пунктом реформаторской деятельности Брауэра, произвел наибольшее впечатление на его современников и оказал самое существенное влияние на дальнейшее развитие возражений классической математике» [110, с. 110].

⁷ В 1926 г. Вейль писал: «Из истории физики видно, что интуиция и теория должны постоянно идти рука об руку. С одной стороны, нельзя отрицать, что феноменализм Маха был отвергнут теорией атома, но, с другой, теория относительности Эйнштейна показала, сколь важную роль может сыграть возврат к интуитивному смыслу теоретических построений (геометрия) и исключение чрезмерно произвольных элементов (абсолютное пространство)» [105, с. 32].

та непрерывности не могли тогда (и оказалось, что не смогли и до сих пор) полностью исключить аспект дискретности или свести его к континуальному аспекту. ОТО и ЕГТП, как и единые электромагнитные теории поля, не могли дать полевое описание частиц. А «против теории Броуэра, — писал Вейль в 1926 г., — можно выставить еще то возражение, что она не преодолевает дискретное до конца» [105, с. 25].

Сказанного достаточно, чтобы убедиться в определенной взаимосвязи философских интересов Вейля, его исследований по основаниям математики и его увлеченности интуиционизмом с его работой над проблемами ОТО и ЕГТП. Возвращаясь к философской эволюции Вейля, отметим, что с 1922 г. наиболее глубокий слой его философских размышлений оказался связанным с учением выдающегося немецкого философа-мистика И. Экхарта. В 1954 г. Вейль вспоминал: «Из всех событий моей духовной жизни самыми счастливыми были для меня два: когда в 1905 г., будучи юным студентом, я изучал грандиозный труд Гильберта „Сообщение о теории алгебраических чисел“ и когда в 1922 г. я читал Экхарта...» [95, с. 647]. Но новое философское увлечение Вейля, ставшего к этому времени, «наверное, самым известным из математиков своего поколения» [106, с. 208] (не только из-за его важного вклада в математику, но и благодаря исключительной популярности его блестящей книги по теории относительности, выдержавшей в течение нескольких лет пять изданий, а также благодаря активному участию в дискуссиях по основаниям математики), относится уже к более позднему периоду. Занятия мистической философией Экхарта, весьма далекой от философских проблем научного познания, не привели, впрочем, к потере интереса к этим проблемам. Более того, как мы уже писали, в 1926 г. Вейль закончил блестящую книгу по философии математики и физики, которая подвела итог его размышлениям в этой области и его собственным исследованиям по основаниям математики и физики.

Таким образом, цитированное выше замечание Ньюмена о неразделимости философских и научных занятий Вейля и о влиянии философии на его работы в области математики и физики представляется вполне справедливым, по крайней мере, когда речь идет о периоде с 1914 или 1917 г. до 1922 г.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ РАБОТЫ ПО ЕДИНЫМ ТЕОРИЯМ ПОЛЯ

С тех пор как возникла в 90-х годах XIX в. электромагнитно-полевая картина мира и соответствующая исследовательская программа синтеза физики, не прекращались попытки объединения основных физических взаимодействий на электромагнитно-полевой основе (см. гл. 1 настоящей работы). Наряду с радикальными замыслами Эйнштейна (1908—1910) и Ми (1912—1913), которые стремились так обобщить уравнения Максвелла, чтобы из них можно было вы-

вести существование электронов и квантовую структуру излучения, выдвигались более ограниченные концепции объединения электромагнитного и гравитационного полей или сведения одного поля к другому. В некоторых случаях авторы этих концепций не скрывали и своей окончательной цели — свести частицы к полю. Эти тенденции были весьма характерны для геттингенских ученых.

Загадочным образом Вейль ни в первых публикациях своей единой теории в 1918 г., ни в последующих ее изложениях в различных изданиях книги «Пространство. Время. Материя» (с 1919 по 1923 г.) не упоминает о единой теории Гильберта, которая была ему хорошо известна и явилась, по нашему мнению, одним из главных истоков теории Вейля. Это подтверждается, в частности, и более поздним высказыванием Вейля, относящимся к 1944 г.: «В своих исследованиях по общей теории относительности Гильберт соединил теорию гравитации Эйнштейна с программой единой теории поля Г. Ми... *Работа Гильберта может рассматриваться как предвестник единой теории гравитации и электромагнетизма* (курсив наш.— В. В.). Однако в гамильтониане (точнее, лагранжиале.— В. В.) Гильберта остается еще слишком много произвольности, последующие попытки избавиться от нее (Вейль, Эддингтон, сам Эйнштейн и другие) не достигали окончательной цели» [85, с. 359]. Непосредственно же Вейль ссылается на несколько работ, посвященных попыткам объединения гравитации и электромагнетизма (в книге «Пространство. Время. Материя», а не в публикациях 1918 г.): «На основе аналогичной тенденции, мне кажется, возникла теория Э. Райхенбахера (здесь он ссылается на статьи этого автора 1917 [111] и 1920 [112] гг.— В. В.), которая в существенных пунктах остается для меня непонятной. Относительно других попыток объединить электричество и тяготение — сравн. цитированную в примечании 4 статью Абрагама (речь идет об обзоре Абрагама по теориям тяготения, написанном в конце 1914 г. [113], в котором упоминаются попытки объединения скалярных теорий тяготения с электродинамикой Максвелла, предпринятые Ми [114], Ишиварой [115] и Нордстремом [116] в 1912—1914 гг.— В. В.); далее статьи Нордстрема [117] и Вихерта [118] (цитируются указанные работы.— В. В.)» [64, с. 331].

Упомянутые работы Ишивары, Нордстрема и Ми были рассмотрены нами в главе 1. Возможно, Вейль знал об этих неудавшихся попытках и до создания своей теории, но он мог о них и не знать и отметил их уже впоследствии. Во всяком случае, логика построения теории никак не связана с работами этого направления, хотя они, конечно, находятся в той же цепи развития синтетических полевых концепций, что и теория Вейля.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Общая теория относительности сильно стимулировала собственно математические исследования по дифференциальной геометрии. Одним из первых значительных достижений на этом пути оказалось открытие бесконечно малого параллельного переноса векторов в римановом пространстве. Оно было сделано в 1917—1918 гг. тремя математиками: итальянцем Т. Леви-Чивитой [119], учеником Г. Риччи-Курбастро и его соавтором⁸, Г. Гессенбергом [121] в Германии (именно на Леви-Чивиту и Гессенберга в этой связи ссылался Вейль) и голландцем Я. А. Схоутеном (1918) [122], ставшим спустя несколько лет лидером одной из наиболее значительных дифференциально-геометрических школ [123]. Схоутен считал, что начало этому плодотворному направлению было положено работой Гессенберга, опубликованной годом раньше (1916)⁹. Вейль же опирался в первую очередь на работу Леви-Чивиты и статью Гессенберга, которые оценивал очень высоко. Имея в виду геометрию, лежащую в основе его единой теории поля, Вейль писал в своей книге (начиная с 3-го издания): «Разработка этой геометрии была сильно стимулирована следующими работами, появившимися под знаком эйнштейновской теории тяготения: Леви-Чивита (далее он цитирует соответствующие работы Леви-Чивиты и Гессенберга.— В. В.)» [125, с. 290]. Все же изложению Леви-Чивиты и Вейль, и впоследствии другие математики отдавали предпочтение, нередко связывая открытие параллельного переноса в римановой геометрии именно с его именем. В предисловии к третьему изданию (1919) своей книги «Пространство. Время. Материя» Вейль писал: «Открытие бесконеч-

⁸ Их совместная работа «Методы абсолютного дифференциального исчисления», опубликованная в 1901 г., является классической и долгое время была наиболее цитируемой работой по тензорному исчислению [120]. Именно на эту работу прежде всего опирались Эйнштейн и Гроссман при разработке математического аппарата релятивистской теории тяготения.

⁹ «Новая идея, которая смогла породить собственно современную дифференциальную геометрию, сверкнула лишь тогда, когда стало ясно, что можно строить геометрию посредством установления в многообразии перенесения независимо от фундаментального тензора. Эта новая мысль была впервые высказана Гессенбергом в 1916 г. . . в совершенно иной формулировке. . . (т. е. формулировке, не связанной с концепцией „бесконечно малого параллельного переноса“.— В. В.)» [124, с. 143]. Рассказывая об открытии параллельного переноса, Схоутен также отмечает работу Леви-Чивиты и свою статью 1918 г.: «Уже Кристоффель и Лишниц в 1870 г. нашли, что в V_n (n -мерное многообразие с квадратичной метрикой) имеется операция дифференцирования, приводящая к ковариантному дифференциалу, не зависящему от выбора переменных. Леви-Чивита в 1917 г. и независимо от него в 1918 г. автор этой статьи показали, что это дифференцирование связано с определенным „псевдопараллельным“, или „геодезическим“, переносом, характерным для V_n . Под этим псевдопараллельным переносом Леви-Чивита. . . понимает перенос, при котором ковариантный дифференциал обращается в нуль» [124, с. 142]. Аналогичное определение параллельного переноса было дано и Схоутеном. В 4-м и 5-м изданиях своей книги «Пространство. Время. Материя» Вейль в связи с обсуждаемым ссылается и на работу Схоутена 1918 г. [64, с. 325—326].

но малого параллельного переноса, сделанное господином Леви-Чивитой в 1917 г., дало толчок к новым исследованиям математических оснований римановой геометрии» [125, с. VI]. Затем он говорил о своей «чистой инфинитезимальной геометрии», опирающейся на расширение понятия бесконечно малого параллельного переноса и составившей пространственно-временную основу его единой теории поля, о том, что «каждый шаг... (при ее построении.— В. В.) делается с полной естественностью, наглядностью и необходимостью» [там же].

Таким образом, Эйнштейн и Гроссман использовали римановую геометрию и «абсолютное дифференциальное исчисление» Риччи и Леви-Чивиты для построения ОТО. Успех ОТО стимулировал интерес к римановой геометрии; Леви-Чивита, Гессенберг, Схоутен, сам Вейль открыли и развили понятие бесконечно малого параллельного переноса. Вейль, как мы увидим, руководствуясь не только математическими возможностями расширения этого понятия, но и физическими соображениями (концепция близкодействия, дальнейшее расширение принципа относительности и, наконец, идея геометрического синтеза гравитации и электромагнетизма), построил свою «чистую инфинитезимальную геометрию» и на ее основе свою единую теорию поля. Этот успех в начале 20-х годов дал дополнительный импульс чисто геометрическим исследованиям. Именно на этом пути возникли основополагающие работы Я. Схоутена, Э. Картана, О. Веблена и других, в которых были заложены основы теории пространств сначала аффинной связности, а затем конформной и проективной связностей (и более общо — однородной связности) [126]¹⁰. Эти достижения, в свою очередь, создали необходимый запас геометрических структур, интенсивно используемых в 20—30-х годах для разработки ЕГТП.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ ТЕОРИИ И ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ ГРАВИТАЦИИ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Вейль в своей первой публикации, законченной в мае 1918 г. и содержащей основы его единой теории поля [86, 127], следующим образом аргументировал необходимость расширения римановой геометрии: «Пусть P и P^* — какие-либо две точки, соединенные кривой; тогда вектор, заданный в точке P , можно перенести параллельно самому себе вдоль этой кривой из P в P^* . Правда, такой перенос вектора из P в P^* , вообще говоря, неинтегрируем, т. е. вектор, получаемый в точке P^* , зависит от пути, по которому производился перенос. Интегрируемость имеет место только в евклидовой („безгравитационной“) геометрии. Но в охарактеризованной выше римановой геометрии остается еще один, последний нелокальный (fern-

¹⁰ Общие понятия линейной связности, геометрического объекта, дифференцируемого многообразия были введены в эти же годы Кеннигом, Схоутеном, Картаном, Вебленом и др. [124].

geometrisches) элемент — π , насколько я могу видеть, без особых оснований. Причиной тому может быть лишь случайный факт возникновения этой геометрии из геометрии плоского мира. Действительно, квадратичная форма (2) (т. е. $ds^2 = \sum_{ik} g_{ik} dx_i dx_k$. — В. В.)

позволяет сравнивать друг с другом длины не только двух векторов, взятых в одной и той же точке, но и векторов в любых двух удаленных друг от друга точках *В настоящей же геометрии близкодействия (Nahegeometrie) должен быть лишь принцип переноса длины из одной точки в другую, бесконечно к ней близкую.* И тогда оказывается столь же мало оснований предполагать заранее, что задача переноса длины из одной точки в другую, удаленную от нее на конечное расстояние, интегрируема, как и в задаче о переносе направления (разрядка наша.— В. В.)» [86, с. 514].

Таким образом, новый подход к римановой геометрии, основанный на понятии бесконечно малого параллельного переноса, выявляет, по Вейлю, некоторую ее недостаточность с точки зрения обобщенной концепции близкодействия. Полевой, близкодействующий характер гравитации в свете ОТО приводит к своеобразной близкодействующей геометрии пространства-времени (Nahegeometrie), которую реализует риманова геометрия. Но, как показывает Вейль, подход к этой геометрии с позиций концепции бесконечно малого параллельного переноса вектора обнаруживает наличие в ней некоторого «дальнодействующего» элемента, связанного с неизменностью длины вектора при этом переносе. Стремление наиболее полно и последовательно реализовать в геометрии идею близкодействия приводит к требованию исключить этот «дальнодействующий» элемент, расширив тем самым геометрическую структуру пространства-времени. Это расширение, как мы увидим, ведет не только к дальнейшему обобщению принципа относительности и, таким образом, находится в русле расширенной релятивистской программы [38], но и к теории, «поразительным образом объясняющей (если ее применить к физическому миру) не только гравитационные, но и электромагнитные явления» [86, с. 515]. Синтез гравитации и электромагнетизма достигается на единой геометрической основе («...в этой теории смысл всех физических величин определяется геометрией мира...») [там же]. Далее Вейль строит эту расширенную геометрию, «не касаясь физической подоплеки» (при этом он замечает, что «ее физическое приложение обнаружится затем само собой»). Отказ от возможности сравнивать длины векторов в различных точках означает, что в новой геометрии «прямой физический смысл имеют лишь отношения компонент g_{ik} », а не сами эти величины. В результате «возникающие соотношения должны обладать двойной инвариантностью: 1) они должны быть инвариантными относительно любых гладких преобразований координат (как в ОТО.— В. В.); 2) они не должны изменяться при замене g_{ik} на λg_{ik} , где λ — произвольная гладкая функция точки» [86, с. 516]. Требование близкодействия ведет к расширению принципа относительности. Векторные про-

странства в различных точках оказываются теперь связанными не конгруэнтным отображением (как в римановой геометрии), а отображением подобия. Соответствующим образом модифицируется и понятие бесконечно малого параллельного переноса. Во-первых, он осуществляет отображение подобия векторных пространств в соседних точках: изменение вектора ξ^i при его переносе из точки P в точку P' $d\xi^i$ выражается так:

$$d\xi^i = - \sum_r d\gamma_{rs}^i \xi^r. \quad (1)$$

Во-вторых, $d\gamma \prod_r^i$ должны быть линейными дифференциальными формами:

$$d\gamma_r^i = \sum_s \Gamma_{rs}^i dx_s, \quad \Gamma_{rs}^i = \Gamma_{sr}^i. \quad (2)$$

Если теперь в соответствии с первым требованием считать, что при параллельном переносе двух векторов ξ^i и η^i из точки P в точку P' их скалярное произведение в точке P'

$$\sum_{ik} (g_{ik} + dg_{ik}) (\xi^i + d\xi^i) (\eta^k + d\eta^k)$$

должно быть пропорционально их скалярному произведению в точке P $\sum_{ik} g_{ik} \xi^i \eta^k$, и принять коэффициент пропорциональности бесконечно мало отличающимся от 1 и равным $(1 + d\varphi)$, то получится следующее уравнение:

$$dg_{ik} - (d\gamma_{ki} + d\gamma_{ik}) = g_{ik} d\varphi. \quad (3)$$

Отсюда, в частности, следует, с учетом соотношений (1), (2), важный вывод о том, что $d\varphi$ является линейной дифференциальной формой:

$$d\varphi = \sum_i \varphi_i dx_i. \quad (4)$$

Уравнение (3) однозначно определяет также, если считать заданной функцию φ , символы Кристоффеля в новой геометрии. Их можно найти из уравнений

$$\Gamma_{i,kr} + \Gamma_{k,ir} = \frac{\partial g_{ik}}{\partial x_r} - g_{ik} \varphi_r, \quad (5)$$

следующих из уравнения (3). Мы видим, что если $\varphi = 0$, то соотношения (5) переходят в римановы. Обозначив $\Gamma_{i,rs}^*$ символы Кристоффеля (или коэффициенты аффинной связности) римановой геометрии, получим для коэффициентов аффинной связности «чистой инфинитезимальной геометрии» Вейля следующие выражения:

$$\Gamma_{i,rs} = \Gamma_{i,rs}^* + 1/2 (g_{ir} \varphi_s + g_{is} \varphi_r - g_{rs} \varphi_i). \quad (6)$$

Иначе говоря, «внутренняя связь мер (Masszusammenhang) пространства зависит, кроме квадратичной формы (2) (определенной с точностью до произвольного коэффициента пропорциональности),

также и от линейной формы (7) (т. е. от дифференциальных форм ds^2 и $d\varphi$.— В. В.)» Произвол в выборе g_{ik} определяется множителем λ , являющимся положительной функцией точки. Заменяв g_{ik} на λg_{ik} в уравнении (3), мы найдем, что при этой замене к форме (4) следует добавить полный дифференциал от $\ln \lambda$. В результате устанавливаются свойства инвариантности в геометрии Вейля: помимо произвольных гладких преобразований координат, лежащих в основе римановой геометрии, следует считать допустимыми также калибровочные, или масштабные, преобразования:

$$g'_{ik} = \lambda g_{ik}, \quad \varphi'_i = \varphi_i - \frac{\partial \ln \lambda}{\partial x_i}. \quad (7)$$

Поэтому однозначный инвариантный смысл должна иметь не величина φ_i , а величина

$$F_{ik} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k} - \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i},$$

являющаяся антисимметричным тензором, или соответствующая билинейная форма

$$F_{ik} dx_i dx_k = \frac{1}{2} F_{ik} \Delta x_{ik},$$

где Δx_{ik} — элемент поверхности, натянутый на два произвольных сдвига dx и δx . Инвариантным условием сведения геометрии Вейля к римановой является поэтому обращение в нуль тензора F_{ik} .

Трансформационные свойства вектора φ_i и инвариантный характер антисимметричного тензора F_{ik} в свете фундаментальной эйнштейновской идеи геометризации физических взаимодействий приводят к естественной мысли о возможности отождествления вектора φ_i с потенциалом электромагнитного поля, а тензора F_{ik} с тензором напряженностей электромагнитного поля¹¹. Антисимметричность тензора F_{ik} позволяет сразу же записать первую пару максвелловских уравнений:

$$\frac{\partial F_{kl}}{\partial x_i} + \frac{\partial F_{li}}{\partial x_k} + \frac{\partial F_{ik}}{\partial x_l} = 0. \quad (8)$$

Затем Вейль показывает, как можно во всех деталях развернуть открытую им геометрию и связанное с ней тензорное исчисление¹². Как замечает Вейль, нетрудно показать, что тензор кривизны в этой геометрии инвариантным образом распадается на два слагаемых:

$$R^i_{jkl} = P^i_{jkl} - \frac{1}{2} \delta^i_j F_{kl}, \quad (9)$$

где P^i_{jkl} является геометрической характеристикой гравитацион-

¹¹ Вейль пишет об этом так: «Теперь само собой напрашивается истолкование в геометрии мира величины φ_i как A -потенциала, а тензора F , следовательно, как напряженности электромагнитного поля» [86, с. 519].

¹² В частности, он вводит понятие веса l тензора a_{ik} (здесь ранг тензора не важен) как показателя степени у множителя λ , появляющегося при преобразовании (7) у тензора a_{ik} , т. е. при переходе a_{ik} в $\lambda^l a_{ik}$.

ного поля (P_{ij} антисимметричен как по индексам k, l , так и по индексам i, j), а F_{ik} — аналогичной характеристикой электромагнитного поля (тензор напряженностей электромагнитного поля). Обращение F_{ik} в нуль приводит к римановой геометрии, в которой задача переноса длины интегрируема, уравнение $P_{jhl}^i = 0$, означающее отсутствие гравитации, приводит к евклидовой геометрии, в которой интегрируема задача переноса направления. С этой точки зрения евклидово пространство абсолютно пусто, так как присутствие частиц, обладающих массой покоя, и электромагнитного поля привело бы к его искривлению.

ПРОБЛЕМА ПОЛЕВЫХ УРАВНЕНИЙ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ

При выводе уравнений поля Вейль исходит из вариационного принципа для действия, которое должно быть «абсолютным инвариантом», т. е. скаляром нулевого веса¹³. Поскольку элемент 4-мерного объема имеет вес, равный 2, то лагранжиан W должен быть инвариантом веса -2 . Этому условию удовлетворяют выражения

$$1/2 F_{ik} F^{ik}, R_{jhl}^i R_i^{jhl}, R_{ik} R^{ik}, R^2 \text{ и др.}$$

Если при этом первый инвариант приводит к максвелловским уравнениям, то ни один из трех других инвариантов не может привести к эйнштейновским уравнениям гравитационного поля. Вместо них должны получиться ввиду квадратичного характера гравитационных лагранжианов дифференциальные уравнения 4-го порядка относительно g_{ik} . Действительно, если в качестве W взять выражение $W = R_{jhl}^i R_i^{jhl}$, то согласно уравнениям (9) его можно привести к виду

$$W = |P|^2 + 4L, \tag{10}$$

где $L = 1/4 F_{ik} F^{ik}$, и гравитационная часть лагранжиана оказывается квадратичной по кривизне. В дальнейшем это обстоятельство существенно затруднило разработку теории. Вначале, правда, Вейль не считал его серьезной трудностью, полагая, что намечающееся обобщение уравнения гравитации может оказаться лучше приспособленным к проблеме элементарных частиц, чем полевые уравнения ОТО: «...крайне маловероятно, чтобы уравнения Эйнштейна для гравитационного поля выполнялись строго, и прежде всего по-

¹³ «Переходя от геометрии к физике, мы примем по аналогии с теорией Ми... что все закономерности природы зиждутся на некотором интегральном инварианте... — действию $\int W d\omega$... а именно от всех возможных 4-мерных пространств реально существующий мир отличается тем, что в любой его области действие принимает экстремальное значение...» [86, с. 522].

¹⁴ В обсуждаемой работе Вейля рассматриваются только два первых инварианта. Два других инварианта появились впервые в последующих работах, в частности у Р. Вайценбека, который доказал, что перечисленные инварианты являются единственными выражениями требуемого вида [63, с. 275].

тому, что входящая в них гравитационная постоянная совершенно не вписывается в ряд других естественных констант, так что гравитационный радиус заряда и массы электрона оказываются, например, совершенно иного порядка величины, чем радиус самого электрона... (они меньше последнего, первый в 10^{20} , а второй в 10^{40} раз) [86, с. 525]¹⁵.

Но впоследствии стало ясно, что даже в простейших случаях интегрирование соответствующих уравнений 4-го порядка крайне затруднительно [63, с. 281]. Кроме того, уравнения 4-го порядка должны иметь гораздо больше решений, чем уравнения 2-го порядка, и «поэтому очень трудно объяснить, почему решения этих гипотетических уравнений 4-го порядка так хорошо аппроксимируются в природе решениями уравнений 2-го порядка» [12, с. 335]. Еще одна трудность заключается в отсутствии естественных аргументов в пользу однозначного выбора квадратичного лагранжиана. Заметим, наконец, что задача интегрирования уравнений 4-го порядка существенно затрудняется также из-за того, что в этом случае значительно усложняется вопрос о корректном задании начальных условий¹⁶.

Важным достоинством теории Вейль считал установление связи закона сохранения электрического заряда с инвариантностью действия относительно калибровочных преобразований. Он непосредственным расчетом показал, что уравнение непрерывности для плотности 4-тока, интерпретируемое как дифференциальная форма закона сохранения заряда, точно так же следует из инвариантности действия относительно бесконечно малого калибровочного преобразования

$$\delta g_{ik} = g_{ik} \delta \varphi, \quad \delta \varphi_i = \partial(\delta \varphi) / \partial x_i,$$

как аналогичная форма закона сохранения энергии-импульса получается из инвариантности действия относительно бесконечно малых трансляций координат. «То, каким именно образом этот закон сохранения (т. е. закон сохранения электрического заряда. — В. В.) объединяется с принципом энергии-импульса, представляется мне одним из убедительнейших общих аргументов в поддержку представленной здесь теории...» — подчеркивает Вейль [86, с. 523]¹⁷.

¹⁵ О гравитационном радиусе заряда электрона см. [128, с. 261, 268].

¹⁶ В случае полевых уравнений 4-го порядка еще большую остроту приобретает следующее высказывание из трактата Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера: «Дети света — это дифференциальные уравнения, которые предсказывают будущее на основе прошлого. Дети тьмы — это факторы, которые задают начальные условия» [129, с. 207].

¹⁷ Говоря о законе сохранения энергии-импульса, Вейль здесь имел в виду четыре тождества для тензора энергии-импульса материи:

$$\frac{\partial (\sqrt{g} T^i_k)}{\partial x_i} - \Gamma^s_{kr} (\sqrt{g} T^r_s) = 0 \quad (k = 1, 2, 3, 4).$$

Аналогичное тождественное соотношение (имеющее, впрочем, дивергентную форму), записанное для плотности 4-тока, интерпретировалось Вейлем как закон сохранения заряда. Учитывая, однако, что, согласно 1-й теореме Не-

Отметим еще два обстоятельства, связанные с вейлевским пониманием достоинств его теории. Изучая возможность вариационного вывода уравнений Максвелла в рамках своей теории, он указывает, что электромагнитное действие $\int L d\omega$ является инвариантом нулевого веса (т. е. «абсолютным инвариантом», каковым и должна быть эта величина) только в 4-мерном пространстве. Это объясняется тем, что элемент объема $d\omega$ в n -мерной геометрии имеет вес $n/2$, а L является инвариантом веса -2 , и поэтому только в 4-мерной геометрии действие является «абсолютным инвариантом». «Итак, — резюмирует он, — при нашем толковании возможность максвелловской теории связана с размерностью 4» [86, с. 522].

Второе замечание относится к квантовой теории. Отмечая «абсолютную инвариантность» действия в своей теории и указывая, что оно может рассматриваться как «чистое число» (*reine Zahl*), Вейль продолжает: «...таким образом, наша теория с самого начала учитывает атомистическую структуру мира, которая согласно современным воззрениям имеет фундаментальное значение: речь идет о кванте действия» [там же]. Поэтому, по мнению Вейля, при дальнейшей разработке теории она не должна прийти в конфликт с квантовой теорией¹⁶.

Новые физические следствия, которые можно было бы проверить экспериментально, обсуждать было как будто еще преждевременно, так как не был решен вопрос о полевых уравнениях теории, а при выборе лагранжиана (10) эти уравнения должны были оказаться исключительно сложными (нелинейными дифференциальными уравнениями 4-го порядка). «...Возникает задача, — писал Вейль в конце статьи, — вывести из предположений о специальном лагранжиане (14) (т. е. лагранжиане (10). — В. В.) физические следствия и сравнить их с данными опыта, выяснив, в частности, позволяет ли эта теория сделать заключения о существовании электрона и о специфике еще не объясненных процессов в атоме» [86, с. 525]. Таким образом, Вейль полагал, что его теория способна не только естественным, геометрическим образом объединить электромагнетизм и гравитацию, но и — при дальнейшем ее развитии — объяснить существование электрона и квантовые явления.

Вскоре Вейль опубликовал статью, посвященную своей теории, в «*Mathematische Zeitschrift*» [130]. Она содержала более подробное изложение геометрических аспектов теории. Основная установ-

тер, законы сохранения должны быть связаны с конечно-параметрическими непрерывными преобразованиями, следует признать, что, строго говоря, ни закон сохранения энергии-импульса не следует из инвариантности действия относительно произвольных гладких преобразований, ни закон сохранения заряда не вытекает из калибровочной инвариантности. Истинная симметрия закона сохранения заряда оказалась калибровочной симметрией 1-го рода (см. об этом тл. 6 настоящей работы).

¹⁶ Это замечание Вейля следует понимать в том смысле, что только вейлевское действие (с квадратичным лагранжианом) является в «чистой инфинитезимальной геометрии» абсолютным инвариантом; этим свойством не обладает, например, действие ОТО. Это давало надежду на то, что в перспективе теории Вейля естественным путем придет и к кванту действия.

ка программы ЕГТП выражена там еще резче, чем в первой статье. «Согласно этой теории,— писал он, имея в виду свою теорию,— вся действительность, т. е. все, что существует в мире, есть проявление мировой метрики; не существует никаких других физических понятий, кроме как геометрических (...alles Wirkliche, das in der Welt vorhanden ist, Manifestation der Weltmetrik: die physikalische Begriffe sind keine andern als die geometrischen)» [130, с. 2]. Отметим несколько новых моментов, содержащихся в этой статье. Во-первых, здесь Вейль использует понятие аффинной связности (affine Zusammenhang), а также очень ясно подчеркивает «связностную» природу гравитационного поля: «Пространство аффинной связности — это с физической точки зрения мир, в котором введено гравитационное поле» [130, с. 10]. Для единого геометрического описания гравитации и электромагнетизма требуется сделать следующий шаг — ввести метрику. Полученное «метрическое многообразие, на языке физики,— это не что иное, как эфир, заполняющий мир» [130, с. 13—16]. Вместе с тем он рассматривал «в качестве основного положения инфинитезимальной геометрии (т. е. геометрии Вейля.— В. В.)» утверждение о том, «что метрикой задается также и аффинная связность, что принцип переноса длины ведет непосредственно к принципу переноса направления, или, на языке физики, состояние эфира определяет гравитационное поле» [130, с. 17]. Во-вторых, Вейль ввел тензор конформной кривизны (тензор Вейля), сыгравший впоследствии важную роль в разработке математических аспектов ОТО. Наконец, здесь впервые появилось вейлевское разделение физических величин на «интенсивные величины» (Intensitäts-Größen) и «экстенсивные величины» (Quantitäts-Größen), сопоставляемые соответственно с тензорами и тензорными плотностями. Эта классификация величин, родственная соответствующей классификации Г. Ми [131], была впоследствии использована Вейлем для устранения трудностей теории, связанных с отмеченной впервые Эйнштейном несогласованностью с опытом исходного положения теории о переносе длины.

ВОПРОС ОБ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКЕ ОСНОВ ТЕОРИИ (КРИТИКА ЭЙНШТЕЙНА)

Первая статья Вейля содержит «Добавление», написанное Эйнштейном, который, очевидно, имел возможность ознакомиться с работой до ее публикации [132]. Он первым обратил внимание на определенное расхождение оснований теории с опытом. Им было замечено прежде всего, что произвольный множитель в выражении для интервала ds в теории Вейля был бы оправдан, если бы свет был «единственным средством передавать эмпирические данные о метрических соотношениях в окрестности мировой точки» [132, с. 525]. Но этот произвол исчезает, если измерять бесконечно малыми линейками и часами. «Подобное определение элементарного интервала ds ,— писал далее Эйнштейн,— стало бы лишь тогда иллюзорным,

когда понятия «эталонной линейки» и «эталонных часов» основывались бы на принципиально ложных предположениях, а это было бы в том случае, если бы длина эталонной линейки (или скорость хода эталонных часов) зависела от их предыстории. Если бы природа была именно такова, то не могли бы существовать химические элементы, спектральные линии которых имели бы определенную частоту, а относительная частота двух (соседних в пространстве) атомов одного и того же вида, вообще говоря, была бы неодинакова. Поскольку это не так, мне представляется, что основная гипотеза данной теории, к сожалению, неприемлема, хотя ее глубина и смелость должны восхитить любого читателя» [132, с. 525—526].

Замечание Эйнштейна нетрудно понять, если вспомнить, что квадрат элемента длины в соответствии с соотношениями (1), (2) изменяется при его переносе из точки P в бесконечно близкую соседнюю точку P' по формуле

$$\frac{dl}{dt} = -l \frac{d\varphi}{dt}, \quad (11)$$

где $l = ds^2$. Тогда, если путь перенесения масштаба конечен, интегрирование (11) дает для масштаба в точке P'

$$l_{P'} = l_P \exp \left(\int_P^{P'} \varphi_i dx^i \right). \quad (12)$$

Пусть теперь существует электростатическое поле, описываемое 4-й компонентой потенциала φ_i , $\varphi_4 = \varphi$ и связанное с некоторым статическим гравитационным полем ($\partial g_{ik}/\partial x^4 = 0$). Применяя формулу (12) в этом случае к покоящимся часам с периодом τ , получим

$$\tau = \tau_0 \exp(\alpha\varphi t), \quad (13)$$

где τ_0 — период часов в начальный момент, а α — некоторая постоянная, зависящая от природы часов [63, с. 272]. Полученное соотношение означает, что при переносе часов U из точки P_1 с потенциалом φ_1 в точку P_2 с потенциалом φ_2 за время t и при последующем их возврате обратно в P_1 , период их изменится (увеличится или уменьшится в зависимости от знаков α и разности $\varphi_2 - \varphi_1$) в $\exp(-\alpha(\varphi_2 - \varphi_1)t)$ раз по сравнению со скоростью хода идентичных часов U_0 , оставшихся в точке P_1 . Иначе говоря, период часов зависит бы от их предыстории. Такими часами могут служить атомы, излучающие свет определенной частоты и поэтому характеризующиеся определенными спектральными линиями. Даже при весьма малых значениях α потребовалось бы не слишком много времени, чтобы заметить эффект размазывания спектральных линий [63, с. 272] (имеется весьма условная количественная оценка эффекта, принадлежащая Эддингтону [41, с. 388]).

В своем ответе Эйнштейну, заключающем публикацию, Вейль попытался устранить отмеченное противоречие следующим образом. Он указал прежде всего на то, что при перемещении часов они могут испытывать сильные ускорения и потому уже не будут изме-

рять собственное время $\int ds$. Это, по его мнению, опосредствуется и к атому, побывавшему в сильном переменном электромагнитном поле. С уверенностью можно сказать об измерении часами собственного времени лишь в случае покоящихся часов в статическом гравитационном поле и при отсутствии электромагнитного поля. «О том же, как ведут себя часы при произвольном движении и одновременном действии произвольных гравитационного и электромагнитного полей, можно будет узнать лишь тогда,— писал Вейль,— когда будет разработана динамика, основывающаяся на физических законах». Пока такой динамики еще нет, следует, по его мнению, ограничиться «лишь наблюдением прихода световых сигналов как принципиальным основанием для измерения компонент g_{ik} » [133, с. 526].

Фактически Вейлю пришлось принять такую точку зрения: «Нужно учитывать, что математически идеальный процесс переноса вектора, который должен быть положен в основу математического построения геометрии, не имеет никакого отношения к реальному процессу движения часов, ход которых определяется законами природы» [там же]. Это означало, что метрическое поле (величины g_{ik} и φ_i) в теории Вейля нельзя непосредственно отождествить с показаниями линеек и часов. Геометрические основания теории тем самым лишались физического содержания. Правда, Вейлю удалось защитить теорию от обвинения ее в расхождении с опытом. Но в отличие от ОТО, в которой интервал ds^2 можно было сопоставить с непосредственными измерениями, геометрия Вейля оказывалась в значительной мере чисто формально-математической структурой.

Вместе с тем Эйнштейн высоко ценил теорию Вейля за ее «глубину и смелость» [132, с. 526]. Сам же Вейль главный аргумент в пользу своей теории видел в том, что она, следовательно развивая концепцию близкого действия в геометрии, единым геометрическим образом описывала физические поля: «Изложенная мною геометрия...— это настоящая „ближнегеометрия“ (wahre Nahegeometrie). Было бы удивительно, если бы в природе вместо нее реализовалась некая половинчатая и непоследовательная ближнегеометрия с приклеенным к ней электромагнитным полем (mit einem angeklebten elektromagnetischen Feld)» [133, с. 527].

Все же Вейль допускал возможность ошибочности своей теории и видел необходимость ее всестороннего сопоставления с опытом. Но он считал, что экспериментальной проверки должны подлежать следствия теории, прежде всего решения ее фундаментальных уравнений. «Но, конечно, я со своим подходом могу оказаться и на ложном пути. Здесь действительно речь идет о чистой спекуляции (reine Spekulation) и, само собой разумеется, необходимо сравнение с опытом. Для этого нужно вывести следствия из теории, и в таком трудном деле я надеюсь на помощь коллег» — этими словами Вейль заключил свой ответ Эйнштейну [там же]. Вопрос же об уравнении поля не был еще, как мы видели, решен однозначно.

Возражение Эйнштейна было серьезным аргументом физического характера против теории Вейля. Любопытно, что даже в начале 50-х годов, рассказывая о своей теории 1918 г., Вейль почти дослов-

но воспроизвел свой диалог с Эйнштейном. При этом его доводы в защиту теории остались, в сущности, теми же¹⁹, с учетом, конечно, последовавшего за открытием квантовой механики переосмысления на ее основе калибровочной симметрии и затем отказа Вейля от разработки программы ЕГТП (см. гл. 6 настоящей работы).

Отношение Эйнштейна к теории Вейля в 1918—1920 гг. в целом было отрицательным. Главным недостатком, как мы видели, он считал несоответствие геометрических оснований теории опыту. Свое возражение он очень четко сформулировал в Дополнении к первой статье Вейля. Интересно также привести в этой связи некоторые высказывания Эйнштейна из его переписки с самим Вейлем, М. Бессо, А. Зоммерфельдом, М. Борном и другими и из некоторых его статей 1918—1920 гг.

30 июня 1918 г. он писал Вейлю: «Можно ли, в самом деле, обвинить господина бога в непоследовательности за то, что он упустил найденную Вами возможность сделать физический мир гармоничным (вспомним вейлевскую аргументацию перехода к „чистой инфинитезимальной геометрии“ как к настоящей „геометрии близкого действия“ — В. В.)? Не думаю. Если бы он сотворил мир по-вашему, явился бы Вейль II и укоризненно произнес в его адрес: „Милый бог, уж коль скоро в твоём решении не предусматривалось придать объективный смысл конгруэнции бесконечно малых твердых тел и если они удалены друг от друга, то нельзя ли выяснить, конгруэнтны они или, нет, — почему же тогда ты не пренебрег сохранением этого свойства у угла? Если два бесконечно малых тела K и K' , первоначально совпадающие при наложении, более не совпадают после того, как K' описало круг в пространстве, почему во время этого кругового движения должно сохраниться подобие K и K' ? Естественно считать, что K' претерпевает относительно K произвольное аффинное (курсив наш. — В. В.) преобразование» [57, с. 137]. Мы привели такую большую выдержку потому, что в ней в развернутой и яркой форме содержится еще один сильный аргумент

¹⁹ Описав суть возражения Эйнштейна, Вейль заметил: «Но определение метрических отношений поля в эфире с помощью реальных масштабов и часов можно, конечно, рассматривать имеющими лишь предварительное, косвенное отношение к опыту. Лишь после того, как устанавливается величина действия, можно на его основе найти, в каком отношении находятся результаты измерения некоторых величин, характеризующих реальные тела, к фундаментальным величинам теории... У меня нет желания защищать теорию, в которую я уже давно больше не верю. Но я мог бы тогда с полным правом сказать, что теория — так сказать, задним числом — дает в лице радиуса кривизны мира абсолютную локальную меру масштаба, с которой можно согласовать спектральные частоты и другие величины, имеющие размерность длины (или длительности. — В. В.)» [18, с. 429]. В Дополнении к переизданию этой статьи, написанном в июне 1955 г., Вейль, подчеркнув пионерский характер статьи («Эта работа находится у истоков попыток построения единых теорий поля...»), упомянул, что «сильнейшим аргументом в пользу... теории, казалось, было то, что калибровочная инвариантность так же связана с законом сохранения электрического заряда, как координатная инвариантность с законом сохранения энергии-импульса» [134, с. 192].

против теории Вейля, имеющий логическую природу, который ранее не приводился.

Вместе с тем несколькими месяцами раньше Эйнштейн после ознакомления с корректурой первого издания книги Вейля «Пространство. Время. Материя» писал ему с восхищением: «Это как мастерски созданная симфония. Каждое слово гармонично связано с целым, а план всей работы грандиозен. Великолепный метод бесконечно малого параллельного переноса векторов для выведения тензора Римана! Как естественно все это делается!» [57, с. 136]. Теория Вейля, непосредственно примыкающая в геометрическом отношении к схеме построения книги, как мы помним, вызвала своим математическим совершенством восхищение Эйнштейна. «Вейль — гениальный, славный парень, но его взгляды на электричество никуда не годятся», — писал Эйнштейн Бессо в письме от 23 июня 1918 г.

В другом письме к Бессо (от 20 августа 1918 г.) Эйнштейн весьма подробно обсуждает теорию Вейля, критикует прежде всего с точки зрения соответствия ее геометрических оснований опыту (в духе рассмотренного ранее «возражения Эйнштейна») и указывает еще один уязвимый пункт: «Насколько мне известно, нет никаких физических оснований, говорящих за то, что она годится для гравитационного поля. Но против нее говорит то, что уравнения поля гравитации обретают четвертый порядок, к чему нет никаких предпосылок из имевшегося к настоящему времени опыта, и что нет в какой-либо степени приемлемой формулировки энергетического принципа, если функция Гамильтона для гравитационного поля содержит производные более высокого порядка, чем первый» [56, с. 85]. Действительно, четвертый порядок уравнений гравитации не имел физического оправдания и приводил как к вычислительным трудностям, так и к трудностям с законом сохранения энергии. Большинство эйнштейновских аргументов против теории Вейля носили, как мы видим, физический характер и были связаны либо с экспериментом, либо с фундаментальными физическими принципами методологического значения (необходимость опытного обоснования исходных положений теории, согласование с принципами сохранения энергии-импульса, соответствия и т. д.) [135]. Этому вполне созвучно знаменитое письмо Эйнштейна к Бессо от 28 августа 1918 г., в котором говорится о фундаментальном значении эксперимента в создании физической теории. Возможно, слова Эйнштейна о том, что «в действительности никогда и никому не удавалось найти истинно плодотворную и глубокую теорию чисто умозрительным путем» [56, с. 88], имели и полемический подтекст, адресованный теории Вейля.

О том, что физические допущения теории Вейля не выдерживают проверки опытом, несмотря на математическое совершенство теории, Эйнштейн писал и Зоммерфельду в сентябре 1918 г. [68, с. 202]. Примерно в это же время, по-видимому после ознакомления со второй статьей Вейля [130], Эйнштейн писал в письме к нему: «Для меня невыразимое удовольствие читать Ваши глубоко пролу-

манные работы... Что я думаю об отношении (теории.— В. В.) к действительности, Вы и сами знаете, мнение мое не изменилось. Я знаю, насколько легче убедить людей, чем отыскать истину, особенно такому выдающемуся мастеру изложения, как Вы» (цит. по: [57, с. 138]). Хотя в том же письме Эйнштейн дипломатично пишет Вейлю, что он «в конце концов... далек от зазнайства» и что он тоже может «ошибаться здесь, как ошибался бесчисленное количество раз»; в письме к Бессо от 4 декабря 1918 г. он пишет о своей «твердой убежденности» в отсутствии «инвариантной вейлевской меры в природе» [56, с. 92]²⁰.

В апреле 1919 г. Эйнштейн, несмотря на отрицательное отношение к теории Вейля, сам сделал попытку сформулировать некоторый вариант единой теории поля, основанной на ОТО и стремящейся свести частицы к полю (см. гл. 5 настоящей работы) [93]. Эйнштейна не устраивал предложенный Вейлем конкретный вариант синтеза гравитации и электромагнетизма, но сама идея геометрического объединения этих полей в целях выведения из объединенных уравнений «элементарных частиц материи» и их квантовых закономерностей, несомненно, произвела на него большое впечатление и все больше овладевала его мыслями.

В 1919 г., еще будучи студентом в Мюнхене у Зоммерфельда, теорию Вейля начал разрабатывать юный В. Паули (см. следующий раздел настоящей работы). В октябре 1919 г. Зоммерфельд сообщал Эйнштейну: «Паули рассчитывает движение перигелия Меркурия и искривление света по Вейлю. Может быть, ему удастся этим опровергнуть Вейля» [68, с. 207]. А 4 декабря 1919 г. Эйнштейн писал Эренфесту об одном из результатов Паули: «В работе Паули, посвященной теории Вейля, уже можно увидеть последствия существеннейшего изъяна этой теории: полное отсутствие статических решений при исчезающих электрических потенциалах. Мне трудно понять, как сам Вейль и все остальные не замечают тех положений, которые противоречат опыту» [57, с. 138]²¹. Об искусственности, даже вычурности вейлевского способа устранения трудности, связанной с «возражением Эйнштейна», Эйнштейн говорил в письме к Бессо: «Вначале вводятся данные (изменения масштабов потенциалом), а затем ценой огромных вычислительных усилий все кончается так, как было предусмотрено» [56, с. 93].

²⁰ Свидетельством терпимости, доброжелательного отношения Эйнштейна к коллегам является письмо Эйнштейна к Вейлю от 16 ноября 1918 г.: «...могу сказать Вам одно: все, с кем я беседовал, с большим уважением отзывались о Вашей теории с математической точки зрения, и я тоже восхищаюсь ей как созданием ума (курсив наш.— В. В.). Вам нет нужды бороться, по крайней мере со мной. Говорить о гневе с моей стороны действительно не приходится; подлинное восхищение, но также и скептицизм — таковы ощущения, которые вызывает во мне вся эта история... Когда окажемся друг подле друга в Цюрихе, мы уже поладим с помощью или без помощи градиентной инвариантности» [57, с. 139].

²¹ Об этом же он сообщал Бессо (в письме от 12 декабря 1919 г.): «Относительно теории Вейля постепенно выясняется, что не существуют статические решения с отличными от нуля различными электростатическими потенциалами (ср. работу Паули в „Phys. Z.“)» [56, с. 93].

В. ПАУЛИ И ТЕОРИЯ ВЕЙЛЯ: ОТ АКТИВНОЙ ПОДДЕРЖКИ К КРИТИКЕ (1919—1920)

Несмотря на то что курс теории относительности в Мюнхенском университете предполагался лишь во 2-м семестре 1918/19 г., студент философского факультета В. Паули уже в декабре 1918 г. выступил на семинаре у Зоммерфельда с сообщением по общей теории относительности (ОТО) [136, с. 10]. Эту теорию он изучил еще в Вене до поступления в университет и тогда же написал статью о законе сохранения энергии-импульса в ОТО, опубликованную в начале 1919 г. в «Physikalische Zeitschrift» (первая публикация Паули) [137]. В этой работе вслед за Э. Шредингером, Г. Бауэром, Э. Кречманом были отмечены трудности корректного определения энергии и импульса в ОТО, связанные с нетензорным характером компонент энергии-импульса гравитационного поля.

Теория Вейля сразу же вызвала у Паули живой интерес. Его привлекали грандиозность вейлевского замысла и математическое совершенство теории. Вместе с тем физические аспекты теории оставались неразработанными. Этому и посвятил Паули свою первую статью по теории Вейля, поступившую в редакцию «Physikalische Zeitschrift» в июне 1919 г. [138], и вторую работу на эту тему, законченную в ноябре 1919 г. [139]. Основным предметом первой статьи был анализ космологических следствий теории. Паули удалось показать, что при естественных космологических предположениях, характерных для эйнштейновской космологии, уравнения теории Вейля дают пространство постоянной положительной кривизны, т. е. приводят к замкнутости мира, без введения космологического члена. В этой особенности теории Паули видел ее «существенное достоинство» [63, с. 280]. Другим важным физическим результатом было установление зарядовой симметрии уравнений Вейля, в чем Паули усматривал определенный физический изъян теории: «До тех пор пока в теории не появится совершенно новый принцип (который каким-то образом мог бы нарушить отмеченную симметрию.— В. В.), надежды на объяснение большого различия в массах атомного ядра и электрона придется оставить» [136, с. 11]²². В связи с этим можно вспомнить, что именно в 1919 г. Резерфорд в опытах по искусственному превращению ядер получил протоны, которые он называл «положительными электронами» [140, с. 111].

Паули послал свою работу Вейлю, который в ответном письме (от 10 мая 1919 г.) с большой радостью приветствовал одаренного приверженца своей теории и поражался тому, что в столь юные годы можно так глубоко проникнуть в теоретико-познавательные стороны проблемы и обладать такой свободой научного мышления [136, с. 12] (см. также [141, с. 3]).

²² Об этом же он писал в своей классической статье, опубликованной в 1921 г. в клейновской «Энциклопедии математических наук»: «... дифференциальные уравнения ... (теории Вейля.— В. В.) одинаковы для обоих родов электричества ... так что действительные совершенно асимметричные соотношения, во всяком случае передаются ими неверно» [63, с. 281].

Во второй, ноябрьской статье Паули исследовал два экспериментально проверяемых эффекта теории Вейля, хорошо известные в ОТО: аномальное движение перигелия Меркурия и отклонение света в поле тяготения. Объяснение аномальной прецессии Меркурия явилось первым экспериментальным подтверждением ОТО. Второй же эффект был обнаружен в наблюдениях солнечного затмения 29 мая 1919 г. двумя британскими группами астрономов, руководимыми Эддингтоном, Дайсоном и Дэвидсоном. Если бы теория Вейля (с полевыми уравнениями гравитации 4-го порядка) давала для этих эффектов результаты, не совпадающие с результатами ОТО, она оказалась бы физически неудовлетворительной²³. Но Паули показал, что решение Шварцшильда для статического, сферически симметричного поля материальной точки является решением также и полевых уравнений теории Вейля (в случае отсутствия электромагнитного поля). Это означало, что оба эффекта остаются в силе в этой теории. Прямых противоречий следствий теорий с опытом, таким образом, обнаружено не было, хотя при наличии электромагнитного поля статические решения, по видимому, отсутствовали²⁴.

Серьезным аргументом против экспериментальных оснований теорий продолжало оставаться «возражение Эйнштейна» (его детально проанализировал Паули в своей энциклопедической статье [63, с. 271—273]). Но в обсуждаемой статье он выдвинул еще один физический аргумент против теории Вейля, относящийся, впрочем, ко всем классическим единым теориям поля: «В теории Вейля мы постоянно оперируем с напряженностями поля внутри электрона. Но с физической точки зрения напряженность поля определяется как сила, действующая на пробный заряд. Поскольку же пробных тел, меньших электрона, не существует, понятие напряженности электрического поля в некоторой точке (внутри электрона.— *В. В.*) представляется пустой, лишенной содержания фикцией. Хотелось бы, однако, настаивать на том, чтобы в физику вводились только принципиально наблюдаемые величины» [136, с. 12]. Этот аргумент против классических полевых теорий элементарных частиц Паули почти дословно перенес в свою энциклопедическую статью. Глубокая мысль Паули, в какой-то мере обозначающая переключение его интересов в сторону квантовой, атомистической концепции, не встретила понимания со стороны Вейля [136, с. 12]. Но и Эйнштейн не поддержал этот довод Паули. В письме к Борну от 27 января 1920 г. он писал: «Возражение Паули направлено не только против теории Вейля, но и против любой другой континуальной (или полевой.— *В. В.*) теории, а также против идеи рассматривать электрон как сингулярность... Я не верю в то, что теории придется отказаться от континуальных представлений» [89, с. 16].— продолжал Эйнштейн в письме к Борну от 3 марта 1920 г. отстаивая свою програм-

²³ Можно думать, что, приступая к этой работе, Паули был уже более скептически настроен по отношению к теории Вейля (сравни с замечанием Зоммерфельда в цитированном выше письме к Эйнштейну в октябре 1919 г.).

²⁴ Об этом результате Паули Эйнштейн писал в цитированном выше письме к Эрнесту в начале декабря 1919 г.

мную установку, которую в это время разделял и Вейль. Борну, однако, эта мысль Паули была близка, так как она перекликалась с его собственными идеями о невозможности простого перенесения макроскопических пространственно-временных представлений в физику микромира. Об этом он сообщал Паули в письме от 23 декабря 1919 г., в котором также приглашал его к себе в Институт теоретической физики Франкфуртского университета [136, с. 13]. Через два года Паули стал ассистентом Борна, но уже в Геттингене, где они вместе разрабатывали проблемы квантовой теории.

Личное знакомство Паули с Вейлем и Эйнштейном состоялось на 86-м съезде немецких естествоиспытателей в Науегейме в сентябре 1920 г., на котором, кстати говоря, достигла апогея дискуссия между сторонниками теории относительности (Эйнштейн, Лауэ, Борн, Вейль и др.) и ее противниками (Ленард, Ми, Палагий и др.) [142]. В дискуссии по докладу Вейля «электричество и гравитация», в котором докладчик стремился ослабить следствия «возражения Эйнштейна», которые, казалось, вели к противоречию его теории с опытом, выступил Паули со своим возражением, адресовав его, однако, не Вейлю, а Эйнштейну [143]. Приведя свое рассуждение, показывающее физическую несостоятельность понятия напряженности поля внутри электрона, и дополнив его аналогичным соображением о невозможности измерения пространства на расстояниях, меньших размера электрона («...ибо не существует сколь угодно малых масштабных линеек» [144, с. 371]), двадцатилетний Паули поставил перед присутствующими кардинальную дилемму: оставаться ли на континуалистских, чисто полевых позициях при решении проблемы материи или разрабатывать и углублять квантовую концепцию, не останавливаясь, возможно, перед модификацией представлений о пространстве, времени и поле, признающей фундаментальное значение дискретности²⁵. Ответ был достаточно гибким; Эйнштейн признавал возможность реализации обеих альтернатив, хотя, как мы знаем из его переписки этого времени и из его работ по проблеме ЕГТП, он предпочитал сохранить континуалистский подход. На этих же позициях оставался и Вейль. Разногласия между лидерами полевой геометрической программы синтеза физики (Вейлем и Эйнштейном, который к этому времени фактически стал на позиции этой программы (см. гл. 4)) относились лишь к форме реализации программы²⁶. Паули же, начавший свои

²⁵ «Я хотел бы спросить профессора Эйнштейна, согласен ли он с тем, что следует ожидать решения проблемы материи лишь от модификации наших представлений о пространстве (может быть, и о времени) и электрическом поле в смысле атомизма, или он считает приведенные сомнения неосновательными и полагает, что следует придерживаться непрерывных теорий» [144, с. 371].

²⁶ Заметим, что в Науегейме Эйнштейн видоизменил свое возражение против теории Вейля. Здесь он, учитывая отмеченную выше контраргументацию Вейля, говорил не о расхождении теории с опытом, а о том, что отказ «... от этого эмпирически оправданного сопоставления ... лишает теорию одной из самых надежных эмпирических опор и возможности проверки» [144, с. 372].

исследования как активный сторонник этой программы, очень скоро (вероятно, уже к концу 1919 г.) обнаружил серьезные симптомы ее ограниченности, которые стали очевидны только после создания квантовой механики.

Энциклопедическая статья Паули, законченная в конце 1920 г. и опубликованная в 1921 г., вместе с подробным изложением теории Вейля суммировала основные критические замечания в ее адрес (включая «возражение Эйнштейна») [63, с. 267—281]. Связанный с этим «возражением» отказ Вейля от истолкования «идеального процесса конгруэнтного перенесения мировых отрезков» с помощью масштабов и часов и тем самым отказ от установления непосредственной связи между метрическим полем и показаниями этих измерительных приборов Паули считал «чрезвычайно большим недостатком» [63, с. 272]. «Он лишает,— продолжал Паули,— с физической точки зрения теорию Вейля — хотя она не стоит в прямом противоречии с опытом — ее внутренней убедительности... Связь между электромагнетизмом и метрикой мира оказывается уже не физической, а чисто формальной... Между электромагнитными явлениями и поведением масштабов и часов в этом понимании теории уже нет непосредственной связи; такая связь имеется лишь между электромагнитными явлениями и идеальным процессом, определенным как конгруэнтное перенесение вектора» [там же].

Причина столь резкого различия между гравитацией и электромагнетизмом заключалась, по мнению Паули, в том, что «связь между метрикой мира и электрическими явлениями имеет под собой лишь формальное, а не физическое основание, в противоположность связи между метрикой и тяготением, которая имеет в факте равенства шпёртной и тяжелой масс надежную эмпирическую опору и является необходимым следствием принципа эквивалентности и специальной теории относительности» [там же].

Теория Вейля утрачивала также такое важное достоинство ОТО, как отождествление мировых линий материальных точек и световых лучей с геодезическими линиями. Еще более серьезной трудностью была проблема уравнений гравитационного поля. Приходилось отказываться от уравнений Эйнштейна и использовать лагранжиан квадратичного типа, который приводил к уравнениям 4-го порядка. Правда, Паули, как мы видели, удалось показать (для лагранжиана $L = \frac{1}{2} F_{ik} F^{ik} + c R_{hijk} R^{hijk}$, что теория Вейля дает правильный результат для движения перигелия Меркурия и искривления света в гравитационном поле²⁷. За несколько лет после создания теории Вейля ей так и «не удалось приблизиться к решению проблемы материи» [63, с. 281]. И в этом Паули усматривал еще один важный изъян теории. Более того, и выступление Паули в Наугейме в сентябре 1920 г. и заключительная фраза параграфа о теории Вейля в энциклопедической статье вместе с последним

²⁷ Паули нашел, что соответствующие решения полевых уравнений Эйнштейна являются также (при отсутствии электромагнитного поля) решениями гравитационных уравнений теории Вейля.

параграфом (§ 67)²⁸ говорили о полной переориентации Паули и его переходе с позиций ЕГТП на позиции квантово-теоретической программы.

В этом (последнем) параграфе он резюмировал основные трудности чисто классических полевых подходов к решению проблемы материи, в том числе и подхода, основанного на ЕГТП-программе (конкретно речь в статье Паули шла о теориях Ми, Вейля и о эйнштейновской теории 1919 г., которая будет рассмотрена в следующей главе). «Их общая неудача побуждает нас тщательно обсудить те недостатки и трудности, которые являются общими для всех трех теорий» [63, с. 285]. Четко сформулировав задачу-максимум полевой программы²⁹, Паули делает поразительно глубокое замечание: «Ясно, что дифференциальные уравнения, обладающие такими свойствами (т. е. свойствами, перечисленными в примечании.— В. В.), должны быть исключительно сложными. Нам кажется, что это усложнение законов природы само по себе говорит против теорий поля, так как с физической точки зрения нужно требовать, чтобы простой и фундаментальный факт атомизма заряда объяснялся теорией просто и элементарно, а не появлялся в качестве некоего аналитического фокуса» (курсив наш.— В. В.) [там же]. В этом весьма резко замечании в адрес полевых теорий материи (и программы ЕГТП) чувствуется и некоторое раздражение бывшего приверженца теории Вейля против ее чрезмерной математической сложности (при значительной утрате «физичности» даже по сравнению с ОТО), и выдающаяся критическая мощь будущего Паули (как писал Н. Бор накануне 60-летия Паули, «он все более и более становится самой совестью сообщества физиков-теоретиков», «...все с нетерпением хотели узнать мнение Паули о новых открытиях и идеях...» [145, с. 14]).

Против полевых теорий, пытающихся объяснить устойчивость заряженных элементарных частиц действием гравитационных сил (а именно к таким теориям относились фактически теории, основанные на программе ЕГТП), как заметил далее Паули, «говорит следующий эмпирический аргумент»: «В этом случае нужно было бы ожидать, что тяжелая масса и заряд электрона находятся в простом численном отношении. В действительности же соответствующая безразмерная величина $e/m\sqrt{k}$ (k — обычная гравитационная постоянная) имеет порядок 10^{20} !» [63, с. 285].

Паули также считал, что общековариантные уравнения поля не могут воспроизвести «асимметрию (различие масс) обоих родов электричества».

²⁸ «Многое говорит за то,— писал он, заканчивая разбор теории Вейля,— что решение проблемы материи вообще не может быть найдено на этом пути» [63, с. 281].

²⁹ «Целью всех теорий поля является сведение атомизма электричества к существованию у дифференциальных уравнений поля дискретного числа везде регулярных, статических, сферически-симметричных решений и при этом по одному такому решению для положительного и для отрицательного видов электричества» [63, с. 285].

Наконец, последний аргумент Паули против полевых теорий в связи с их попытками решения проблемы материи заключался в отсутствии, по его мнению, операционального, физического смысла понятия классического поля внутри самих частиц: «Поле внутри частиц представляется принципиально ненаблюдаемым и, таким образом, физически бессмысленным, фиктивным понятием». «Если сопоставить все приведенные аргументы,— делал вывод Паули,— то становится ясным, что для удовлетворительного решения проблемы материи основы созданных до сих пор теорий должны быть дополнены новыми элементами, чуждыми понятию непрерывности поля» [63, с. 286].

ВЫВОДЫ

Итак, через два с половиной года после завершения основ ОТО и единой (но лишь частично геометризованной) полевой теории Гильберта Г. Вейль, ученик Гильберта и продолжатель геттингенской традиции «математической физики», впервые реализовал программный замысел, содержащийся в ОТО. Ему удалось так обобщить риманову геометрию, что два известных в то время поля, гравитационное и электромагнитное, можно было рассматривать как геометрические феномены. Объединение полей не носило редукционистского характера: ни одно из них не сводилось к другому. Оба рассматривались как равноправные проявления «мировой метрики». При этом предполагалось в духе теорий Ми и Гильберта, что и «проблема материи» должна найти свое решение на основе уравнений единого «метрического» поля. Нужно было только найти соответствующие «частицелодобные» решения этих уравнений.

Эйнштейн, казалось бы, должен был с энтузиазмом принять замысел Вейля. Но именно он первым выдвинул возражения физического характера против теории Вейля. Геометризация электромагнитного взаимодействия не имела таких же прочных эмпирических корней, как в случае гравитации (в электродинамике отсутствовало соотношение, подобное факту равенства инертной и гравитационной масс). В конечном счете это вело к необходимости постулировать идеальный характер связи электромагнетизма с геометрией и невозможности проверить ее посредством физических измерений.

Юный Паули пытался усилить физическую компоненту теории Вейля, но вскоре (не позже середины 1920 г.) пришел к выводу о наличии непреодолимых трудностей ее при решении «проблемы материи»; этот его вывод касался не только теории Вейля, но и вообще всех классических полевых теорий, в частности и основанных на программе ЕГТП. Паули считал неизбежным введение в теорию аспекта дискретности с самого начала. Фактически он имел в виду тот или иной вариант квантово-теоретической программы.

Но в 1920 г. позиции ЕГТП-программы, первой образцовой теорией которой стала теория Вейля, были достаточно прочными. 1921 год принес целую серию теорий, созданных по образу и подобию вейлевской теории.

Интересно, что первая единая геометризованная теория поля, фактически породившая программу ЕГТП в целом, была разработана не Эйнштейном — творцом геометрической концепции физических взаимодействий и безусловным приверженцем «теоретико-полевого идеала единства» физики — и не Гильбертом — автором первой единой теории поля, основанной на ОТО. Обсуждая предшествующую научную деятельность Вейля, определяющее влияние на него геттингенских традиций и особенно Гильберта и Клейна, непосредственные контакты с Эйнштейном, философские увлечения Вейля, его интерес к интуиционизму, мы пытались показать, что Вейль был не случайной фигурой в рассматриваемой истории. Во многих его математических (особенно в области геометрии, оснований и эпистемологии математики) и физических исследованиях, в философских размышлениях в конце второго десятилетия XX в. имели место определенные тематические созвучия, в какой-то мере объясняющие, почему именно Вейль оказался автором первой единой геометризованной теории поля.

Глава четвертая

1921 год — узел в развитии единых геометризованных теорий поля

ВВЕДЕНИЕ

До 1921 г. теория Вейля оставалась, по существу, единственной единой геометризованной теорией поля. Поэтому говорить об исследовательской программе ЕГТП как об историко-научной реальности до этого времени было явно преждевременно. Действительно, некоторая концепция приобретает характер исследовательской программы, когда на ее основе разрабатывается целая серия различных теоретических схем.

Именно такого рода ситуация и возникла в рассматриваемой области в 1921 г. Теория Вейля продолжала оставаться в центре внимания исследователей, несмотря на критику ее физических оснований со стороны прежде всего Эйнштейна и Паули. Сам Вейль в 1921 г. набрасывает новый вариант своей теории, который выглядит менее уязвимо. Параллельно с этим А. С. Эддингтон в Кембридже выдвигает свою «аффинную» единую теорию поля, в которой основное значение имели не метрические величины, а коэффициенты аффинной связности. Эйнштейн также пытается модифицировать теорию Вейля и предлагает свой вариант ее обобщения, связанный с признанием фундаментального значения отношений компонент $g_{\mu\nu}/g_{\lambda\sigma}$ (а не самих этих компонент $g_{\mu\nu}$) и с отказом не только от независимости длины масштабов от пути их переноса, но и от предположения о существовании самих этих масштабов. Эддингтон закончил свою основную статью в феврале 1921 г., а Эйнштейн — в марте. Наконец в декабре появляется еще один вариант единой геометризованной теории поля, опирающийся на пятимерную риманову геометрию. Это была знаменитая теория Т. Калуцы, открывшая направление пятимерных геометрических конструкций. Все эти теории, впрочем, следовали эйнштейновскому замыслу геометризации поля и вейлевской концепции геометрического синтеза полей. Эта множественность теорий, разрабатываемых в духе теории Вейля, и позволяет говорить о возникновении именно программы единых геометризованных теорий поля (ЕГТП) или о превращении проекта этой программы в реальный феномен исторического процесса развития научного знания.

Несколько забегаая вперед, опишем кратко основные особенности программы ЕГТП. Отчетливое представление о ней, впрочем, дает теория Вейля, первый вариант которой детально был рассмотрен в предыдущей главе. В своем «максималистском» выражении программа ЕГТП (т. е. понимаемая как «программа-максимум») была,

безусловно, глобальной. Иначе говоря, она была нацелена на решение наиболее фундаментальных проблем физики на основе построения единой физической теории. В этом отношении она шла по следам классико-механической и электромагнитно-полевой программ. Начиная с объединения гравитации и электромагнетизма на геометрическом фундаменте («программа-минимум») она стремилась затем объяснить корпускулярные формы материи и квантовые свойства излучения и вещества. Таким образом, на первый план выдвигалась геометрия пространственно-временного континуума, проявляющая себя также в виде классических полей. При этом дискретность, присущая многим физическим явлениям (атомистика, электронная физика, квантовая теория), предполагалась вторичной и сводимой к континуальности (классические поля, рассматриваемые как проявление единого пространственно-временного континуума). С одной стороны, способ этого сведения восходил к традициям электромагнитно-полевой программы, пространственно-временной континуум уподоблялся электромагнитному эфиру, а частицы должны были интерпретироваться как некоторые «сгустки», «вихри», «узлы» и прочие частиценодобные образования непрерывной среды. С другой стороны, основные уравнения единого поля, явно нелинейные, имеющие большое число полевых переменных (от 14 до 40), а также, возможно, порядок, больший второго, должны были оказаться настолько сложными, чтобы содержать в себе тем или иным образом частиценодобные решения вместе с квантовыми особенностями их поведения. Эти уравнения должны были определяться теоретико-инвариантными свойствами геометрии пространственно-временного континуума. Таким образом, отыскание подходящей математической структуры (различные типы геометрий аффинной связности, пятимерные римановы геометрии и т. д.) позволило бы, казалось, в дальнейшем чисто дедуктивным путем вывести все многообразие физических явлений. Помимо геометризма и континуализма, в программе ЕГТН, таким образом, содержалась также идея соответствия структуры физической реальности некоторой идеальной, математической структуре (условно — идея «предустановленной гармонии» между двумя этими структурами) и концепция классического детерминизма. Последняя особенность была связана с тем, что состояние физической системы в ОТО и единых теориях описывалось конечным набором полевых переменных (например, гравитационных и электромагнитных потенциалов) в некоторой пространственно-временной точке, а эволюция этого состояния — системой дифференциальных уравнений в частных производных.

Дискретный и вероятностный характер многих физических явлений, особенно в области атомной физики, с точки зрения этой программы был вторичен, сводим к континуальным и детерминистическим структурам. В поисках адекватной геометрии мира и связанных с ней дифференциальных уравнений единого поля экспериментальные аспекты отодвигались явно на второй план. В подавляющем большинстве они должны были выполнять лишь функцию пробного камня теоретических построений. Многообразие

решений основных уравнений должно было в конечном счете совпасть с многообразием наблюдаемых явлений. Главная, творческая роль в реализации программы ЕГТП приписывалась математике, именно геометрии, и некоторым фундаментальным принципам физики, граничащим с методологическими принципами (причинности, симметрии, простоты, сохранения и т. д.).

Итак, характерными чертами программы ЕГТП были: установка на единство физического знания (в ее максималистском выражении), т. е. на построение единой физической теории; идея «предустановленной гармонии» между математическими структурами и физической реальностью, приписывание основной творческой роли математике; континуализм (первичная реальность — классическое поле); геометризм (классические поля геометризуются, подобно гравитационному полю в ОТО, и единое поле отождествляется, в сущности, с пространственно-временным континуумом); классический детерминизм (естественно связанный с классическим характером единого поля).

Добавим, что и ОТО, и программа ЕГТП были также неразрывно связаны с расширением принципа относительности, т. е. идеи релятивизма и инвариантности (симметрии), бесспорно, относились к числу стержневых идей программы ЕГТП. Поскольку теории, основанные на этой программе, ставили своей целью выявление первичных, изначальных, фундаментальных физических сущностей и связанных с ними математических структур, то можно сказать, что ей был также присущ фундаментализм. Конечно, любая глобальная исследовательская программа, например классико-механическая или электромагнитно-полевая, наиболее полно выражает тенденцию к единству, синтезу и обладает свойством фундаментализма. Эти особенности отсутствуют, как правило, у программ, претендующих на глобальность и ставящих перед собой более частные задачи.

Несмотря на теоретическую привлекательность программы ЕГТП, успехи ОТО, лежащей в основе этой программы (наблюдательные подтверждения, космология), подавляющее большинство физиков в начале 20-х годов предпочитали работать в русле более локальных программ. Одна из них, впрочем, приобретала все более глобальный характер. Речь идет о квантово-теоретической программе, нацеленной на построение последовательной квантовой теории атомов и излучения.

КВАНТОВО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

Опишем вкратце состояние квантовой теории в 1921 г., затем в общих чертах охарактеризуем квантово-теоретическую программу.

Нет общепринятой точки зрения на то, когда старая квантовая теория вступила в состояние кризиса. Гейзенберг, например, в 1927 г. (т. е. вскоре после разрешения этого кризиса), считал, что переломным был 1923 год. До этого времени, по его мнению, теория

развивалась весьма успешно, хотя «Бор сам обратил внимание на существование этих границ (т. е. границ „новых земель... где логические трудности преграждали новое продвижение“) уже в первой своей работе, посвященной атому водорода» [146, с. 113].

Другой участник описываемых событий — Ф. Хунд таким переломным считал 1921—1922 гг., а именно 1921 год был, с его точки зрения, «своего рода апогеем квантовой теории», а в 1922 г. «уже говорили о кризисе» [147, с. 87—88]. В сентябре 1921 г. один из основоположников квантовой теории — А. Зоммерфельд писал Эйнштейну о том, что введение внутренних квантовых чисел позволило выяснить «детали квантовых волшебств в спектрах» и что тем самым «в спектроскопию приходит день или, вернее, рассвет» [68, с. 228—229]. И вместе с тем он признавал, что, хотя в деталях «все ладится», «глубокие основания (квантовой теории.— В. В.) остаются неясными» (из письма к Эйнштейну от 11 января 1922 г. [68, с. 228—229]). В третьем издании знаменитой книги Зоммерфельда «Строение атомов и спектры», законченном к началу 1922 г., хотя и звучали оптимистические ноты, в то же время подчеркивался эмпирический характер квантово-теоретической систематики спектров [148].

Успехи спектроскопии, опирающиеся на квантовую теорию, были действительно впечатляющими. «К 1921 г.,— писал впоследствии Хунд,— систематика простых спектров по n , l была понята и по порядку величин» [147, с. 80—81]. В 1920 г. Зоммерфельд, введя внутреннее квантовое число j , открыл формальный путь к объяснению «тонкой структуры» термов. Его идеи в 1921 г. были использованы А. Ланде и Н. Бором, связавшими это квантовое число с полным угловым моментом атома («К 1921 г. структура термов простых спектров была объяснена на основе модельных соображений как результат взаимодействия углового момента орбиты и остатка» [147, с. 83]). В том же году Г. Вентцель завершил систематику рентгеновских спектров на основе тех же квантовых чисел n , l , j .

Однако наибольшим триумфом старой квантовой теории справедливо считалось разработанное Бором в 1921 г. объяснение свойств элементов периодической системы. Хунд писал, что оно было воспринято «как своего рода апогей квантовой теории». Бор при этом опирался на систематику простых спектров и принцип соответствия, которым пользовался весьма виртуозно.

Третий Сольвеевский конгресс, происходивший в апреле 1921 г., выступление Бора в Копенгагене в октябре 1921 г. и особенно «фестиваль Бора» в Геттингене, намеченный на весну 1921 г., но состоявшийся в июне 1922 г., явились как бы подведением итогов развития квантовой теории, которая достигла к этому времени «апогея» и вместе с тем вскоре обнаружила явные и все более тревожные признаки кризиса. Молодое поколение, например Паули и Гейзенберг, воспринимали теорию Бора не с таким уж оптимизмом. Гейзенберг, вспоминая геттингенский «фестиваль», писал впоследствии, что теория Бора представлялась ему в значительной мере

качественным, нестрогим и незаконченным построением: «Непосредственно ощущалось, что свои результаты Бор получил не путем подсчетов и доказательств, а путем вчувствования и догадок, и что теперь ему нелегко защищать их перед высшей математической школой в Геттингене» [149, с. 59; 150, с. 61]. В беседе Гейзенберга с Бором, состоявшейся во время их совместной прогулки по окрестностям Геттингена и столь сильно повлиявшей на Гейзенберга, Бор, по воспоминаниям Гейзенберга, ясно понимал предварительный характер старой квантовой теории и ясно видел многие ее трудности. «Эти образы,— говорил Бор, имея в виду свою реконструкцию элементов периодической системы,— выведены, или, если вам угодно, угаданы, исходя из имеющихся сведений, а не получены с позиций каких-либо теоретических расчетов. Я надеюсь, что эти картинки описывают структуру атома столь точно, но в то же время и лишь настолько точно, сколь это возможно, пользуясь наглядным языком классической физики» [149, с. 63; 150, с. 65]. В ответ на эти слова Гейзенберг заметил, что физика все-таки должна быть точной наукой и что сложившуюся систему нельзя считать удовлетворительной. Бор согласился и сказал: «Остается ожидать, что парадоксы квантовой теории, непонятные черты, связанные с устойчивостью материи, с каждым новым открытием будут выступать во все более ярком свете. Если это произойдет, то можно надеяться, что с течением времени возникнут новые понятия, с помощью которых мы сможем так или иначе понять и эти не допускающие наглядности процессы в атоме. Однако до этого нам еще далеко» [149, с. 63; 150, с. 66].

Кстати говоря, даже и в 1924 г. большинство физиков думали точно так же, считая, что с этой эклектической теорией, за которой впоследствии закрепилось название «старая квантовая теория», придется иметь дело еще в течение очень долгого времени. М. Борн, закончив в ноябре 1924 г. подготовку к изданию своих «Лекций по атомной механике», содержащих изложение теоретических основ квантовой теории, как раз накануне возникновения квантовой механики, назвал их первым томом и заметил, что вторым том, в котором он намеревался дать строгое дедуктивное изложение квантовой теории, «вероятно, еще много лет останется ненаписанным» [151, с. 3]. Но, как известно, не прошло и года, как Борн (вместе с Иорданом) разработал, опираясь на гениальную работу Гейзенберга, первый вариант такой «дедуктивной» теории, названной впоследствии матричной формулировкой квантовой механики.

Вернемся, однако, к событиям 1921 г. Накопление эмпирических успехов, достижений формального и качественного характера продолжалось. Некоторые из них были весьма существенными, хотя полное свое объяснение получили только после создания квантовой механики. О. Штерн предложил эксперимент по прямой проверке принципа «пространственного квантования» при изучении движения атомов в неоднородном магнитном поле. Соответствующие опыты вскоре были успешно поставлены им вместе с Терлахом. Тем самым было установлено также квантование магнитного момента у атомов.

В 1920—1921 гг. были открыты дублетные и триплетные термы и их расщепление в магнитном поле (аномальный эффект Зеемана). Тогда же Э. Бак и А. Ланде разработали систематику этого эффекта. Размышляя над аномальным эффектом Зеемана, Гейзенберг в конце 1921 г. впервые обнаружил половинные квантовые числа, что казалось в свете старой квантовой теории весьма загадочным обстоятельством. «...Полученные мною результаты,— вспоминал он впоследствии,— были в высшей степени неожиданными. Вместо целых чисел мне пришлось в качестве квантовых чисел допустить также и их половинны, что совершенно противоречило духу квантовой теории и зоммерфельдовской мистике целых чисел» [149, с. 55; 150, с. 57]. Примерно через полтора года на основе работ Бака, Ланде и Гейзенберга возникла векторная модель Ланде, объяснявшая феноменологическую систематику мультиплетов и их зеемановских расщеплений. На этом пути физики вплотную подошли к открытию спина.

Но успехи теории были неразрывно связаны и с ее трудностями. Кризисные явления отмечались многими и в год «апогея» старой квантовой теории. «Гордость и сомнения,— писал впоследствии об этом Ф. Хунд,— были неразлучны» [147, с. 8]. Все же кризисные черты перед лицом непрекращающегося прогресса квантово-теоретической программы, особенно в области истолкования атомных спектров и периодической системы элементов, отодвигались на второй план, по крайней мере до 1922—1923 гг., когда дальнейшее продвижение вперед существенно замедлилось.

Главным противоречием старой квантовой теории, которое и до начала 20-х годов осознавалось многими (прежде всего самим Бором), было использование понятий и аппарата классической механики и электродинамики в области, где они были в принципе неприменимы. Как писал М. Борн в 1924 г., «применение классической теории к атомным процессам приводит к противоречию со стабильностью (атома.— В. В.), благодаря чему возникает задача создать одну „атомную механику“, не содержащую этих противоречий» [151, с. 3]. Несмотря на это, теория, особенно в руках самого Бора, продолжала приносить все новые плоды. Гейзенберг объяснял это впоследствии (в 1927 г.) так: «Характерным для исследований Бора было то, что он применял понятия классической механики качественно и только в той степени, в какой их применимость могла быть обоснована принципом соответствия. Только эта свобода обращения с понятиями классической механики — или, лучше сказать, по отношению к тем следствиям из классической физики, которые из них вытекали,— позволила установить связь между химическими и спектроскопическими свойствами атомов» [146, с. 114]. Так, квантовая теория периодического и многократно периодического движения опиралась на классическое понятие фазового интеграла $\oint pdq$. Но, как показал Эренфест в своем докладе на 3-м Сольвеевском конгрессе в 1921 г., в ряде случаев квантование с помощью фазового интеграла приводит к явным противоречиям, в то

время как принцип соответствия в этих же ситуациях дает правильный результат. Хунд вспоминал в этой связи: «Бор также был склонен не воспринимать фазовый интеграл слишком буквально, и в Геттингене имелся своего рода лозунг или тост: „Да здравствует принцип соответствия, долой $\int p dq!$ “» [147, с. 71]. «Если изучать работы по теоретической физике, написанные в это время,— писал в 1927 г. Гейзенберг о начале 20-х годов,— то мы ясно увидим, как происходило постепенное расшатывание классических понятий, постепенное освобождение от предрассудков, унаследованных от старой физики, которые, как становилось очевидным, и были причиной противоречий» [146, с. 118].

Это основное противоречие особенно остро проявлялось, например, в теории дисперсии. П. Эпштейн в 1921 г. отметил, что вычисление частот, характерных для дисперсии, приводит к частотам обращения по стационарным орбитам и что это расходится с наблюдаемыми в действительности квантово-теоретическими частотами поглощения и испускания. В 1921 г. перспективным казалось направление, связанное с применением теории возмущений к более сложным чем атом водорода, системам, например к атому гелия или иону молекулы водорода. Гейзенберг, вспоминая свои разговоры с Паули в 1921 г., писал: «Вольфганг задался очень трудной задачей. Он хотел проверить, ведут ли теория Бора и квантовые условия Бора — Зоммерфельда к экспериментально верным результатам тогда, когда речь идет о более сложной системе, рассчитать которую было возможно, используя астрономические методы. Дело в том, что во время наших мюнхенских дискуссий мы задумывались над тем, не ограничены ли предыдущие успехи теории крайне простыми системами и не постигнет ли теорию неудача уже при изучении более сложных систем, которые собирался рассмотреть Вольфганг» [149, с. 56; 150, с. 58]. Эти работы уже проводились Борном и его сотрудниками, к которым затем примкнул и Паули, а также Эпштейном, применявшим теорию возмущений к задачам о внешнем периодическом возмущении и дисперсии света. То, что этот путь также ведет в тупик, стало ясно в 1922—1923 гг., когда сначала Крамерс рассчитал основное состояние атома гелия и получил неверное значение энергии ионизации, а затем Борн и Гейзенберг получили расхождение с опытом для возбужденных состояний атома гелия, рассчитанных на основе теории возмущений. Расчет состояний молекулярного иона водорода H_2^+ , проведенный Паули в 1922 г., также не дал согласия со спектроскопическими термами.

Не получали удовлетворительного объяснения и аномальный эффект Зеемана и мультиплетная структура спектров. Как подчеркивал Гейзенберг в 1927 г., хотя «формулы Ланде оказались чрезвычайно плодотворным средством для наведения порядка в сложных спектрах... их модельная интерпретация была еще неизвестна», а из их математической структуры «было видно, что классическая механика не сможет привести к этим формулам, даже в какой-либо новой модели» [146, с. 114].

О качественном характере боровского построения периодической системы элементов мы уже говорили. Многие ее детали оставались далекими от ясного понимания, например числа электронов 2, 8, 18, 32, связываемые с заполнением оболочек, особенности мультиплетной структуры спектров и т. д. Значительно более глубокое понимание проблемы было достигнуто лишь благодаря открытию принципа Паули и спина электрона (1925).

Не менее сложно обстояло дело с квантами света, которые, по мнению Бора, наводили на мысль о возможном нарушении закона сохранения энергии-импульса в микропроцессах. В течение долгого времени усилия Бора и большинства приверженцев старой квантовой теории были направлены на проблемы структуры атома и атомных спектров. Отношение же к гипотезе световых квантов было скорее скептическим, прежде всего со стороны Бора. Но вот в своем сольвееском докладе 1921 г., который зачитывался Эренфестом, Бор заметил: «Такое представление (о квантах света. — *B. B.*) кажется, с одной стороны, открывающим единственную возможность описания фотоэлектрического эффекта, если мы будем придерживаться неограниченной применимости идеи сохранения энергии и импульса. С другой стороны, оно обнаруживает кажущиеся непреодолимыми трудности с точки зрения явлений оптической интерференции...» [152, с. 132]. Иначе говоря, Бор допускал мысль о том, что можно сохранить классические представления о свете, допустив возможность выполнения законов сохранения энергии-импульса только в среднем, т. е. статистически. Эти идеи приобрели особую популярность в 1922—1923 гг. С. И. Вавилов в «Добавлениях переводчика» к «Трем статьям о спектрах и строении атомов» Н. Бора, изданным на русском языке в 1923 г., писал: «Далее не следует забывать, что самое исходное представление теории Бора о стационарных состояниях и вытекающая отсюда прерывность поглощения света самым резким образом противоречат законам механики и электродинамики. Явление дисперсии света в материальной среде, напр., можно помирить с наличием стационарных состояний, только отказавшись от закона сохранения энергии в элементарной системе, что и признается в последнее время рядом исследователей» [153, с. 152] (Вавилов ссылается на работы Д. Л. Вебстера, 1920. Ч. Дж. Дарвина, 1922, Бора, 1923 и Борна и Гейзенберга, 1923)¹.

¹ Здесь же Вавилов следующим образом характеризует кризисную ситуацию, возникшую к этому времени в квантовой теории: «Неожиданное обострение кризиса, протекающего за последние десятилетия в области теоретической физики, на этот раз происходит от столкновения эмпирических данных, принципов теории квантов и остатков классических представлений. Отказ от этих классических представлений тем более затруднителен, что взамен них мы пока не имеем ничего определенного. Если, например, модель гелия, вычисляемая на основании законов механики и закона Кулона, дает неверную величину ионизационного потенциала и неустойчива, то мы не знаем пока, на основании каких новых законов та же модель даст верные результаты значення ионизационного потенциала и будет устойчива. Во всяком случае, неудача с моделью гелия лишает теорию Бора мощного орудия исследования — методов классической механики, и вся теория обращается почти в интуитивное угадывание истинных отношений» [153, с. 152].

Любопытно в связи с этим отметить, что корпускулярно-волновой дуализм света многим теоретикам казался неприемлемым. Эйнштейн, который внес важнейший вклад в создание этой концепции, как раз в 1921 г., именно в декабре этого года, предложил эксперимент, касающийся элементарного процесса испускания света и предназначенный для решения вопроса о том, какая именно концепция света справедлива — волновая или корпускулярная [154, с. 430]. Спустя некоторое время, однако, под влиянием критики со стороны Эрнеста и Лауэ Эйнштейн признал ошибочность своего замысла [152].

Один из наиболее выдающихся учеников и сотрудников Бора — Г. Крамерс в книге, написанной в соавторстве с Х. Гольстом, следующим образом резюмировал трудности старой квантовой теории за два-три года до открытия квантовой механики, т. е. как раз в самом начале упомянутого кризиса: «Бору не удалось отыскать новые основные законы, математическая формулировка которых могла бы заменить вполне законы электродинамики и которые могли бы послужить для вывода и объяснения атомных процессов и других явлений природы. Движение электрона в данном стационарном состоянии в значительной мере может быть вычислено по законам механики. Эти законы не в состоянии, однако, ответить, почему одни орбиты предпочитают другим, почему электроны перескакивают с внешних орбит на внутренние, почему электроны иногда с одной стационарной орбиты переходят на соседнюю, а иногда перепрыгивают через несколько орбит; непонятно также, почему электрон не может приблизиться к ядру на расстояние, меньшее диаметра первой орбиты, и почему, наконец, переходы сопровождаются излучением, частота которого определяется вышеприведенным правилом». На этом перечень принципиальных проблем не кончается. «Мы неизмеримо далеки от того, чтобы дать описание атомного механизма, — продолжали авторы, — позволяющего проследить, например, все движение электрона в атоме или понять роль стационарных состояний в их связи с целым, а не как "Deus ex machina". Нам совершенно ничего не известно о поведении электрона между переходами из одного стационарного состояния в другое и т. д.» [155, с. 98—99].

М. Планк, подводя итоги десятилетнему развитию старой квантовой теории и отдавая должное ее успехам, вместе с тем констатировал: «Во всяком случае в настоящее время еще не может быть и речи о сколько-нибудь удовлетворительном решении проблем, возникших благодаря введению теории квант в атомистику» [156, с. 43]. Интересна точка зрения самого Бора, сформулированная им, например, в предисловии к «Трем статьям» в начале 1922 г.: «Развиваемые соображения (имеются в виду в основном теоретические построения, содержащиеся в копенгагенском докладе от 8 октября 1921 г. — В. В.) имеют явно незаконченный характер не только в отношении разработки деталей, но и в смысле применяемых теоретических понятий... До сих пор дело идет, по-видимому, так, что при всяком успехе в области строения атома хорошо известные

„загадки“ теории квантов выступают все резче. Желательно, чтобы... читатель мог вынести впечатление об особой привлекательности изучения атомной физики именно в силу существования этих „загадок“ [157, с. 9—10]. Таким образом, прогресс квантовой теории, по Бору, заключался не в последовательном решении основных «загадок», которые, например, перечислены в приведенном выше высказывании Крамерса и Гольста, а во все большем обострении этих «загадок» и все более четкой их формулировке. Тем самым «неразлучность» «гордости и сомнений», «апогея» и «кризиса» была весьма характерной чертой развития квантовой теории в 1920—1922 гг. И несколько позже, когда ощущение кризисности старой квантовой теории было преобладающим, именно в 1924 г., Зоммерфельд тем не менее высоко оценивал значение этой теории, которая, по словам Планка, привлекала «все возрастающее число свежих отважных сил»: «Как бы ни был решен этот жгучий вопрос (т. е. вопрос о корпускулярной или волновой природе света.— *V. B.*), какие изменения ни претерпели бы наши представления в будущем, нет сомнений, что квантовая теория и модель атома Бора в той или другой форме навсегда останутся в сокровищнице достижений физики» [158, с. 15].

Обсудим теперь вкратце вопрос о том, в каком смысле можно говорить о квантово-теоретической программе как о глобальной исследовательской программе, конкурирующей с программой ЕГТП. На первый взгляд квантово-теоретическая программа, в основе которой (в «жестком ядре») лежали, с одной стороны, квантовая теория излучения Планка и Эйнштейна, а с другой — атомная модель Резерфорда—Бора и старая квантовая теория, была ориентирована на решение проблемы строения атомов и теоретического истолкования атомных спектров, а также вопросов взаимодействия света с веществом (атомами).

При всей своей важности эти проблемы не выглядели столь же глобальными, как проблема построения единой полевой теории, способной не только объединить на единой геометрической основе электромагнитное и гравитационное поля, но и на этой же основе получить основные элементарные частицы (прежде всего электрон) и квантовые особенности их поведения. Однако приверженцы квантовой теории все больше осознавали фундаментальность квантовых идей, их несводимость к классике, будь то классическая механика или классическая электродинамика. Такая установка уже выводила квантово-теоретическую программу на глобальный уровень, придавая ей статус стратегии, альтернативной по отношению к программе ЕГТП. Известный физик А. Гааз, одним из первых применивший квантовую концепцию к проблеме связи строения атома с закономерностями спектров (атомная модель Гааза, 1910), в своих лекциях о физической картине мира, читанных им в 1920 г. сначала в Вене, а затем в Лейпциге, ясно подчеркивал программный характер старой квантовой теории (именно в глобальном отношении): «Как теория относительности, так и теория квант, возникшая почти одновременно с нею, не представляют собой какого-нибудь

отдела физики, а физику в целом, рассматриваемую лишь с совершенно новой точки зрения. И теория квант имеет объектом исследования не какую-нибудь группу физических явлений, но всю область физики; она применяет к ней новый фундаментальный принцип, оказавшийся едва ли менее плодотворным, чем теория относительности» [159, с. 68].

Начав с теории теплового излучения, квантовая концепция в последующие два десятилетия охватила ряд новых областей, относящихся главным образом к микроструктуре излучения (электромагнитного поля) и вещества (твердых тел, молекул, атомов), а также взаимодействия излучения с веществом. Распределение энергии в спектре черного тела, явления флюоресценции, фотохимических реакций, фотоэффект (как в оптической, так и в рентгеновских областях спектра), закономерности поведения твердых тел при низких температурах, аномальное поведение удельной теплоемкости твердых тел, широкий круг явлений атомной и молекулярной спектроскопии, строение атомов и молекул и объяснение периодической системы элементов — вот далеко не полный перечень явлений и разделов физики, в разработку которых квантовая теория за полтора-два десятилетия своего существования внесла весьма весомый вклад.

Благодаря этому квантовая теория привлекала и теоретиков, и экспериментаторов, и оптиков, и химиков, физиков, занимающихся проблемами твердого тела, и тех, кого в первую очередь интересовали проблемы строения атома. После возникновения в 1913 г. Боровской теории атома, которая, конечно, существенно опиралась на идеи Планка и Эйнштейна о кванте действия и квантовом характере излучения, квантовая теория развивалась как бы в двух направлениях: 1) квантовая теория света и квантовая статистика и 2) строение атома и спектров. При этом лидер второго направления Бор, как, впрочем, и многие из его учеников и сотрудников, игнорировал работы, относящиеся к первому направлению, или даже отрицательно относился к самой идее световых квантов. Эйнштейн же, внесший так много в развитие первого направления, и на рубеже второго десятилетия продолжал считать кванты света ключевым понятием квантовой теории, соответствующим физической реальности.

Кстати говоря, далеко не все, кто работал в области первого направления, разделяли взгляды Эйнштейна на кванты света, например Лоренц, Планк и др. (таких даже было, по-видимому, большинство). Было также немало физиков, которые вносили свой вклад в разработку обоих направлений, например Планк, Эренфест и др. Среди тех, кто так или иначе работал в русле квантовой теории, не было единого понимания ее принципиальных положений, ее места в системе физических теорий. Со временем, однако, у все большего числа физиков крепло убеждение в первичности, фундаментальности понятия кванта действия как «элементарной физической величины, которую в определенном смысле измеряется физический процесс» [159, с. 69], о несводимости специфически кван-

товых особенностей поведения излучения и атомов к принципам классической физики: будь то представление о квантовой, атомистической структуре излучения или крайне загадочное поведение электронов в атомах, связанное с неизлучением при движении по стационарным орбитам и с излучением квантовыми порциями при перескоке их с одной стационарной орбиты на другую.

Поэтому не так легко говорить о квантово-теоретической программе как о целостном образовании, по крайней мере в 10—20-х годах, до возникновения квантовой механики. Было бы сильной идеализацией говорить о своеобразном двухкомпонентном ядре этой программы (одна компонента — квантовая теория излучения Планка и Эйнштейна, с учетом того, однако, что большинство не признавало реальности существования квантов самого излучения, и вторая компонента — боровская теория атома с лежащими в ее основе «постулатами Бора», а затем принципом соответствия, адиабатическим принципом и т. д.). В действительности ясного образа этой программы в рассматриваемые годы еще не было, тем более что старая квантовая теория, теория Бора—Зоммерфельда, частично опиралась на основы классической механики и электродинамики и сама в процессе своего развития модифицировалась. Поэтому до возникновения квантовой механики, т. е. до 1926—1927 гг., можно говорить лишь о некотором прообразе квантово-теоретической программы.

Вместе с тем по мере развития квантовой теории постепенно выявлялись специфические черты этой программы, резко контрастировавшие с программами, опиравшимися на теории классического типа.

Прежде всего в квантовой теории дальнейшее и значительное развитие получала концепция атомизма, дискретности. И эта особенность является общей для обоих отмеченных выше направлений. Независимо от вопроса о реальности эйнштейновских световых квантов все были согласны в одном: теория квантов Планка и Эйнштейна «решительно порывает с прежними воззрениями; в ней впервые при формулировке общих законов природы вводится предположение о наличии прерывности» [160, с. 319]. Это высказывание взято из упоминавшегося уже доклада Бора в Копенгагене в октябре 1921 г. Оба постулата теории Бора являются, по словам ее основателя, «той формой, в которой теория квантов применяется к вопросам строения атома», представляют собой непосредственное сжатое выражение дискретной структуры атома и атомных процессов (например, излучения и поглощения света).

Фундаментальность понятия действия была признана и в классической физике, но там это была величина, непрерывно изменяющаяся в пространстве и во времени и непрерывно зависящая от других физических переменных. В квантовой же теории впервые было подчеркнуто, что «действие физических процессов составляет из элементарных квант действия» [159, с. 69].

Неклассический характер квантовой теории к началу 20-х годов определенно с достаточной ясностью, и он выражался не только

в дискретности, но в известной степени и в особой роли вероятности при формулировке законов микропроцессов, например законов взаимодействия излучения с веществом. Интересно, что именно Эйнштейн, который с начала 20-х годов и до конца своей жизни твердо верил в классическую причинность, считая вероятностные закономерности вторичными, был одним из пионеров введения вероятностных методов в квантовую теорию. В двух статьях по квантовой теории излучения, опубликованных в 1916 г., в которых им были введены коэффициенты A и B , характеризующие вероятности спонтанных и вынужденных переходов, чувствуется ясное понимание вероятностного характера связи волновой и корпускулярной теорий излучения. Впрочем, Эйнштейн и тогда считал это обстоятельство недостатком: «Слабость теории заключается, с одной стороны, в том, что она не приводит нас к более тесному объединению с волновой теорией, и, с другой стороны, в том, что время и направление элементарного процесса предоставляется случаю» [161, с. 687].

П. Формен в одной из своих работ собрал обширный материал, свидетельствующий о том, что в Германии на рубеже второго десятилетия в естественно-научном сообществе возникло разочарование в идеале классической причинности и были созданы предпосылки для принятия идеи принципиально вероятностной причинности, в полной мере развитой лишь в рамках квантовой механики (вероятностное истолкование квантовой механики Борном, 1926) [162]. В самом начале 20-х годов становится все более популярной идея, что только предположение о статистическом характере закона сохранения способно согласовать такие, например, оптические явления, как дисперсия света в материальной среде, с боровской теорией атома. И хотя эта идея, как вскоре выяснилось, оказалась ошибочной, ее популярность говорит о готовности физиков в эти годы отказаться от классической причинности в пользу ее статистического эквивалента.

С точки зрения последовательности, строгости, логической согласованности старая квантовая теория, как мы уже отмечали, была в значительной мере неудовлетворительной. Использовались фрагменты классической механики и электродинамики, слишком многое постулировалось; крайне парадоксальные представления, явно не укладывающиеся в рамки классики, сочетались с наглядными моделями механического типа. Математический аппарат, в сущности, был заимствован из классической физики. Многие правила и закономерности имели главным образом эмпирическое происхождение. «Понадобились новые неожиданные законы и правила,— писал С. И. Вавилов в начале 1923 г. в предисловии к русскому изданию „Трех статей о спектрах и строении атома“,— сложный и мало связанный конгломерат которых носит название теории квантов... Для успешного продвижения в одной области явлений приходится закрывать глаза на соседнюю область, временно забывая о ее существовании. В этом смысле теория квантов противоположна теории относительности с ее стройностью, последовательностью и широтой.

Raison d'être теории квантов — ее исключительная плодотворность: она не только объясняет, но указывает новые факты. Можно утверждать с значительной вероятностью, что современная форма теории кратковременна. В постоянном виде это ряд эмпирических закономерностей и правил, ожидающих общего правила» [163, с. 5]². Речь, таким образом, идет о преобладании экспериментально-эмпирического аспекта над теоретическим, характерным для прообраза квантово-теоретической программы (в дальнейшем мы будем называть этот прообраз просто программой, помня при этом, что между квантово-теоретическими программами образца 1921 г. и, скажем, 1926—1927 гг. в действительности огромное различие).

Эмпиризм квантовой теории — и, более широко, квантово-теоретической программы в целом — особенно бросался в глаза на фоне развитого теоретизма общей теории относительности и программы ЕГТП.

При сопоставлении квантово-теоретической программы с программой ЕГТП, помимо уже отмеченных противоположностей, можно назвать и следующие, на которых мы не будем останавливаться. Во-первых, как уже отмечалось, изначальная «квантовость», дискретность структуры полей (прежде всего электромагнитного) и структуры микропроцессов связала с выдвиганием на передний план их несводимости к континуальным сущностям, будь то электромагнитное поле или пространственно-временной континуум. Эта особенность находится в резком контрасте с геометризмом программы ЕГТП.

Во-вторых, недостаточно развитый и последовательный теоретизм старой квантовой теории, ее концептуальный эклектизм проявились и в той весьма незначительной роли, которую играли в ней идеи симметрии и релятивизма. Только после создания основ квантовой механики Дирак, фон Нейман и другие развили последовательную формулировку квантовой теории, после чего она достигла уровня теоретичности, сравнимого с общей теорией относительности. Отсутствие теоретико-инвариантного представления квантовой теории контрастировало с инвариантно-геометрическим формализмом ЕГТП.

Наконец, задачи, стоявшие перед квантовой теорией, как решенные, так и не решенные ею, были вполне конкретные, частные: объяснение спектральных закономерностей, дисперсии, поглощения и рассеяния света и т. д. Непосредственно столь глобальной задачи, как построение некоторой единой физической теории, не ставилось в рамках квантово-теоретической программы. Вместе с

² С. И. Вавилов далее сравнивает положение в квантовой теории в начале 20-х годов с положением в оптике в XVIII в., когда преобладала ньютоновская корпускулярная теория света, которая для объяснения эмпирически четко сформулированных законов интерференции использовала представление о странных периодических припадках» (или «приступах»). «потерявших всю свою причудливость на ясном языке волновой теории Юнга и Френеля». «Аналогичными „припадками“», — продолжал Вавилов, — «страдает и атом современной физики с его дискретными стационарными состояниями, квантным поглощением и пр.» [163, с. 6].

тем к началу 20-х постепенно стал вырисовываться путь к достижению того идеала единства, который содержался в ней. Фактически речь шла о том, чтобы из элементарных дискретных сущностей типа электронов и световых квантов с помощью концепции «элементарного кванта действия» построить мир атомов, молекул. Но достижение этого единства выглядело как весьма отдаленная перспектива не только потому, что оставалось еще не объясненным множество явлений типа названных выше, но и потому, что предстояло еще найти многие законы и для них обнаружить единую теоретическую основу. Тем самым в отличие от ЕГТП-программы с характерным для нее аксиоматико-дедуктивным подходом к проблеме квантово-теоретическая программа имела в виду индуктивный подход к реализации идеала единства.

Итак, установки этих двух программ во многом, как мы видим, были противоположны:

ЕГТП-программа	Квантово-теоретическая программа
Непрерывность (классическое поле)	Дискретность, атомизм (концепция квантов)
Классическая, однозначная причинность	Вероятностная причинность (или готовность отказаться от классического детерминизма)
Теоретизм, структурно-математический характер	Теоретический эклектизм, преобладание экспериментально-эмпирических аспектов
Геометризация (геометрический характер фундаментальных сущностей)	«Материальный» характер фундаментальных сущностей
Релятивизм, симметрия, инвариантность	Отсутствие развитого теоретико-инвариантного подхода
Аксиоматико-дедуктивный способ решения проблемы единства	Индуктивный путь к единству

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ

В предыдущей главе были детально рассмотрены первоначальный вариант вейлевской теории, критика этой теории Эйнштейном и Паули и некоторые усовершенствования ее, принятые главным образом самим Вейлем. Здесь мы обсудим новый вариант теории, начав разработки которого относится к 1919 г. [164] и который в своем развитом виде существовал уже в 1921 г. [165]. Этот же вариант без значительных изменений включен в последнее, пятое издание книги Вейля «Пространство. Время. Материя» (1923) [64].

Суммируем основные трудности теории Вейля (в ее первом варианте), о которых шла речь в предыдущей главе.

1. Связанный с критикой Эйнштейна отказ от непосредственного сопоставления геометрических характеристик («метрического поля») с показаниями измерительных приборов, что, по словам Паули, лишало «с физической точки зрения теорию Вейля... ее внутренней убедительности» [63, с. 272].

2. Отсутствие физического основания для геометризации электромагнитного поля, подобного факту равенства инертной и гравитационной масс (или принципу эквивалентности) в случае гравитационного поля.

3. В римановой геометрии «инфинитезимальный» аспект связывается лишь с направлением вектора. В геометрии Вейля, которую он сам называл «чистой инфинитезимальной геометрией» («*reine Infinitesimalgeometrie*»), этот аспект получал дальнейшее развитие, будучи распространенным и на длину вектора. Еще более радикальной была бы «инфинитезимальная» угла между векторами или аффинных свойств. Убедительное обоснование принятого в теории уровня «инфинитезимальности» отсутствовало.

4. Глубокий физический характер геометризации гравитационного поля проявляется и в том, что мировые линии материальных точек и световых лучей — это геодезические риманова пространства. В теории Вейля в общем случае это соответствие не выполняется.

5. Ряд трудностей был связан с уравнениями поля. Способ получения уравнений, опиравшийся на вариационный принцип и требования инвариантности, приводил к уравнениям 4-го порядка, которые при отсутствии электромагнитного поля не сводились к общерелятивистским уравнениям гравитации. Нарушался, таким образом, принцип соответствия. К тому же выбор лагранжиана был неоднозначным (хотя возможных вариантов благодаря требованию калибровочной инвариантности было существенно меньше, чем в теории Ми).

6. 4-й порядок полевых уравнений приводил к огромным вычислительным затруднениям. Новых решений получено не было. В результате теория не давала новых следствий, доступных экспериментальной проверке. Немалым достижением было признано доказательство Паули того, что решение Шварцшильда полевых уравнений ОТО является и решением полевых уравнений теории Вейля.

7. Не были найдены нигде несингулярные статические и сферически-симметричные решения полевых уравнений, т. е. решения, которые можно было бы интерпретировать как заряженные частицы. Кроме того, теория в принципе была инвариантна по отношению к перемене знака заряда и поэтому, казалось, была не способна объяснить реально существующую асимметрию электричества.

Перечисленные трудности, как видим, разделяются на две группы: первая группа связана с некоторым разрывом между физическими и геометрическими основаниями теории, вторая — с уравнениями поля и их решениями. В привлечении космологических аспектов Вейль, как ему казалось, нашел путь к такой модификации теории, которая, сохраняя ее геометрическую основу, по крайней мере отчасти устраняла недостатки из обеих групп. Правда, следовало признать, что теория при этом существенным образом усложнялась, утрачивая простоту и привлекательность первоначального варианта. Рассмотрим построение Вейля более подробно.

Оно начинается с обсуждения того факта, на который опирался

Эйнштейн, выдвигая свое основное возражение против первого варианта теории, т. е. с факта постоянства спектральных частот атомов, или, в другой формулировке, с факта постоянства отношения масс атомов, например, водорода и кислорода, независимо от точки пространства-времени, в которой это отношение определяется. Прежде всего с самого начала постулируется, что атомные массы, периоды часов и длины масштабов ведут себя не в соответствии с некоторой «инерциальной тенденцией» («Beharrungstendenz»), а в соответствии с тенденцией «установления», «настройки» («Einstellungstendenz»): «...сохранение этого отношения масс должно быть основано, таким образом, на том, что каждая атомная масса в отдельности в каждое мгновение настраивается на определенное отношение к значению известной *полевой величины*, имеющей размерность длины (= массы)» [64, с. 229]. В качестве такой величины было бы естественно взять радиус кривизны пространственно-временного континуума.

Здесь Вейль использует полевые уравнения ОТО с космологическим членом и правой частью в виде тензора энергии-импульса электромагнитного поля:

$$\left(R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R\right) - \lambda g_{ik} = -\kappa S_{ik}. \quad (1)$$

Свертка соответственно левой и правой частей этого уравнения ввиду «бесследовости» S_{ik} дает для скалярной кривизны значение

$$R = -4\lambda. \quad (2)$$

Это выражение использовалось также в одном из первых вариантов ЕГТП, разработанном Эйнштейном. Кстати говоря, оно позволяло, как заметил Эйнштейн, «рассматривать мир как пространственно замкнутый, не прибегая к дополнительной гипотезе» [93, с. 669], т. е. космологическая постоянная вводилась теперь не как гипотеза *ad hoc*, получая истолкование через скалярную кривизну. Сам Эйнштейн и Паули забраковали эту теорию, но идея соответствующего истолкования космологической постоянной была взята на вооружение во 2-м варианте теории Вейля. Это же соотношение (2) оказалось одним из исходных пунктов перестройки теории.

Взяв теперь за основу «инфинитезимальную» геометрию, или геометрию Вейля, можно было предположить, что масштабы, часы, атомные массы настраиваются на скалярную кривизну F вейлевского пространства-времени. Эта настройка приводит к тому, что исходная «инфинитезимальная» геометрия оказывается ненаблюдаемой. Соответствующая процедура параллельного перенесения масштабов, как заметил Вейль, «фальсифицируется» показаниями часов, а именно заменяется «настройкой на мировую кривизну» [64, с. 299]. В результате возникло удвоение геометрии: «Таким образом, имеется различие между исходной *геометрией эфира*³ и геометрией,

³ В начале 20-х годов происходит некоторая реабилитация понятия эфира. Эйнштейн в 1920 г. пишет об «эфире общей теории относительности» [166, с. 688]. Вейль также широко использует это понятие, отождествляя его, по существу, с понятием пространственно-временного континуума.

конструируемой по показаниям измерительных приборов, так называемой „естественной геометрии“». Причем, продолжает Вейль, эта „естественная геометрия“ возникает из первой в результате того, что инфинитезимальное конгруэнтное перенесение отрезков заменяется посредством их настройки на кривизну» [64, с. 299]. Калибровку, выражаемую соотношением

$$F = -4\lambda, \quad (3)$$

Эддингтон назвал «естественной». За счет такого удвоения геометрии Вейлю удалось сохранить геометрическую структуру теории, столь элегантно связавшей относительность длины и масштабный вектор φ_i с электромагнитным потенциалом, а также дать вполне аргументированный ответ на «возражение Эйнштейна» и объяснить разрыв в физических и геометрических основаниях теории.

Затем Вейль обращается к проблеме уравнений поля. Опираясь на теоретико-инвариантные соотношения «геометрии эфира», в качестве наиболее подходящего выражения для действия он выбирает «естественно измеренный» объем

$$\int \sqrt{gF^n} dx.$$

который в четырехмерном случае ($n = 4$) оказывается равным

$$W = \int \lambda^2 \sqrt{g} dx. \quad (4)$$

Путем несложных преобразований вариационного интеграла (4) Вейль приводит его к виду (G — скалярная риманова кривизна)

$$\int [G + \lambda - 3/4 (\varphi_i \varphi^i)] \sqrt{g} dx. \quad (5)$$

Варьирование этого действия по g_{ik} дает обычные уравнения гравитации с космологическим членом, а варьирование по φ_i — уравнения

$$\varphi_i = 0. \quad (6)$$

Таким образом, вариационный принцип для действия (4) согласуется с исходной «естественной» калибровкой (2), но не дает уравнений электромагнитного поля. Поэтому Вейль, отождествив φ_i с электромагнитным потенциалом, а масштабную кривизну (*Streckenkrümmung*)

$$f_{ik} = \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k}$$

с напряжениями электромагнитного поля, приходит к необходимости добавления к действию (4) или (5) максвелловской компоненты с лагранжианом $\sqrt{g}M$

$$1/4 \int \sqrt{g} f_{ik} f^{ik} dx. \quad (7)$$

В результате в основу теории теперь кладется лагранжиан

$$\mathcal{L} = \left[G + \alpha M + \frac{1}{4}(1 - 3(\varphi_i \varphi^i)) \right] \sqrt{g}. \quad (8)$$

Причем здесь α — некоторая числовая постоянная, а космологическая постоянная определяется нормировкой $\lambda = 1/4$, означающей, что масштабы измерения имеют «космический» порядок. Если перейти к иной калибровке, при которой координаты x'_i имеют, например, порядок размеров человеческого тела ($x_i = 2\epsilon x'_i$, где ϵ — очень малая постоянная):

$$g'_{ik} = g_{ik}, \varphi'_i = 2\epsilon \varphi_i, \lambda' = -\epsilon^2, \quad (9)$$

то лагранжиан (8) можно будет переписать в виде

$$\mathcal{L} = \{(G + \alpha M) + \epsilon^2[1 - 3(\varphi_i \varphi^i)]\} \sqrt{g} \quad (8')$$

(при этом $(ds')^2 = 1/4 \epsilon^2 (ds)^2$, а $1/\epsilon$ — радиус кривизны мира). Таким образом, из выражения (8') ясно видно, что при таком выборе действия с точностью до весьма малых членов космологического характера, имеющих порядок ϵ^2 , мы должны получить полевые уравнения гравитации и электромагнитного поля, соответствующие ОТО и максвелловской теории.

Несмотря на «удвоение геометрии» («геометрия эфира» и «естественная геометрия»), отказ от, казалось бы, более прямого способа построения полевого действия, использовавшего квадратичный лагранжиан и некоторую искусственность новой конструкции лагранжиана, Вейль полагал, что основную идею теории удалось сохранить. «Расширение мировой геометрии, вызванное принципом калибровочной инвариантности, — писал он в пятом издании своей знаменитой книги, в точности повторяя один из основных выводов статьи 1921 г., — ведет при использовании принципа действия, построенного простым и разумным образом из величин состояния метрического поля, к следствиям, которые согласуются с опытом и делают излишним принимаемое до сих пор, помимо метрики, в качестве электромагнитного еще одно физическое поле» [64, с. 232]. «Мечта Декарта о чисто геометрической физике, — замечает Вейль несколько раньше, — получает свое воплощение удивительным и, конечно, вовсе не предусмотренным им образом...» [64, с. 302]. Вполне понимая, что все ухищрения, обеспечившие возможность геометризации электромагнитного поля, были вызваны отсутствием «электромагнитного» аналога принципа эквивалентности, он вместе с тем пытается привести физические и математические соображения против самого существования такого рода аналога⁴.

⁴ «И все же мы испытываем здесь некоторую неудовлетворенность. У Эйнштейна взаимосвязь сохраняющей направление инерции и гравитации можно наглядно и непосредственно выразить с помощью равенства инертной и тяжелой масс, или «принципа эквивалентности». Имеется ли соответствующая наглядная основа для сформулированной здесь связи между конгруэнтным перенесением и электромагнитным полем? Принято считать, что такой наглядной основы нет. Но мы можем по крайней мере объяснить, почему она должна отсутствовать» [64, с. 305].

Эти соображения, по существу, демонстрируют неравноценность геометризации гравитации и электромагнетизма, еще больше снижая физическую значимость теории. Во-первых, подчеркивает Вейль, напряженности электромагнитного поля f_{ik} не зависят от калибровки (в отличие от гравитационных напряженностей, которые зависят от системы отсчета), и поэтому «пондеромоторное действие электромагнитного поля на заряженные тела оказывается никак не связанным с калибровкой» [64, с. 305]. Во-вторых, указанное различие связано с различной структурой электромагнитного и гравитационного лагранжианов. Если бы, замечает Вейль, гравитационное действие было вполне аналогично электромагнитному (например, выражалось бы посредством $\int R_{ik}R^{ik}\sqrt{g} dx$), то и в ОТО появились бы силы, не пропорциональные массе, силы, «связь которых с ведущим полем нельзя было бы сделать убедительной с помощью принципа эквивалентности» [64, с. 305]. Электромагнетизм во втором варианте теории оказывался связанным не с переменностью «метрической связности» (т. е. вейлевской связности) — и этим принципиально отличался от гравитации, интерпретируемой как «переменность аффинной связности», — а в основном со строением действия и истолковывался как «сопутствующее явление». Роль же своеобразного аналога гравитации приобретало поле, порождаемое «космологической» компонентой лагранжиана

$$\varepsilon^2 \sqrt{g}(1 - 3(\varphi_{;i}\varphi^i)), \quad (10)$$

проявления которого характеризуются вторым порядком малости по ε и поэтому слишком незначительны для того, чтобы получить экспериментальное подтверждение. Наконец, вся конструкция теории, связанная с «удвоением геометрии» и принципиальным разделением процессов «конгруэнтного перенесения» и реального поведения масштабов и часов, именно их настройки на радиус кривизны, исключала воздействие электромагнитных потенциалов на масштабное поведение тел и тем самым физическую основу для «электромагнитного» принципа эквивалентности. Эти же соображения делают вполне понятным «негеодезический» характер движения заряженных частиц.

Оправданием дополнения принципа общей ковариантности («принципом относительности величины» (или «принципом масштабной относительности»), по Вейлю, было в конечном счете осуществление возможности единой геометризации гравитации и электромагнетизма. Правда, непротиворечивое согласование теории с опытом и с исходными полевыми теориями (ОТО и электродинамикой) потребовало такого усложнения всей конструкции, которое существенно подорвало ее физическую убедительность.

Вопрос об уравнениях поля решался в теории, как мы видели, значительно осторожнее. Вейль отказался от квадратичного, по кривизне лагранжиана и тем самым от уравнений 4-го порядка. Теперь легко и естественно устанавливалось соответствие с полевыми уравнениями ОТО и электродинамики. Обеспечением этого соответствия и только отчасти геометрическими, теоретико-инвариантными сооб-

ражениями определялся выбор лагранжиана теории. В отношении упомянутых выше четырех квадратичных по кривизне инвариантов, дополненных впоследствии еще двумя, Вейль теперь писал: «В противоположность высказанному ранее мнению я теперь почти уверен в том, что они не играют никакой роли в природе» [64, с. 317]. Многочисленные трудности физического и математического характера, связанные с уравнениями 4-го порядка, привели, таким образом, к отказу от них. Выбор геометрической части лагранжиана («естественно измеренный объем») определялся теперь достаточно естественным образом, но добавление электромагнитной части выглядело искусственно, паводя на мысль о его ad hoc-структуре. Фактически единственным отличием новых уравнений поля была замена обычного космологического члена $\epsilon^2 \sqrt{g}$ выражением (10)

$$\epsilon^2 \sqrt{g} [1 - 3(\varphi, \varphi')],$$

вклад которого в наблюдаемые следствия теории в виду его чрезвычайной малости должен был оказаться ничтожным. В результате теория Вейля в новой модификации еще в меньшей мере могла рассчитывать на экспериментальное подтверждение, выходящее за рамки ОТО и классической электродинамики.

Вейль подчеркивал возможность согласования теории как с космологией Эйнштейна («цилиндрический мир»), так и с космологией де Ситтера. При этом в рамках эйнштейновской космологии можно было говорить о статических центрально-симметричных решениях с произвольными массами и зарядами, что не оставляло серьезных надежд на удовлетворительное решение проблемы материи. Впрочем, континуалистский радикализм Вейля к 1921 г. заметно поубавился. Заметив, что «теория не дает никакого объяснения неравноценности положительного и отрицательного электричества», он подчеркивает: «Но это нельзя считать изъяном теории, так как это неравноправие основано, без сомнения, на том, что из двух основных частиц материи, электрона и атомного ядра водорода, положительно заряженная частица связана с одной массой, а отрицательно заряженная — с другой. Эта разница связана скорее с природой материи, чем с полем» [64, с. 308]. Последняя фраза означает, что Вейль теперь уже допускал определенный дуализм поля и материи и несводимость частиц к полю. В статье «Поле и материя», опубликованной в 1921 г., он рассмотрел две возможности взаимоотношения поля и материи (подразумевая под материей заряженные элементарные частицы и составленные из них атомы и молекулы): 1) полевая концепция материи в духе теории Ми и программы-максимум ЕГТП; 2) дуалистическая концепция, согласно которой поле однозначно определяется материей. «С первого по третье издание книги „Пространство. Время. Материя“, — писал Вейль в этой статье, — я полностью придерживался первой точки зрения — причиной этого были красота и единство чисто полевой теории. В 4-м издании (подготовленном к печати в конце 1920 г. — В. В.) я, однако, убедившись в ошибочности полевой теории материи, отдал предпочтение второй точке зрения» [167, с. 242].

Пятое издание книги Вейля заканчивалось следующими словами: «Кто оглянется на пройденный путь, который привел нас от евклидовой метрики к переменному, зависящему от материи метрическому полю и включающему в себя полевые явления гравитации и электромагнетизма... тот будет покорен ощущением достигнутой свободы — прочная клетка, в которой до сих пор билась наша мысль, ныне разрушена. До наших ушей допелось несколько мощных аккордов той гармонии сфер, о которой мечтали Пифагор и Кеплер. Мы не могли провести наш анализ пространства и времени, не затрагивая деталей строения материи. Но здесь мы останавливаемся перед загадкой, решения которой нельзя ожидать от физики поля. Во тьме, которой еще окутана проблема материи, первым лучом восходящего солнца является, быть может, квантовая теория» [64, с. 317].

Это издание было последним. Взгляды Вейля за пять лет, прошедших со времени появления первого варианта его единой теории, существенно изменились. В начале 20-х годов он, по-видимому, уже не возлагал особенно больших надежд на программу ЕГТП (в ее максималистском замысле) как на магистральную стратегию физики. При размышлении над проблемой материи его взоры все больше обращались к бурно прогрессирующей квантово-теоретической программе, хотя в глазах большинства физиков он по-прежнему был одним из лидеров полевой программы.

ТЕОРИЯ ЭДДИНГТОНА

А. Эддингтон, один из основоположников современной астрофизики, вероятно, был одним из первых британских ученых, изучивших ОТО и ставших сразу же ее убежденным сторонником. С этой теорией его познакомил голландский астроном В. де Ситтер, которому Эйнштейн в 1916 г. выслал свои основные работы по ОТО⁵. Де Ситтер посылал Эддингтону не только копии работ Эйнштейна, но и свои собственные работы [169]. Классические же исследования де Ситтера по релятивистской космологии были опубликованы в ежемесячнике Королевского астрономического общества, секретарем которого в это время был Эддингтон [170].

В 1918 г. специально для Лондонского физического общества он издал «Отчет о релятивистской теории гравитации» — вероятно, первое обстоятельное изложение ОТО на английском языке [171]. В следующем году две английские экспедиции, организованные по его инициативе и под его руководством, убедительно подтвердили релятивистское отклонение луча света в гравитационном поле Солнца во время солнечного затмения 29 мая 1919 г. [172].

В 1920 г. была опубликована его блестящая научно-популярная книга «Пространство, время, тяготение», переведенная вскоре на

⁵ Хорошо известна, кстати говоря, крайне важная для понимания истории формирования релятивистской космологии переписка между Эйнштейном и де Ситтером, как раз относящаяся к 1916—1917 гг. [168].

многие языки, в том числе и на русский (1923) [173]. Уже в этой книге, как и в последующих изданиях «Отчета о релятивистской теории гравитации», Эддингтон высоко оценивал теорию Вейля, хотя отмечал и некоторые ее трудности, например связанные с выбором лагранжиана, распадающегося на гравитационное и электромагнитное слагаемые, и с утверждением, что необходимым условием применимости полевых уравнений ОТО является отсутствие электромагнитных полей.

19 февраля 1921 г. в редакцию «Proceedings of Royal Society of London» поступила статья Эддингтона, содержащая дальнейшее обобщение теории Вейля и открывшая новый этап в развитии единых геометризованных теорий поля. «Я думаю, что, хотя геометрия Вейля,— писал Эддингтон в водной части своей статьи,— является плодотворной, она содержит в себе некоторые излишние и даже вредные ограничения» [174, с. 104]. «При выходе за пределы евклидовой геометрии,— пояснял он свою мысль,— появляется гравитация; при выходе за пределы римановой геометрии — электромагнитные силы; что же мы получим при дальнейшем обобщении?». «Очевидно, немаквелловы силы сцепления, обеспечивающие целостность электрона»,— отвечал на свой вопрос Эддингтон, надевшийся, по-видимому, на то, что предпринятое им обобщение откроет путь для решения проблемы электрона. Правда, он тут же сделал оговорку, что «в настоящем исследовании он ставит перед собой цель не открыть неизвестные законы природы, а лишь объединить старые законы». Иначе говоря, речь пока шла лишь о разработке новой геометрической схемы и об ее согласовании с уже известными физическими явлениями, прежде всего с ОТО и теорией электромагнитного поля. Естественно, центральной задачей при этом было объединение гравитации и электромагнетизма на единой геометрической основе. Но в этой первой работе Эддингтон рассматривал задуманное им геометрическое обобщение как «новую точку зрения на происхождение фундаментальных законов физики», а не только как на некоторое математическое «упрощение всей схемы» [174, с. 105]. В более расширенном изложении своей теории, завершеном через полтора года (в августе 1922 г.) [11], позиция Эддингтона в этом вопросе претерпела некоторые изменения, о которых мы скажем позже. Последовательность развития математического каркаса теории и основные физические формулировки так, как они разработаны в статье 1921 г., почти полностью (но с некоторыми дополнениями) повторены в цитированной выше книге⁶.

Уже Вейль в своем построении римановой геометрии и ОТО, а также своей единой теории поля прежде всего опирался на понятие бесконечно малого параллельного переноса, лежащего в основе геометрии аффинной связности. Но и в ОТО, и в единой теории

⁶ Так, § 91—94 полностью воспроизводят раздел статьи, названный «Геометрическая теория». Второй раздел статьи — «Физическая теория» — в точности соответствует § 95 и 96 книги, хотя последующий материал изложен несколько иначе, чем в § 97—101.

Вейля основными геометрическими величинами (совпадающими с основными физическими переменными, характеризующими гравитацию и электромагнитное поле) были в конечном счете метрические характеристики g_{ik} (или g_{ik} и 4-вектор φ_i).

Эддингтон же, не отрицающий реальности наблюдаемой метрики

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k,$$

показывает, что ее можно построить из коэффициентов аффинной связности $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$, приобретающих свой элементарный геометрический смысл в операции бесконечно малого параллельного переноса:

$$dA^\mu = -\Gamma_{\nu\alpha}^\mu A^\alpha dx_\nu, \quad (11)$$

где A^μ — вектор бесконечно малого смещения, переносимого параллельно самому себе из точки $P(x_\mu)$ в бесконечно близкую ей точку $P'(x_\mu + dx_\mu)$. Это — наиболее общее непрерывное выражение для изменения A_μ , причем ввиду малости A_μ и dx_μ членами более высокого порядка можно пренебречь. Система величин $\Gamma_{\nu\alpha}^\mu$ не является тензором и в общем случае содержит 64 составляющие. Несмотря на нетензорность $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ и слишком большое их число, именно эти величины в концепции Эддингтона считаются основными геометрическими характеристиками и одновременно физическими переменными, а соотношение (11) кладется в основу всего построения: «Исходя из этого понятия бесконечно малого параллельного переноса, мы построим вновь всю теорию ... Исходная наша аксиома заключается в том, что параллельный перенос имеет для основных свойств мира определяющее значение» [11, с. 397].

На чем основывался фундаментальный характер соотношения (11), который, по мнению Эддингтона, нельзя было подтвердить опытным путем? Естественное практическое соображение, с точки зрения приверженца программы ЕГТП, заключалось бы в том, что геометрия аффинной связности, позволяющая развить весь аппарат теории кривизны, является следующей ступенью обобщения в ряду четырехмерных геометрий: евклидова геометрия → риманова геометрия → геометрия Вейля → геометрия аффинной связности. Некоторые трудности и недостатки теории Вейля могли быть связаны с несколько неудачным, недостаточно общим характером «мировой геометрии». В 1921 г. геометрия аффинной связности могла рассматриваться как наиболее общая и вместе с тем достаточно содержательная геометрическая схема, способная вместить в себя не только гравитацию, но и электромагнетизм, а возможно, и другие, еще неизвестные физические феномены.

Эддингтону все же хотелось найти в пользу избранного им обобщения более глубокие аргументы, возможно философского или методологического характера. Эта аргументация отсутствует в статье 1921 г., но содержится в книге «Теория относительности», опубликованной в конце 1922 г. (§ 98). Несмотря на приверженность программе ЕГТП, Эддингтон полагал, что физическая реальность «обладает субстанцией и структурой», причем если субстанцию можно

«только наименовать» («Попытка идти дальше наименования сейчас же ведет к приписыванию некоторой структуры»), то «структуру можно до известной степени описать» [11, с. 418]. Понимаемую как «комплекс соотношений», причем соотношений, принципиально сравнимых (в противном случае, как остроумно замечает Эддингтон, «все части мира были бы сходны друг с другом в своем несхождении и невозможны были бы даже зачатки структуры»), структуру континуального типа простейшим образом можно ввести с помощью соотношения (11)⁷. «Таким образом,— резюмирует оп,— наша аксиома параллельного переноса есть геометрическая форма принципа, который можно было бы назвать «сравнимостью близких соотношений» [11, с. 419]. В заключении к книге (§ 103) эта мысль выражена следующим образом: «Основная идея при этом заключается в том, что аффинная связь есть наиболее общая структура, лежащая в области применимости непрерывного анализа (утверждение, которое мы все же полностью не доказали), и поэтому может быть принята в качестве исходной точки для предсказаний» [11, с. 441].

Все же следует признать, что обоснование такого рода даже в 20-х годах не звучало слишком убедительно, тем более что вскоре были разработаны различные обобщенные геометрические системы (например, геометрии проективной и конформной связности).

Разумные геометрические соображения дают возможность ограничиться принятием требования симметрии для коэффициентов аффинной связности

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} = \Gamma_{\nu\mu}^{\alpha}, \quad (12)$$

что уменьшает число основных переменных с 64 до 40. Фактически именно при этом дополнительном условии получается геометрия аффинной связности. «Они (т. е. эти 40 величин $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$. — В. В.) служат для описания комплекса мировых соотношений,— подчеркивает Эддингтон первичность этих переменных,— и должны содержать все, что имеет значение для физики. Наша ближайшая задача заключается в том, чтобы показать, как можно извлечь обычные физические переменные из этого сырого материала» [11, с. 399].

Эта задача решается следующим образом. Сначала известным образом, путем рассмотрения параллельного переноса смещения вдоль малого замкнутого контура, выводится выражение для тензора кривизны 4-го ранга (аффинного аналога тензора Римана — Кри-

⁷ «Аксиома параллельного переноса есть выражение этой сравнимости, и постулированная таким образом сравнимость представляется почти минимально мыслимой. Только соотношения, близкие друг к другу, т. е. связанные в комплексе соотношений, предполагаются сравнимыми, и понятие эквивалентности применяется только к одному типу соотношений. Это сравнимое соотношение называется смещением. Выражая его графически (или геометрически.— В. В.), мы приходим к представлению о пространственной ориентации; основание, по которому нам кажется естественным выражать графически именно это специальное отношение (т. е. выражение (11).— В. В.), лежит вне поля зрения физики» [11, с. 419].

стоффеля):

$$\delta A^\mu = -1/2 \int \int *B_{\varepsilon\nu\sigma}^\mu dS^{\nu\sigma}, \quad (13)$$

$$\text{где } *B_{\varepsilon\nu\sigma}^\mu = -\frac{\partial}{\partial x_\sigma} \Gamma_{\nu\varepsilon}^\mu + \frac{\partial}{\partial x_\nu} \Gamma_{\sigma\varepsilon}^\mu + \Gamma_{\nu\alpha}^\mu \Gamma_{\sigma\varepsilon}^\alpha - \Gamma_{\sigma\alpha}^\mu \Gamma_{\nu\varepsilon}^\alpha. \quad (14)$$

звездочка (*) слева от обозначения этого тензора означает тензорный характер этой величины по отношению к калибровочным преобразованиям (в терминологии Эддингтона — ин-тензорный характер)⁸. Очевидно, что в конструируемой теории важнейшую роль должен играть соответствующий тензор кривизны 2-го ранга (аналог тензора Риччи):

$$*G_{\mu\nu} = *B_{\mu\nu\sigma}^\sigma. \quad (15)$$

Свертывая тензор $*B_{\mu\nu\sigma}^\varepsilon$ по индексам ε и μ , мы получим еще один важный антисимметричный тензор 2-го ранга:

$$2F_{\nu\sigma} = \frac{\partial \Gamma_\nu}{\partial x_\sigma} - \frac{\partial \Gamma_\sigma}{\partial x_\nu}, \quad (16)$$

где $\Gamma_\nu \equiv \Gamma_{\nu\alpha}^\alpha$.

Из выражения (15) видно, что тензор $2F_{\mu\nu}$ является антисимметричной частью $*G_{\mu\nu}$:

$$*G_{\mu\nu} - *G_{\nu\mu} = 2F_{\mu\nu}. \quad (17)$$

Таким образом, тензоры $*B_{\mu\nu\sigma}^\varepsilon$ и $*G_{\mu\nu}$ являются самыми основными мерами внутренней структуры мира». «Они предшествуют величинам $g_{\mu\nu}$ (т. е. метрике.— В. В.), которые вводятся лишь в дальнейшей стадии развития нашей теории», — замечает Эддингтон [11, с. 401].

Но в физике мы, безусловно, имеем дело с метрическими величинами. Однако конструкция, используемая Эддингтоном, достаточно сложна. Переход к операционально-измеримой метрике осуществляется в две стадии. Сначала метрика вводится формальным образом, это еще не та метрика, которая непосредственно измеряется. «...Длина в том виде, как она здесь определяется, не есть что-либо, что должно согласовываться с обычными физическими опытами» [11, с. 403]. И только впоследствии, вводя так называемую «естественную калибровку», Эддингтон показывает, «как нужно выбрать $g_{\mu\nu}$, чтобы условная длина (определенная на первой стадии.— В. В.) могла быть установлена обычными физическими опытами и таким образом превратиться в физическую длину» [11, с. 403—404].

Итак, пока формально вводится симметричный тензор 2-го ранга $g_{\mu\nu}$ и метрика ds^2 :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu. \quad (18)$$

Пусть теперь A_μ — некоторый отрезок (вектор), его длина выража-

⁸ Естественно, что в геометрии аффинной связности все основные тензоры, не связанные с использованием метрики, являются ин-тензорами.

ется тогда формулой

$$l^2 = g_{\mu\nu} A_\mu A_\nu. \quad (19)$$

При бесконечно малом параллельном переносе квадрат этой длины изменяется следующим образом:

$$\delta(l^2) = \left(\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\sigma} - \Gamma_{\sigma\mu,\nu} - \Gamma_{\sigma\nu,\mu} \right) A^\mu A^\nu dx^\sigma. \quad (20)$$

Величина, стоящая в скобках, как легко показывается, образует тензор $2K_{\mu\nu,\sigma}$. Составляя комбинацию из $K_{\mu\nu,\sigma}$ и обозначая ее $S_{\mu\nu,\sigma}$:

$$S_{\mu\nu,\sigma} = K_{\mu\nu,\sigma} - K_{\mu\sigma,\nu} - K_{\nu\sigma,\mu} \quad (21)$$

получаем для $\Gamma_{\mu\nu}^\sigma$ следующие выражения:

$$\Gamma_{\mu\nu}^\sigma = \{\mu\nu, \sigma\} + S_{\mu\nu}^\sigma, \quad (22)$$

где $\{\mu\nu, \sigma\}$ — символы Кристоффеля.

В геометрии Вейля, в частности,

$$K_{\mu\nu,\sigma} = g_{\mu\nu}\Phi_\sigma$$

и соответствующим образом специализируются коэффициенты аффинной связности. Таким образом, геометрия Вейля, как замечает Эддингтон, может рассматриваться как частный случай обобщенной аффинной геометрии.

Если вектор $S_{\mu\alpha}^\alpha$ обозначить $2\varphi_\mu$, то, как легко показать⁹,

$$F_{\mu\nu} = \varphi_{\mu\nu} - \varphi_{\nu\mu}. \quad (23)$$

Основополагающий тензор $*G_{\mu\nu}$ можно представить как сумму его антисимметричной $F_{\mu\nu}$ и симметричной $R_{\mu\nu}$ составляющих:

$$*G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}. \quad (24)$$

Разработав геометрический формализм теории, наводящий после ознакомления с теорией Вейля на мысль о том, что симметричный тензор $R_{\mu\nu}$ окажется ответственным за гравитацию, а антисимметричный тензор $F_{\mu\nu}$ (и вектор φ_μ) — за электромагнитное поле, Эддингтон переходит к наполнению этой геометрической схемы физическим содержанием. Основной проблемой в этом пункте, как и во 2-м варианте теории Вейля, стало согласование идеальной «геометрии мира», или «геометрии эфира», являющейся геометрией аффинной связности, с реальной, физической геометрией пространства-времени, которую обнаруживаем мы с помощью измерительных процедур.

Это согласование осуществляется посредством введения так называемой «естественной калибровки мира», которая заключается в такой специализации метрического тензора $g_{\mu\nu}$, оставшегося до сих пор произвольным, «чтобы длины смещений совпадали с теми

⁹ Эддингтон несложным расчетом показывает, как связаны $\Gamma_\mu = \Gamma_{\mu\alpha}^\alpha$ и φ_μ :

$$\Gamma_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} (\ln \sqrt{-g}) + 2\varphi_\mu.$$

длинами, которые дают измерения, произведенные при помощи материальных и оптических приборов» [11, с. 410]. По замыслу Эддингтона, $g_{\mu\nu}$ должен быть построен из основного строительного материала, содержащегося в «мировой геометрии». Единственным таким тензором является $*G_{\mu\nu}$, точнее, его симметричная часть $R_{\mu\nu}$. Это дает основание с его помощью выразить «естественную длину»:

$$l^2 = R_{\mu\nu} A^\mu A^\nu,$$

что ведет, с учетом выражения (19), к соотношению, лежащему в основе «естественной калибровки»:

$$\lambda g_{\mu\nu} = R_{\mu\nu}, \quad (25)$$

где λ — некоторая универсальная постоянная.

Далее показывается, что измерения длин, проводимые как с помощью твердых масштабов и часов, так и оптическими методами, приводят к соотношению (25). Таким образом, при использовании «естественной калибровки» основными переменными оказываются тензоры $g_{\mu\nu}$ и $K_{\mu\nu}^\sigma$. Но, по мнению Эддингтона, метрика — это единственное фундаментальное свойство физического пространства, через которое должны выражаться остальные геометрические характеристики. Поэтому, заключает он, «если $K_{\mu\nu}^\sigma$ не равно нулю, то должно иметься еще нечто, что *воспринимается* (курсив наш. — В. В.) не как свойство чистого пространства» и, таким образом, « $K_{\mu\nu}^\sigma$ должно быть приписано чему-то „вещному“» [11, с. 413]¹⁰.

Если же $K_{\mu\nu}^\sigma = 0$, то $R_{\mu\nu}$ сводится к обычному тензору Риччи $G_{\mu\nu}$, а уравнение «естественной калибровки» — к уравнению гравитационного поля, характерного для ОТО (для пустого пространства):

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = 0.$$

В результате надобность в специальном принципе действия для вывода уравнений гравитации отпадает.

Идея «естественной калибровки», как мы видели, была выдвинута Вейлем во втором варианте его теории в целях устранения трудности, связанной с «возражением Эйнштейна». «Эддингтон распространил мою мысль, — писал впоследствии Вейль, — о том, что радиус кривизны мира задает калибровку (Eichmaß), на тензор кривизны R_{ij} , и это привело к тому, что мир... следует описывать не посредством метрики, а с помощью 40 величин $\Gamma_{kl}^i = \Gamma_{lk}^i$ коэффициентов аффинной связности» [18, с. 430].

Вейль же в пятом издании своей книги «Пространство. Время. Материя», в Приложении IV, специально посвященном теории Эддингтона, обратил внимание на то, что процедура «естественной калибровки», по Эддингтону, можно истолковать как настройку на

¹⁰ $K_{\mu\nu}^\sigma$ является более общей характеристикой электромагнитного поля, чем $F_{\mu\nu}$ или Φ_a . В частном случае геометрии Вейля

$$K_{\mu\nu, \sigma} = g_{\mu\nu}\Phi_\sigma.$$

кривизну. В результате в этой теории можно говорить о неизменности малого масштабного стержня «не только при его переносе в другое место, то также и при его вращении в одном и том же месте вокруг начальной точки» [64, с. 323]. Таким образом, в теории Эддингтона масштаб устанавливается, или настраивается, в каждом направлении по-разному, именно по радиусу кривизны, соответствующему данной точке и данному направлению. Эта как бы более чувствительная (чем в теории Вейля) настройка масштабов позволяет согласовать геометрию аффинной связности, понимаемую как ненаблюдаемую «геометрию эфира», с «естественной геометрией», которая обнаруживается на опыте и дается ОТО, т. е. с римановой геометрией.

Программа геометризации реализуется Эддингтоном на основе «принципа отождествления» элементов развитой им геометрической структуры с основными физическими величинами. «Если нам удастся провести эту программу полностью, — замечает он, — то тем самым мы из комплекса элементарных соотношений построим мир определенных сущностей, который ведет себя так же и подчиняется тем же законам, что и величины, познаваемые из физических опытов» [11, с. 414]. Первым шагом в этом процессе отождествления было введение метрики $g_{\mu\nu}$ через посредство тензора $R_{\mu\nu}$. Это, кстати говоря, привело к уравнению гравитации ОТО для пустого пространства. Затем следует отождествление «вещей» (энергии-импульса «материи», напряженностей электромагнитного поля, зарядов и токов) с геометрическими величинами. Причем эти отождествления производятся так, чтобы удовлетворить известным из опыта и теоретически апробированным уравнениям и соотношениям типа законов сохранения, уравнений Максвелла и пр.

Так, тензор энергии-импульса материи отождествляется с тензором Эйнштейна:

$$-8\pi T_{\mu\nu} = G_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}(G - 2\lambda),$$

в результате получаются уравнения гравитационного поля в общем случае, которые очевидным образом согласуются с уравнением естественной калибровки (25). Тензор электромагнитного поля отождествляется с тензором $F_{\mu\nu}$, который в силу своих геометрических свойств удовлетворяет (тождественно) первой половине уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} + \frac{\partial F_{\nu\sigma}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial F_{\sigma\mu}}{\partial x_\nu} = 0.$$

Если же в соответствии с законом сохранения заряда ($J^\mu_{;\mu} = 0$) отождествить четырехмерный вектор тока J^μ с дивергенцией антисимметричного контрвариантного тензора, то, взяв в качестве этого тензора $F^{\mu\nu}$ ($J^\mu = F^\mu{}_\nu{}^{;\nu}$), мы получим и вторую пару максвелловских уравнений.

Однако Эддингтон подчеркивает, что ввиду отсутствия ясных представлений о строении электрона не удастся столь же естественным и простым путем ввести в геометрическую схему уравнение движения электрона под действием электромагнитного поля и выражение для силы, действующей при этом на него¹¹. Таким образом, фундаментальная физика, в первую очередь теория гравитации и электромагнетизма, получала единое геометрическое описание, причем уравнения полей удовлетворялись автоматически, в результате разработанной им процедуры отождествления. Эти уравнения не отличались от тех, которые фигурировали в ОТО и классической электродинамике, так же как геометрия физического пространства-времени оставалась римановой, несмотря на использование при построении основных величин геометрии аффинной связности. Достигнутая геометризация отличалась от той, к которой стремился Вейль в первом варианте своей теории, и даже от более ослабленной ее модификации, проведенной во втором варианте вейлевской теории.

Несмотря на то что электромагнитным величинам соответствовали вполне определенные геометрические характеристики пространства аффинной связности, эта новая, расширенная геометрия оставалась ненаблюдаемой, и в этом отношении геометрический статус гравитационного и электромагнитного полей был принципиально различным. В заключение своей статьи 1921 г. Эддингтон писал: «Возникает такое впечатление, что в свете обобщенной теории эйнштейновская теория (т. е. ОТО.— В. В.) должна рассматриваться лишь как некоторое хорошее приближение. Это впечатление ошибочно, так как настоящая работа приводит к выводу, что эйнштейновские постулаты и выводы точны. Естественная геометрия мира...— это геометрия Римана и Эйнштейна, а не обобщенная геометрия, разработанная Вейлем или мной» [174, с. 121].

Идея Вейля об удвоении геометрии нашла в теории Эддингтона свое полное выражение. С одной стороны, полная (или почти полная) геометризация достигается на основе ненаблюдаемой «геометрии эфира» (или «мировой геометрии»), которая является геометрией аффинной связности и описывается тензорами $*B_{\mu\nu}^{\epsilon}$ и $*G_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + F_{\mu\nu}$ (при $\lambda = 1$). С другой стороны, настройка масштабов на кривизну («естественная калибровка») приводит к тому, что геометрией реального пространства продолжает оставаться риманова геометрия, полностью описываемая метрикой $g_{\mu\nu}$.

В книге «Теория относительности» эта точка зрения на геометризацию физики выражена еще более выпукло: «В дальнейшем открываются два пути для обобщения наших геометрических воззрений. Во-первых, можно предположить, что риманова геометрия, приписанная нами действительному пространству, применима к нему не вполне точно и что истинной является геометрия более общего

¹¹ «Мы можем здесь показать только очень несовершенным образом,— замечает Эддингтон,— что наши тензоры удовлетворяют этому закону, так как полное доказательство потребовало бы более детального знания структуры электрона» [11, с. 416].

типа (например, геометрия Вейля.— В. В.)... Другая возможность заключается в том, чтобы придать всем нашим переменным... соответствующий геометрический смысл в некотором новом мысленном пространстве, которое не является действительным пространством... Такая обобщенная графическая схема может быть найдена либо полезной, либо бесполезной для развития наших знаний; во всяком случае, мы попытаемся ее осуществить в надежде, что она сделает более понятной связь между электромагнитными и гравитационными явлениями» [11, с. 372].

Переход к обобщенной геометрии Эддингтон, как мы видели, связывал с надеждами на решение проблемы электрона. Увеличение числа основных переменных (с 14 до 40), как казалось ему, открывало, несмотря на отсутствие какого-либо физического смысла, точнее, операционально-измерительного оправдания, новой геометрии хорошие возможности для включения в нее новой физики, связанной с изучением электрона, квантов и атомного ядра. Не менее богатые возможности, по его мнению, могли бы открыться при переходе от тензора $*G_{\mu\nu}$ к тензору 4-го ранга $*B_{\mu\nu\sigma}^{\rho}$.

Если же окажется, что «лишние» переменные ($\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma}$ или $B_{\mu\nu\sigma}^{\rho}$), «хлам», как их называет Эддингтон, не связаны с проблемами микрофизики, то они так и останутся «хламом» и о них нельзя будет ничего узнать с помощью соответствующих приборов. В этом случае «хлам» окажется бесполезным, но и не принесет вреда, если «устранить его из проблем, для которых он несуществен», например, путем введения «естественной калибровки»¹².

Основные уравнения физики, как мы видели, получались в результате описанной выше процедуры отождествления и использования геометрических свойств отождествляемых тензоров. В основной части своей теории Эддингтон фактически обходился без принципа действия. Однако в книге «Теория относительности» он рассмотрел, следуя Вейлю, возможность использования принципа действия с «обобщенным объемом» в качестве лагранжиана

$$\delta \int \sqrt{-|*G_{\mu\nu}|} d\tau = 0. \quad (26)$$

Вычислив лагранжиан в галилеевых координатах, а затем ввиду его инвариантности перенеся полученный результат на случай произвольной координатной системы, он получает для него выражение

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4} (R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}) \sqrt{-g} = \frac{1}{4} *G_{\mu\nu} *G^{\mu\nu} \sqrt{-g}. \quad (27)$$

¹² Эти рассуждения Эддингтон продолжает следующим, весьма любопытным с методологической точки зрения образом. «Лишние» переменные не обязательно должны быть исключены из теории или обращены в нуль, так как «нам может быть известна только часть существующих (в расширенном смысле) вещей, причем выбор обусловлен свойствами тех приборов, которые могут быть использованы для исследования природы... Совсем незачем,— продолжает он,— вводить особые ограничения структуры мира с целью исключения всего, что не может быть установлено физикой, и после этого удивляться этим ограничениям. Ясно, что причиной этих ограничений является тогда не структура мира» [11, с. 424].

Этот результат получен в пренебрежении четвертыми степенями $F_{\mu\nu}$. Если же учесть члены более высокого порядка, то, как показывает Эддингтон, получается некоторое обобщение электродинамики, согласно которому вакуум обладает определенными, отличными от 1 значениями «фиктивных» диэлектрической и магнитной проницаемостей и даже «фиктивными» зарядом и током. «Нам казалось, — резюмировал Эддингтон, — не лишенным интереса разобратить несколько подробнее видоизменение уравнений Максвелла, которое может получиться при дальнейшем развитии теории ... Однако предположенные изменения ни в коем случае не претендуют на окончательность» [11, с. 434—435].

Эддингтон ясно понимал, что его «обобщенная теория» не затрагивает, в сущности, кардинальные проблемы микрофизики, связанные со строением электрона и квантами, хотя и не исключал возможности дальнейшего ее развития в указанном направлении. Но он считал, что в своей теории он вплотную подошел к границам того, что вообще для физики может дать «анализ непрерывных величин».

Теория Эддингтона вызвала большой интерес среди тех, кого волновали проблемы построения единой геометризованной теории поля. Рассмотрим вкратце реакцию главных авторитетов — Вейля и Эйнштейна. Вейль писал о теории Эддингтона и в цитированной выше статье 1921 г. (в «Phys. Zeitschr.» [165]), и затем несколько более подробно в Приложении IV к пятому изданию книги «Пространство, Время, Материя» [64]. Он подчеркивал преемственную связь этой теории со вторым вариантом своей теории, хотя и указывал на еще больший разрыв с опытом, возникающий в новой теории. Главным недостатком схемы Эддингтона он считал отсутствия какого-либо обоснования невырожденности метрики и постоянства индекса инерции метрической квадратичной формы (проблема, которая, по мнению Вейля, возникает в любой неметрической теории). В метрических теориях решение этой проблемы связано с привлечением теоретико-групповых рассуждений.

Вейль полагал также, что отказ от первичности метрики и выдвижение на первый план аффинной связности не имеют никакого экспериментального оправдания и что эддингтоновский вариант «естественной калибровки», связанной с настройкой на кривизну масштабов и масс по-разному в различных направлениях, не выглядит физически убедительным. Впоследствии Вейль дважды в обзорно-историческом плане писал о теории Эддингтона (в 1931 г. [17] и в 1950 г. [18]). Он всегда подчеркивал, что движение по инерции скорее проективное, а не аффинное свойство и поэтому оно не может служить физическим оправданием предпочтения аффинной геометрии, которое отдается в теории Эддингтона. В статье 1931 г., впрочем, он согласился с последним в том, что аффинная связность играет исключительную роль в формулировке физических законов. Это же подчеркивал и Эйнштейн в своем нобелевском докладе (1923) [175], хотя считал, что Эддингтону не удалось найти полевые уравнения, отвечающие всем 40 переменным $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$ [176].

В 1921 же году возникло еще одно новое направление в развитии ЕГТП, сыгравшее важную роль и в формировании геометризованной полевой программы синтеза физики, и в последующем ее развитии. Речь идет о пятимерной единой теории гравитационного и электромагнитного полей Т. Калуцы. Если Вейль и Эддингтон в своих попытках построения ЕГТП оставались на почве четырехмерного пространства событий, достигая обобщения ОТО за счет отказа от римановой метрики и перехода к различным вариантам пространств аффинной связности, то немецкий математик Т. Калуца нашел способ единого описания гравитации и электромагнетизма в рамках римановой геометрии, но не четырех, а пяти измерений.

Теодор Франц Эдуард Калуца родился в г. Ратибор [ныне г. Рацибуж (Rasiborz) в Польше] в 1885 г. в семье Макса Калуцы — крупного специалиста по английскому языку и английской литературе, автора широко известных трудов по фонетике английского языка и о жизни и творчестве Чосера. Т. Калуца поступил в Кенигсбергский университет в восемнадцатилетнем возрасте и через пять лет (в 1909 г.) под руководством кенигсбергского математика В. Ф. Мейера успешно защитил диссертацию о преобразовании Чирнгауза. Это преобразование было связано с одним из методов изучения проблемы разрешимости алгебраических уравнений в радикалах. Калуца остался в Кенигсбергском университете в должности приват-доцента, где ему так и не удалось получить профессорское звание, которое было присвоено ему после перехода в Кильский университет (1929), т. е. через двадцать лет после защиты диссертации. В 1935 г. он переехал в Геттинген, где и проработал до конца своей жизни (1954) [177].

Его интересы выходили далеко за пределы не только алгебры, но и математики вообще. Уже в 1910 г. он опубликовал в «Phys. Zeitschr.» работу по специальной теории относительности [178]. Повидимому, с этих пор он продолжал живо интересоваться вопросами теории относительности. Над своим пятимерным обобщением ОТО он работал в течение нескольких лет. Во всяком случае, известно, что первый набросок его единой теории содержался уже в его письме к Эйнштейну, написанном в марте или апреле 1919 г. [177, с. 212]. Знаменитая же работа Калуцы, положившая начало исследованиям по пятимерным единым теориям поля, была доложена Эйнштейном на заседании Берлинской академии наук 8 декабря 1921 г. [179]. В сущности, именно эта работа Калуцы сделала его имя широко известным среди специалистов по теоретической физике. Другие его работы — по алгебре, анализу, математической физике, методологическим аспектам теории относительности и расчетам ядерных моделей — не получили известности. Впрочем, в 1938 г. им вместе с Г. Йосом был опубликован учебник по прикладной высшей математике, который обладал определенными методическими достоинствами.

Несколько забегая вперед, заметим, что Эйнштейн весьма высоко оценил идею Калуцы уже весной 1919 г., после того как получил от него письмо, в котором был дан набросок будущей теории. Эйнштейн писал (письмо датировано 21 апреля 1919 г.): «Мысль о том, чтобы выразить их (электромагнитные величины.— В. В.) с помощью некоторого пятимерного цилиндрического мира, никогда не приходила мне в голову и, очевидно, является вполне оригинальной. Ваша идея мне весьма импонирует» [177, с. 212]. Возможно, Эйнштейн предпринимал также некоторые усилия для того, чтобы кенигсбергский приват-доцент получил наконец место профессора. В письме к одному из своих коллег он писал в ноябре 1926 г., что он высоко ценит «творческие способности» (schöpferische Begabung) Калуцы, который «работает в весьма тяжелых условиях», и что он «был бы очень обрадован, если бы Калуце удалось обеспечить подходящую ему сферу деятельности» [там же]. Для него, как и почти для всех, кто в начале 20-х годов включился в разработку ЕГТП, решающее значение имела теория Вейля. «Несколько лет назад Г. Вейль... — писал Калуца в начале своей статьи, — сделал поразительно смелый шаг к решению этой проблемы¹³ — одного из великих устремлений человеческого духа (den grossen Lieblingsideen des Menschengesistes). Он еще раз радикально пересмотрел основания геометрии и ввел наряду с тензором $g_{\mu\nu}$ фундаментальный метрический вектор, истолковав его как электромагнитный потенциал q_* . Эта полная мировая метрика оказывается у него единым источником всех явлений природы (gemeinsamer Quell alles Naturgeschehens). Здесь ставится та же цель, но выбран иной путь» [179, с. 529].

При этом свой способ решения проблемы Калуца считал более адекватным с точки зрения принципа единства физической картины мира. Имея в виду свою теорию, он говорил, что в ней достигается «еще более полная реализация идеи единства» (eine noch vollkommene Vewirklichung des Unitätsgedankens), так как «и гравитационное и электромагнитное поля выводятся из *одного-единственного* универсального тензора».

Впрочем, начинает свое построение Калуца не с этого тензора, именно тензора кривизны, или соответствующего метрического тензора пятимерного пространства, а с коэффициентов аффинной связности, или символов Кристоффеля. Важным наводящим соображением для него была отмечавшаяся многими исследователями аналогия между уравнениями гравитационного и электромагнитного полей. Эту аналогию, рассматривая, правда, гравитацию в рамках тензорной (но не общековариантной) теории тяготения, отмечал еще

¹³ А саму эту проблему он характеризует следующим образом: «В общей теории относительности наряду с тензорным потенциалом гравитации — фундаментальным метрическим тензором четырехмерного многообразия $g_{\mu\nu}$ — для описания мировых событий должен привлекаться и *электромагнитный 4-потенциал* q_* . Сохраняющийся при этом *дуализм* гравитации и электромагнетизма не лишает этой теории ее пленяющей красоты, но бросает вызов — преодолеть его, дав полностью *единую картину мира*» [179, с. 529].

в 1913 г. Эйнштейн. Он показал, что при учете в тензоре энергии-импульса скоростей масс только в первой степени уравнения гравитационного поля и уравнение движения материальной точки в этом поле приобретают форму, вполне аналогичную соответствующим уравнениям электродинамики. Гравитационный потенциал при этом является четырехвектором. Упомянув о том, что эта аналогия была для него существенна, Калуца сослался на статью Г. Тирринга, детально проанализировавшего ее в рамках ОТО [181].

Цепочка рассуждений, приведшая Калуцу к пятимерию, была такова. Аналогия между уравнениями гравитационного и электромагнитного полей, в частности некоторое структурное подобие тензора напряженностей электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$ и символов Кристоффеля, отождествляемых с напряженностями гравитационного поля, наводит на мысль о том, что первые являются некоторой вырожденной формой вторых, но поскольку в четырехмерном пространстве все коэффициенты аффинной связности отождествлены с гравитационными напряженностями и являются комбинациями из производных гравитационного потенциала, то выход может заключаться в использовании пятимерного риманова пространства. Отмеченные соответствия и аналогия, подчеркивает Калуца, «прямо-таки принуждают к мысли о том, что величины ${}^1/2 F_{\mu\lambda} = {}^1/2 (q_{\mu\lambda} - q_{\lambda\mu})$ — это, может быть, каким-то образом „искаленные“ („verstümmelte“)

трехиндексные величины $\left[\begin{matrix} i\lambda \\ \kappa \end{matrix} \right] = {}^1/2 (g_{i\kappa\lambda} + g_{\kappa i} - g_{i\lambda\kappa})$ ¹⁴. Допустив такую мысль, — продолжает он, — исследователь почти неизбежно оказывается на пути, который поначалу кажется малообещающим: ведь в четырехмерном мире нет других трехиндексных величин, кроме уже используемых в качестве компонент гравитационной напряженности, и указанный взгляд на величины $F_{\mu\lambda}$ вряд ли может означать иное, нежели весьма озадачивающее решение призвать на помощь *пятое измерение мира* (wohl stark befremdenden Entschluss ... eine neue fünfte Weltdimension zu Hilfe zu rufen)» [179, с. 529—530].

Конечно, реальное четырехмерное пространство событий, замечает далее Калуца, можно рассматривать вложенным в соответствующее пятимерное риманово пространство, подобно тому как двумерные образования вложены в трехмерное пространство. Но тогда, учитывая, что «весь опыт, накопленный физикой, не дает никаких указаний на такой добавочный мировой параметр», нужно потребовать, чтобы производные всех характеристик состояния систем по пятой координате обращались в нуль. Это требование, которое, конечно, может выполняться и приближенно, Калуца называет «условием цилиндричности» (Zylinderbedingung). Это условие, разумеется, ни в коей мере не означает, что все добавочные коэффициенты связности должны обратиться в нуль.

¹⁴ Индекс, перед которым стоит точка, имеет смысл дифференцирования по соответствующей координате.

На использование пятимерия в задаче геометрического объединения гравитации и электромагнетизма Калуца могла натолкнуть более ранняя аналогичная попытка Нордстрема, который еще в 1914 г. в рамках элегантной пятимерной схемы объединил свою скалярную теорию тяготения с классической электродинамикой. Он, как мы видели выше, рассмотрел антисимметричный тензор 2-го ранга в пятимерном пространстве (физический смысл пятой координаты оставался неясным), шесть компонент которого были истолкованы как напряженности электромагнитного поля, а оставшиеся четыре — как 4-вектор напряженности гравитационного поля, и записал для него соответствующее обобщение максвелловских уравнений. В его схеме использовался также аналог «условия цилиндричности». Нордстрем подчеркивал формальный характер достигнутого им объединения, хотя и надеялся, что оно «может иметь более глубокую основу». Еще раз отметим, что, в сущности, это была первая единая геометризованная теория поля, использовавшая искривленное пространство-время, поскольку метрика его отличалась от псевдоевклидовой:

$$ds^2 = \Phi \sum_i dx_i^2.$$

Статья Нордстрема была опубликована в широко известном журнале «Phys. Zeitschr.», в котором к тому же незадолго до этого была напечатана и статья самого Калуцы по теории относительности [178]. Кроме того, нордстремовское обобщение не прошло незамеченным. О нем говорилось в обширном обзоре Абрагама по теориям гравитации (1914) [113], а также в книге Вейля «Пространство. Время. Материя». И хотя Калуца в своей статье ссылается только на первую статью Вейля по единой теории поля (в «Sitzber. Preuss. Ak. Wiss») [86], где ссылка на работы Нордстрема и Абрагама отсутствует, трудно представить себе, чтобы он был незнаком со знаменитой книгой Вейля, в которой эти ссылки имеются. Конечно, к 1919—1921 гг., когда скалярные теории тяготения уже утратили свою актуальность, Калуца мог забыть статью Нордстрема, чем и объясняется отсутствие соответствующей ссылки. Но это отсутствие могло быть вызвано и тем — в случае если Калуца не оставил без внимания нордстремовскую теорию, — что он считал свое построение совершенно иным, а гравитационную часть теории Нордстрема полностью ошибочной.

Вернемся к построению Калуцы. Он фактически постулирует пятимерное риманово пространство событий R_5 (в системе принятых им обозначений) с координатами x^0, x^1, x^2, x^3, x^4 (новая, пятая координата — x^0), метрическим тензором g_{rs} (латинские индексы пробегают значения от 0 до 4, а греческие — от 1 до 4) и символами Кристоффеля $\begin{bmatrix} ik \\ l \end{bmatrix} = -\Gamma_{ikl}$. Затем он выписывает с учетом «условия цилиндричности» значения всех Γ_{ikl} через производные g_{rs} по координатам. Помимо 40 «четырёхмерных» $\Gamma_{\mu\nu\lambda}$, описывающих гравитационное поле, появляется еще 35 новых трехиндексных величин

$\Gamma_{0\kappa\lambda}$, $\Gamma_{\kappa\lambda 0}$, $\Gamma_{0\kappa\kappa}$, $\Gamma_{0\kappa 0}$, Γ_{000} следующего вида:

$$2\Gamma_{0\kappa\lambda} = g_{0\kappa\cdot\lambda} - g_{0\lambda\cdot\kappa}, \quad (28)$$

$$2\Gamma_{\kappa\lambda 0} = -(g_{0\kappa\cdot\lambda} + g_{0\lambda\cdot\kappa}), \quad (29)$$

$$2\Gamma_{000} = 0. \quad (30)$$

Кроме шестерки величин $\Gamma_{0\kappa\lambda}$, которые можно было бы отождествить с компонентами антисимметричного тензора электромагнитного поля, получаются еще два типа величин $\Gamma_{\kappa\lambda 0}$ и две четверки градиентных величин, отличающихся знаком, $\Gamma_{0\kappa\kappa} = -\Gamma_{0\kappa 0}$, «которые в предполагаемой трактовке также должны были бы обладать электрической природой» и поэтому «угрожают стать помехой». Чтобы обеспечить пропорциональность $F_{\mu\nu}$ и $\Gamma_{0\mu\nu}$, естественно четыре компоненты электромагнитного потенциала q_μ отождествить с четырьмя компонентами пятимерного метрического тензора $g_{0\mu}$:

$$g_{0\mu} = 2\alpha q_\mu,$$

где α — некоторая постоянная, значение которой будет определено впоследствии. Смысл последней, «угловой» компоненты, обозначенной Калуцой g ,

$$g_{00} = 2g, \quad (32)$$

остается пока не выясненным.

Неясным остается и смысл «побочного» поля (Nebefeld)

$$\Sigma_{\mu\nu} = q_{\mu\cdot\nu} + q_{\nu\cdot\mu} = -\frac{1}{\alpha} \Gamma_{\mu\nu 0}, \quad (33)$$

обладающего ввиду симметрии десятью компонентами. Однако уравнения поля в соответствии с духом ОТО должны записываться в терминах тензора кривизны 2-го ранга. Иначе говоря, уравнения для пятимерного аналога тензора Риччи

$$R_{ik} = 0 \quad (34)$$

должны заключать в себе и уравнения гравитации, и уравнения электромагнитного поля. Соответствующее отождествление Калуца приводит в приближении слабых полей, которое он называет первым приближением:

$$g_{ik} = \delta_{ik} + \gamma_{ik}, \quad (35)$$

где δ_{ik} — пятимерный псевдоевклидовский тензор, а γ_{ik} — бесконечно малый симметричный тензор 2-го ранга.

Вычисление компонент R_{ik} в принятом приближении приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned} R_{\mu\nu} &= \Gamma_{\mu\nu\cdot\rho}^\rho = 0, \\ R_{0\mu} &= \alpha (\text{Div } F)_\mu = 0, \end{aligned} \quad (36)$$

$$R_{00} = -\square g = 0.$$

Первое уравнение в сделанном приближении совпадает с системой

уравнений гравитационного поля. Второе дает дивергентную четверку уравнений Максвелла. Кстати говоря, другая пара максвелловских уравнений получается из тождества для Γ_{ik} с учетом «условия цилиндричности». «Побочное» поле $\Sigma_{\mu\nu}$ несколько неожиданным образом выпало из системы уравнений (36), но последнее уравнение еще требует своего истолкования. Полученный результат, по словам Калуцы, можно рассматривать как «первое подтверждение нашего предположения и поддержку надежды на возможность истолкования гравитации и электричества как проявлений некоторого универсального поля» [179, с. 531].

Требовалось еще, во-первых, рассмотреть случай непустого пространства (с тензором энергии-импульса материи $T_{ik} \neq 0$), во-вторых, выяснить смысл величины g и третьего уравнения системы (36) и, наконец, рассмотреть вопрос об уравнениях движения заряженных частиц в электромагнитном и гравитационном полях. При решении первой задачи Калуца рассматривает пятимерный тензор T_{ik} — обобщение четырехмерного кинетического тензора Минковского

$$T_{\rho\nu} = \mu_0 u_\rho u_\nu.$$

Нулевые компоненты T_{ik} при этом отождествляются с компонентами плотности 4-тока:

$$T_{0\alpha} = \mu_0 u^0 u^\alpha = \frac{\alpha}{\kappa} \rho_0 v^\alpha, \quad (37)$$

где ρ_0 — инвариантная плотность заряда; κ — гравитационная постоянная; $v^\alpha = dx^\alpha/ds$, $ds = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$. «Таким образом, — замечает Калуца, — пространственно-временной тензор энергии, по существу, дополняется плотностью тока». Этот тензор теперь следовало бы подставить в пятимерное уравнение

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik} \quad (38)$$

и произвести вычисления в приближении $g_{ik} = \delta_{ik} + \gamma_{ik}$. У самого Калуцы подробности этого расчета отсутствуют, но они воспроизведены, например, в работе Г. Бека по общей теории относительности, написанной в 1929 г. для IV тома «Handbuch der Physik» [15]. Как известно, уравнение (38) в указанном приближении сводится к уравнениям для γ_{ik}

$$\frac{1}{2} \square (\gamma^{ik} - \frac{1}{2} \delta^{ik} \gamma_{rs} \delta^{rs}) = \kappa T^{ik}. \quad (39)$$

Если учесть, что $\delta_{ik} \delta^{ik} = 5$, то уравнение (39) нетрудно свести к уравнению

$$\frac{1}{2} \square \gamma^{ik} = \kappa (T_1^{ik} - \frac{1}{3} \delta^{ik} T). \quad (40)$$

Для $i = 0$, $k = 1, 2, 3, 4$ это уравнение приобретает форму волнового уравнения для электромагнитного потенциала. Для $i, k = 1, 2, 3, 4$ получаются соответствующие уравнения гравитационного поля (в первом приближении).

Чтобы выяснить смысл g (или γ^{00} — в обозначениях Бека), Калуца делает еще одно допущение, которое называет вторым приближением. Он полагает, что компоненты пятискорости $u^r = dx^r/ds$ удовлетворяют следующим условиям малости:

$$u^0, u^1, u^2, u^3 \ll 1, \quad u^4 \sim 1. \quad (41)$$

Из этих условий следует не только малость скоростей, но и малость удельного заряда движущегося объекта. Действительно, из соотношения (37) и соотношений

$$d\sigma^2 \sim ds^2, \quad v^u \sim u^u,$$

справедливых при условиях (41), следует

$$\rho_0 = \frac{\kappa}{\alpha} \mu_0 u^0 = 2\alpha \mu_0 u^0 \ll \mu_0. \quad (42)$$

Здесь принято, что $\alpha = \sqrt{\kappa}/2$, что оправдывается, как мы увидим, соответствующим истолкованием уравнения геодезической как уравнения движения заряженной частицы. Соотношение (42), как замечает Калуца, дает возможность истолковать электрический заряд как нятую компоненту импульса. Поскольку во втором приближении $T_{00}, T_{11}, T_{22}, T_{33} \sim 0$, то $T = -\mu_0$, и оказывается, что

$$R_{00} = -R_{44} = \frac{\kappa}{2} \mu_0,$$

откуда в соответствии с третьим уравнением системы (36) следует, что «угловой» потенциал g сводится к гравитационному потенциалу с обратным знаком. Тот же результат, естественно, получается из уравнения (40) для γ^{00} :

$$\square \gamma^{00} = -\frac{2}{3} \kappa \delta^{00} \mu_0 c^2,$$

что означает пропорциональность γ^{00} и γ^{44} . Таким образом, неприятности, связанные с появлением «лишних» величин, именно «побочного» поля и «углового» потенциала, оказываются (в указанных приближениях) несущественными.

Далее Калуца рассматривает уравнение геодезической линии в пятимерном римановом пространстве

$$\frac{du^i}{ds} - \Gamma_{rs}^i u^r u^s = 0$$

и показывает, что во втором приближении оно может быть истолковано как уравнение движения заряженной частицы в гравитационном и электромагнитном полях. Действительно,

$$\frac{dv^\lambda}{d\sigma} = \Gamma_{\rho\sigma}^\lambda v^\rho v^\sigma + 2\alpha F_{\kappa\lambda}^\lambda u^0 v^\kappa - g_{\cdot\lambda} u^{0\lambda}. \quad (43)$$

Здесь принято, что $d\sigma \sim ds$, а также использованы отождествления

$$\Gamma_{\kappa\lambda}^\lambda = \alpha F_{\kappa\lambda}, \quad \Gamma_{0\kappa}^\lambda = -\Gamma_{\kappa 0}^\lambda = g_{0\kappa}.$$

Отсюда ввиду малости $u^{0\lambda}$ плотность силы («пондеромоторной

силы») оказывается равной

$$\pi^\lambda = \Gamma_{\rho\sigma}^\lambda T^{\rho\sigma} + F_{\mu\nu}^\lambda j^{\mu\nu}, \quad (44)$$

где j — плотность тока. Кстати говоря, именно этой формулой оправдывается выражение α через гравитационную постоянную $\alpha = \sqrt{\kappa/2}$. Нулевая компонента уравнения геодезической (для $l=0$), с учетом сделанных приближений (т. е. в квазистатическом случае), обеспечивает закон сохранения плотности электрического заряда. Калуца также подчеркивает, что «побочное» поле не обнаруживает себя и в уравнениях движения.

Все же проблема объединения гравитационного и электромагнитного полей решалась только приближенно. В частности, сам Калуца подчеркивал, что для электрона, например, условие малости ρ_0/μ_0 не выполняется и поэтому все, что получено во втором приближении теории, относится лишь к макроскопическим явлениям, и «встает коренной вопрос о ее применимости к упомянутым частицам — кирпичикам (т. е. микрочастицам. — В. В.)». Таким образом, он считал, что при описании микроявлений потребуется существенная модификация теории.

Хотя в работе не формулируется явным образом задача-максимум ЕГТП — получение из полевых уравнений частицеподобных решений того или иного рода, несколько туманная концовка статьи позволяет считать, что автор думал и об этой возможности. Он также ясно видел трудность согласования своей теории, как, впрочем, и всех других ЕГТП с квантовой конденсацией: «Вообще любой гипотезе, претендующей на универсальное значение, угрожает сфинкс современной физики — квантовая теория». Отмечая столь поразительное «формальное единство» (*formale Einheitlichkeit*) двух полевых феноменов, Калуца выражал сомнение в том, что это — «всего лишь капризная игра обманчивой случайности». Он надеялся, что за этим стоит «нечто большее, нежели пустой формализм».

Естественно, что первым, кто откликнулся на работу Калуцы, был Эйнштейн. Примерно через месяц после представления этой работы в Берлинской академии наук он вместе с талантливым математиком Я. Громмером¹⁵ закончил работу, посвященную доказательству отсутствия в теории Калуцы всюду регулярного центрально-симметричного решения, которое можно было отождествить с электроном [183].

Вот как оценивается теория Калуцы в этой статье: «Недавно Т. Калуца представил Академии наук в Берлине проект теории, которая устраняет все эти недостатки (имеются в виду недостатки

¹⁵ Якоб Громмер изучал математику в Геттингене под руководством О. Теплица и написал работу, которая, по мнению Теплица, а затем и Гильберта, существенно превышала требования, предъявляемые к докторской диссертации. Но получение степени затруднялось из-за отсутствия диплома об окончании гимназии. В конечном счете Гильберту удалось добиться, чтобы Громмер получил докторскую степень [106]. Интересные материалы о Громмере, который в последние годы своей жизни был профессором математики в Белорусском университете в Минске, содержатся в работе [182].

теории Вейля: разрыв физических и геометрических оснований, представление лагранжиана как суммы электромагнитной и гравитационной составляющих, четвертый порядок полевых уравнений. — В. В.)» [183, с. 130]. Описав затем формальную структуру теории и заметив, что угловая компонента (g_{55} или g_{00}), не имеющая физической интерпретации, возможно, связана с давлением Пуанкаре, фигурирующим в классической теории электрона, Эйнштейн и Громмер подчеркнули важное достоинство теории: «Перед нами появляется возможность построить физическую картину мира на основе единой функции Гамильтона, не состоящей из суммы разнородных членов» [183, с. 131].

Естественно, что Эйнштейну хотелось на пути, открытом Калуцей, пойти дальше, и он (вместе с Громмером) замечает: «Конечной целью является чистая теория поля, в которой переменные поля изображали бы как поле „пустого пространства“, так и электрически заряженные элементарные частицы, образующие „вещество“» [183, с. 131]. Однако надежда на то, что теория Калуцы позволит решить эту проблему, как показали Эйнштейн и Громмер, не оправдалась. Впрочем, они указали также на основной теоретический изъян теории, который впоследствии рассматривался как главный теоретический недостаток всех пятимерных теорий: «Нельзя умолчать о принципиально слабом пункте идеи Калуцы. В общей теории относительности, имеющей дело с четырехмерным континуумом, форма

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$$

означает величину, непосредственно измеримую с помощью масштабов и часов в локально инерциальной системе, тогда как в пятимерном континууме теории Калуцы ds^2 представляет собой чистую абстракцию, по-видимому лишенную непосредственно метрического смысла. Поэтому с физической точки зрения требование общей ковариантности всех уравнений в пятимерном континууме представляется совершенно необоснованным. Кроме того, возникает сомнительная асимметрия, когда требованием цилиндричности одно измерение выделяется из всех других, в то время как в структуре уравнений все пять измерений должны быть равноправными» [183, с. 131—132].

Как мы помним, Паули с большим энтузиазмом в течение почти двух лет занимался теорией Вейля. Когда Калуца выдвинул свою теорию, Паули уже отошел от единых теорий поля и был всецело погружен в проблемы квантовой теории. Примерно через полтора десятилетия его внимание привлекло проективное оформление идеи пятимерия, разработанное в начале 30-х годов О. Вебленом и Б. Гоффманом, а также Я. А. Схоутеном и Д. ван Дантцигом. В английском издании своей энциклопедической статьи по теории относительности (1956) Паули включил дополнение, посвященное космологии и единым теориям поля. В этом дополнении он резюмировал

свою критику пятимерных теорий (включая проективные)¹⁶ следующим образом: «...не существует причин с точки зрения ограниченной цилиндрической метрики, чтобы в качестве подынтегрального выражения в интегралы действия выбрать именно пятимерную скалярную кривизну» [2, с. 427]. Иначе говоря, уравнения поля не являются следствием геометрической структуры, поскольку группа ковариантности теории оказывается уже группы общей ковариантности пятимерного риманова пространства.

Таким образом, Эйнштейн (вместе с Громмером) правильно уловил основные слабости теории Калуцы. Тем не менее они испытали ее на существование центрально-симметричных всюду регулярных решений и пришли к выводу об их отсутствии, что в глазах Эйнштейна было одним из свидетельств лишь формального характера объединения. Неразложимость лагранжиана, которая представлялась Эйнштейну и Громмеру важным достоинством теории, оказалась мнимой. Пятимерная скалярная кривизна, как показал О. Клейн, представлялась суммой гравитационной и электромагнитной компонент:

$$P = R + \frac{1}{4} f_{ik} f^{ih}.$$

Тем не менее идея пятимерия определила один из главных путей реализации программы ЕГТП на многие годы. В развитии этого направления в дальнейшем было два весьма заметных всплеска — 1926—1927 гг. (О. Клейн, Г. А. Мандель, В. А. Фок, Г. А. Гамов и Д. Д. Иваненко, А. Эйнштейн, Л. де Бройль, В. К. Фредерикс, Т. де Дондер, П. Эренфест и Г. Уленбек и др.), 1931—1933 гг. (О. Веблен и Б. Гофман, О. Веблен, Я. А. Схоутен и Д. ван Дантциг, Д. ван Дантциг, В. Паули, А. Эйнштейн и В. Майер и т. д.). Первый был связан с попытками объединения в пятимерной схеме не только гравитации и электромагнетизма, но и квантовой механики. Второй, с одной стороны, с проективным обобщением теории Калуцы — Клейна, а с другой — с попыткой Эйнштейна и Майера сделать пятимерную схему физически более осмысленной. Несколько меньшие пики активности в области пятимерия были на рубеже 30-х и 40-х годов (А. Эйнштейн и П. Бергман, А. Эйнштейн, П. Бергман и В. Баргманн и др.), на рубеже 40-х и 50-х годов (П. Иордан, Г. Людвиг, П. Бергман, Ю. Тирри, Ю. Б. Румер, П. Икеда и др.). Один был вызван работами Эйнштейна (с сотрудниками), в которых делались попытки дать физическое или геометрическое оправдание условию цилиндричности и приравнению g_{55} (или γ_{55}) единице. Другой пик активности, гораздо более значительный, имел несколько тематических фокусов: 1) включение дираковской идеи

¹⁶ Дело в том, что П. Бергман в начале 40-х годов показал, что проективные переформулировки теории Калуцы, в сущности, эквивалентны первоначальному варианту этой теории. Заметим, правда, что теория Калуцы при этом рассматривается в форме, приданной ей в 1926 г. О. Клейном. В этой форме геометрическое объединение гравитации и электромагнетизма носит не приближенный, а точный характер [12].

переменности гравитационной постоянной в пятимерную концепцию (Иордан, Тири, Фирц и др.), 2) 5-оптика Румера, в которой пятой координате приписывался смысл действия, а также периодический характер изменения с периодом, равным постоянной Планка h ; 3) изучение различных математических и физических аспектов пятимерия (космология, спинорное исчисление, развитие проективного формализма, вариационные принципы).

Однако мы забежали далеко вперед, и нам следует вернуться к началу 20-х годов с тем, чтобы более детально рассмотреть вопрос о том, в какой мере сам Эйнштейн принимал участие в создании научно-исследовательской программы ЕГТП. Конечно, обсуждая его реакцию на появление единых теорий Гильберта, Вейля, Эддингтона и Калуцы, мы так или иначе затрагивали этот вопрос. В следующем разделе он будет рассмотрен более систематически.

ТЕОРИЯ ЭЙНШТЕЙНА 1919—1923 гг.

В главе 1 рассматривались ранние попытки Эйнштейна построить объединенное полевое описание электромагнитного поля, его квантовых свойств и электрона. Эйнштейн искал способ такого обобщения максвелловских уравнений, который позволил бы получить частицеподобные решения и связать с ними электрон и кванты света. В этих своих проектах он руководствовался ЭПП, при этом единое поле понималось как обобщенное классическое электромагнитное поле, а само это обобщение предполагалось осуществить путем своеобразного угадывания подходящей математической структуры полевых уравнений. Дополнительными важными ограничениями были также требования лоренц-ковариантности, принципы соответствия, простоты и некоторые другие. О включении в обобщенные уравнения поля еще и гравитации речь пока не шла. Хотя в поисках Эйнштейна была ведущей установка на математическое конструирование полевых уравнений (им были опробованы нелинейное обобщение и повышение порядка уравнений), для него по-прежнему основополагающее значение имели физические соображения и наглядные образы.

Построить единую теорию не удалось, и Эйнштейн переключил свои усилия на проблему гравитационного поля. Но приобретенный опыт не пропал даром. В работе над ОТО были использованы не только такие общие концепции и методы, как, например, концепция классического поля и метод математической гипотезы, но и мысль о нелинейном характере уравнений поля и идея получения уравнений движения из уравнений поля. Был накоплен некоторый опыт применения методологических принципов физики в условиях построения новой теории, прежде всего для отыскания основных уравнений теории.

Кстати говоря, этот эпизод свидетельствует о равном интересе Эйнштейна к идее полевого синтеза физики, о наличии в эйнштейн-

ковской тематической «связке» двух тем (в смысле Холтона) — темы непрерывности и темы единства.

В главах 2 и 3 при рассмотрении единых теорий Гильберта и Вейля немало места было уделено обсуждению отношения Эйнштейна к этим теориям. Отношение это, как мы видели, было весьма отрицательным. Речь идет главным образом о событиях 1915—1919 гг. В эти годы он добился выдающихся успехов в разработке как квантовой теории (статьи 1916 г.), так и особенно ОТО: завершение основ теории, предсказание гравитационных волн, решение проблемы сохранения энергии-импульса, создание основ релятивистской космологии и т. д. В этот период Эйнштейн не думает ни о включении электромагнитного поля в единую геометризованную схему, ни о получении частиц и квантов из полевых уравнений типа уравнений гравитационного поля. Более того, в одной из работ 1916 г. [184, с. 522] он подчеркивает необходимость в дальнейшем разработать квантовое обобщение ОТО, классический характер которой он понимал вполне отчетливо (см. гл. 2).

Успешная разработка фундаментальных физических аспектов ОТО и уязвимость единых полевых теорий Гильберта и Вейля могли служить для Эйнштейна весьма веским доказательством в пользу ограниченного, чисто гравитационного понимания ОТО и соответственно включения в геометрическую схему только гравитации. Обе упомянутые попытки синтеза гравитации и электромагнетизма на основе ОТО имели геттингенское происхождение и были связаны, таким образом, с геттингенской традицией математической физики, к которой Эйнштейн относился весьма скептически. Синтетическая же тенденция, которая была всегда присуща Эйнштейну, в этот период получила определенное воплощение в релятивистской космологии.

Все же после появления теории Вейля Эйнштейн слишком часто возвращался к мысли о ней. Особенно это заметно по его переписке с Бессо, Зоммерфельдом, Эренфестом, самим Вейлем, Борном. Он высоко оценивает книгу Вейля «Пространство. Время. Материя» [185]. В это же время (1918) в речи «Мотивы научного исследования», посвященной 60-летию юбилею Планка, высказывает две мысли, свидетельствующие, возможно, о наметившемся процессе переориентации по отношению к концепции единых теорий поля. Во-первых, он возражает против идеи равноценности альтернативных систем теоретической физики и подчеркивает единственность теории, отвечающей физической реальности: «История показала, что из всех мыслимых построений в данный момент только одно оказывается преобладающим... Теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории. В этом суть того, что Лейбниц удачно назвал „предустановленной гармонией“» [186, с. 40—41].

Во-вторых, в качестве «важнейшей физической проблемы нашего времени» он называет проблему объединения квантовой меха-

ники, электродинамики и механики в логически стройную систему¹⁷.

В одном из своих писем к Вейлю (от 16 декабря 1918 г.) Эйнштейн писал: «Все, с кем я беседовал, с большим уважением отзывались о Вашей теории с математической точки зрения, и я тоже восхищаюсь ею как созданием ума» [57, с. 139]. Все это можно рассматривать как определенные симптомы возрастающего интереса Эйнштейна к концепции единых теорий поля.

И действительно, 10 апреля 1919 г. Эйнштейн докладывает на заседании Прусской академии наук работу «Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи?» [93], которая положила начало новой серии эйнштейновских исследований по единым теориям поля. Правда, главной проблемой для Эйнштейна в этой работе является не геометрическая унификация гравитационного и электромагнитного полей, а доказательство возможности построения элементарных частиц материи на чисто полевой основе.

Кратко упомянув о том, как решалась эта проблема в предшествующих единых теориях Ми, Гильберта и Вейля, и поставив свою теорию в рамки соответствующей программы, Эйнштейн формулирует основную задачу — показать, что заряженные частицы сохраняют свою устойчивость только за счет сил тяготения: «...ниже будут указаны соображения, позволяющие думать, что элементарные электрические образования, представляющие собой кирпичи атомов, удерживаются вместе благодаря силам тяготения» [93, с. 664] («...die die Bausteine der Atome bildenden elektrischen Elementargebilden durch Gravitationskräfte zusammengehalten werden» [187, с. 349]). В упомянутых же единых теориях уравновешивающие силы внутри заряженных частиц считались также имеющими электрическое происхождение. Он замечает в отношении этих теорий, не вдаваясь в детали их критического обсуждения: «С одной стороны, удручает разнообразие возможностей, а с другой стороны, до сих пор не удалось представить указанные добавочные члены (объясняющие равновесие заряженных частиц.— В. В.) в таком простом виде, чтобы решение могло казаться разумным» [93, с. 664—665].

Эйнштейн полагал, что, как и в ОТО, максвелловский тензор энергии-импульса

$$T_{ik} = 1/4 g_{ik} \Phi_{\alpha\beta} \Phi^{\alpha\beta} - \Phi_{i\alpha} \Phi_{k\beta} g^{\alpha\beta} \quad (45)$$

должен быть пропорционален дифференциальному выражению 2-го порядка, построенному из g_{ik} . Но если в качестве такого выражения взять левую часть уравнений гравитационного поля ОТО

$$R_{ik} - 1/2 g_{ik} R = -\kappa T_{ik},$$

¹⁷ «Пусть любовь к науке продолжает украшать ему (Планку.— В. В.) жизнь и приведет его к разрешению им самим поставленной и значительно продвинутой важнейшей физической проблемы нашего времени. Пусть ему удастся объединить квантовую механику, электродинамику и механику в логически стройную систему» [186, с. 41].

то ничего нового не получится. Эти полевые уравнения согласованы с законом сохранения энергии-импульса для тензора энергии-импульса материи в присутствии гравитации

$$\frac{\partial (\sqrt{-g} T_i^\sigma)}{\partial x_\sigma} + \frac{1}{2} (\sqrt{-g} T_{\sigma\tau}) \frac{\partial g^{\sigma\tau}}{\partial x_i} = 0,$$

который при переходе к постоянным предельным значениям g_{ik} , характерным для СТО, совпадает с соответствующим выражением для закона сохранения энергии-импульса в пренебрежении гравитацией. Но, замечает Эйнштейн, «если бы гравитационные поля играли существенную роль в структуре материальных частиц, то для них переход к постоянным $g_{\mu\nu}$ потерял бы всякий смысл, ибо при постоянных $g_{\mu\nu}$ не было бы материальных частиц» [93, с. 665].

Таким образом, требование обращения в нуль ковариантной производной $T_{\mu\nu}$ утратило бы свой смысл и аргументы в пользу включения члена $(-1/2 g_{ik} R)$ в левую часть полевых уравнений также потеряли бы свою силу. В результате от стандартных уравнений гравитации пришлось бы отказаться. Требование же общей ковариантности предоставляет не слишком большой выбор для упомянутого дифференциального выражения 2-го порядка по g_{ik} . Оно должно иметь вид

$$R_{ik} + a R g_{ik}. \quad (46)$$

Поскольку же тензор энергии-импульса материи T_{ik} имеет нулевой след (ведь частицы, обладающие массой покоя, должны быть определенными конструкциями из гравитационного и электромагнитного полей), то и след выражения (46) должен быть равен нулю. Это сразу дает значение для a , равное $(-1/4)$, и уравнения гравитации в этом чисто полевом мире оказываются несколько отличными от соответствующих уравнений ОТО:

$$R_{ik} - 1/4 g_{ik} R = -\kappa T_{ik}. \quad (47)$$

Конечно, к этим уравнениям следует приплюсовать стандартные максвелловские уравнения

$$\frac{\partial (\sqrt{-g} \varphi_{\sigma\tau} g^{\sigma\alpha} g^{\tau\beta})}{\partial x_\beta} = \sqrt{-g} J^\alpha, \quad \frac{\partial \varphi_{\mu\nu}}{\partial x_\rho} + \frac{\partial \varphi_{\nu\rho}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial \varphi_{\rho\mu}}{\partial x_\nu} = 0. \quad (48)$$

Несложный подсчет показывает, что имеется как раз 12 независимых уравнений (47) и (48) для определения 16 переменных $g_{\mu\nu}$ и $\varphi_{\mu\nu}$, что согласуется с требованием общей ковариантности. Но если в рамках ОТО, как нетрудно показать, выполняется соотношение

$$\varphi_{\alpha\alpha} (\sqrt{-g} J^\alpha) = 0,$$

то в новой теории образование div от правой и левой частей уравнения (47) дает соотношение

$$\varphi_{\alpha\alpha} J^\alpha + \frac{1}{4\kappa} \frac{\partial R}{\partial x_\sigma} = 0, \quad (49)$$

которое можно истолковать как уравнивание электрических сил гравитационным давлением.

Если при этом положить $J^\sigma = \rho \frac{dx^\sigma}{ds}$ и умножить (49) на J^σ , то ввиду антисимметрии $\varphi_{\alpha\beta}$ получается, что

$$\frac{\partial R}{\partial x_\sigma} \frac{dx^\sigma}{ds} = 0, \quad (50)$$

откуда следует постоянство скалярной кривизны вдоль каждой мировой линии электрического заряда. В пространстве без зарядов скалярная кривизна ввиду соотношения (49) также остается постоянной:

$$R = \text{const} = R_0. \quad (51)$$

Уравнение (49) истолковывается следующим образом: «...скалярная кривизна R играет роль отрицательного давления, которое вне электрических корпускул имеет постоянное значение R_0 . Внутри каждой корпускулы существует отрицательное давление (положительное $R - R_0$), градиент которого уравнивает электродинамическую силу (dessen Gefälle der elektrodynamischen Kraft das Gleichgewicht leistet)» [187, с. 352]. Фактически выражение $\frac{1}{4\kappa} R$ является потенциальной энергией тяготения, силы которого противостоят электрическим силам отталкивания.

Сопоставив новые уравнения (47) с полевыми уравнениями, содержащими космологическую постоянную λ , — а эти уравнения, как считал Эйнштейн, должны были сохранить свое значение, так как они приводили к удовлетворительному космологическому решению, именно пространственно замкнутому миру, — он получил для космологической постоянной значение

$$\lambda = -\frac{R_0}{4}. \quad (52)$$

В этом результате, кстати говоря, Эйнштейн усматривал существенное достижение новой теории: «Новая формулировка имеет то большое преимущество перед прежней, что величина λ по отношению к основным уравнениям теории представляет собой постоянную интегрирования и более не является некоторой универсальной постоянной, связанной с фундаментальными законами» [93, с. 669].

Если мы хотим сохранить уравнения гравитации ОТО (с членом $-1/2 g_{ik} R$), то в качестве тензора энергии-импульса материи («тензора тяготеющей массы», «der gravitierenden Masse») следует взять тензор

$$T_{ik}^* = T_{ik} + \frac{1}{4\kappa} g_{ik} (R - R_0). \quad (53)$$

Затем Эйнштейн показывает, что замкнутый мир с постоянной плотностью массы покоя является решением уравнений (47), причем

энергия этого мира на три четверти состоит из энергии электромагнитного поля и на одну четверть — из энергии гравитационного поля.

Еще раз подчеркнув в заключение отмеченные выше преимущества своей теории (возможность построения заряженных частиц «исключительно из гравитационного и электромагнитного полей без введения гипотетических дополнительных членов в духе теории Ми» и освобождение «от необходимости введения особой постоянной λ для решения космологической проблемы») [93, с. 671], Эйнштейн сам тут же указывает на решающее затруднение теории, заводящее ее в тупик: «Но, с другой стороны, имеется своеобразная трудность. Если применить уравнение (1) (очевидно, здесь опечатка и имеется в виду уравнение (1a), т. е. (47) — В. В.) к случаю статического сферически симметричного поля, мы получаем одним уравнением меньше, чем нужно для определения $g_{\mu\nu}$ и $\Phi_{\mu\nu}$, вследствие чего оказывается, что всякое распределение электричества, совместимое со сферической симметрией, может оставаться в равновесии. Таким образом, в настоящий момент проблему построения элементарных частиц нельзя решить на основе указанных уравнений поля» [там же].

В вышедшей в сентябре 1921 г. энциклопедической статье по теории относительности Паули присоединился к этому выводу Эйнштейна: «Таким образом, и эта теория, несмотря на удовлетворительность ее основных положений, не в состоянии решить проблему материи» [93, с. 284]. Вспомним, что эйнштейновская идея связать космологическую постоянную со скалярной кривизной была затем использована во втором варианте теории Вейля и в теории Эддингтона.

Готовя эту работу к печати, Эйнштейн уже знал, что его новая теория ошибочна, но в модельном отношении она была очень показательна и весьма убедительно демонстрировала возможные глубокие связи ОТО с проблемой строения материи. Поэтому он и обнародовал ее. Кстати говоря, и Паули, спустя год-полтора высоко оценивал теорию Эйнштейна, уделив ей в своей «Теории относительности» целый параграф (§ 66) и отметив «удовлетворительность ее основных положений». И хотя в этой теории электромагнитное поле не подлежало геометризации, она по своей сути была близка единым геометризованным полевым теориям, но, парадоксальным образом ставя перед собой задачу-максимум, она как бы на время откладывала в сторону решение задачи-минимум. Впрочем, в 1919 г. Эйнштейн мог считать — и для этого были достаточно серьезные основания, — что геометризуемым является только гравитационное поле. Вместе с тем уверенность в могуществе и универсальности классической полевой концепции заставляла его искать уже тогда способы сведения частиц к полю.

Вторая попытка была предпринята Эйнштейном в марте 1921 г. в течение которого возникло несколько принципиально различных направлений в разработке единых геометризованных теорий поля. Это множественное рождение ЕГТП и позволяет говорить о возник-

довении программы ЕГТП именно в 1921 г. Эйнштейн теорией 1919 г. уже положил начало своим исследованиям по проблеме ЕГТП. В последующие два года он не прекращает размышлять над этой проблемой, причем мысль о геометрическом объединении гравитации и электромагнетизма ему не кажется уже неприемлемой, хотя вейлевская реализация этой идеи ему по-прежнему представляется ошибочной.

В апреле же 1919 г. Калуца вступает с Эйнштейном в переписку по поводу своей пятимерной единой теории поля, и последний одобряет и поддерживает кенигсбергского математика (см. начало предыдущего раздела). Вполне возможно, что именно исследования Калуцы уже тогда оказали существенное воздействие на изменение позиции Эйнштейна в отношении возможности геометрического синтеза гравитации и электромагнетизма.

Измерения отклонения света на краю солнечного диска, проведенные под руководством Эддингтона двумя английскими экспедициями во время солнечного затмения 29 мая 1919 г., подтвердили предсказание ОТО, и это было воспринято как триумф новой теории тяготения. Эйнштейну это стало известно 22 сентября из телеграммы, посланной ему Лоренцем. Это событие не только принесло ОТО и ее автору всемирную известность¹⁸, но и решающим образом укрепило позиции ОТО в ее борьбе с конкурирующими теориями тяготения (прежде всего со скалярной лоренц-ковариантной теорией Нордстрема), а также авторитет геометрической трактовки физических полей.

Как мы уже упоминали, в 1919 г. появляются две работы Паули по теории Вейля. О них неоднократно говорится в переписке Эйнштейна в конце 1919 — в начале 1920 г. либо с надеждой на то, что они помогут опровергнуть теорию Вейля (например, в письме Зоммерфельда к Эйнштейну от 24 октября 1919 г. [68, с. 207]), либо с уверенностью в ошибочности теории Вейля, связанной с показанным Паули отсутствием в ней статических решений при исчезающих электромагнитных потенциалах (например, в письме Эйнштейна к Эрнесту от 4 декабря 1919 г. [57, с. 138] или в письме Эйнштейна к Бессо от 12 декабря 1919 г. [56, с. 93]).

Но теперь уже критика Эйнштейном теории Вейля не означала отрицательного отношения к концепции геометрического объеди-

¹⁸ К. Зелиг, например, писал: «Подтверждение результатов отвлекенной умственной работы реальным процессом, происходящим во Вселенной, привело к тому, что в 1919 году имя Эйнштейна... очень быстро облетело все страны. На него накинута целая армия охотников за автографами, издателей, репортеров и поклонников знаменитостей». Зелиг приводит далее весьма выразительный отрывок из письма Эйнштейна к своему бывшему сотруднику Хоффу от 2 февраля 1920 г.: «Лишь только хлынул поток газетных статей, как страшное наводнение запросов, приглашений, вызовов затопило меня так, что мне спится, будто я жарюсь в аду, а почтальон — это сам сатана; он рычит на меня, не переставая, и швыряет мне в голову очередную кипу писем, между тем как я еще не успел ответить па старше. К тому же у меня в доме смертельно больная мать, и мне еще приходится присутствовать на бесчисленных заседаниях по поводу „великих дней“» [57, с. 133].

нения гравитационного и электромагнитного полей и полевого решения на этой основе проблемы частиц и квантов. Соответствующая переориентация Эйнштейна произошла, по-видимому, не позже весны 1919 г. А 2 февраля 1920 г. он писал в Голландию (Зелиг, цитирующий отрывок из этого письма, не указывает, кому именно было адресовано оно): «Несмотря на все старания и на достигнутое при помощи дифференциальных уравнений соответствие, теория электромагнитного поля никак не получается (скорее всего, речь может идти о включении электромагнитного поля в одну геометрическую структуру вместе с гравитацией. — В. В.). Но я твердо верю, что этот путь станет путем подлинного прогресса» [57, с. 129]. Это не означало, впрочем, что Эйнштейн отказался в это время от попыток решить задачу-максимум (получить частицы и кванты на основе полевой теории) и переключил свои усилия на решение более ограниченной задачи-минимум (т. е. задачи геометрического объединения гравитации и электромагнетизма). В письме к Борну от 3 марта 1920 г. он писал: «Все свободное время я размышляю о квантовой проблеме с релятивистских позиций. Я не верю, что теории придется отказаться от континуальных представлений. Но мне никак не удается придать осязаемые формы моей навязчивой идее понять квантовую структуру с помощью дифференциальных уравнений» [89, с. 16]. Примерно об этом же он сообщал Эренфесту 7 апреля 1920 г.: «В общей теории относительности я не добился никакого прогресса. Там по-прежнему остается ни с чем не связанное электрическое поле... И в проблеме электронов я тоже ничего не открыл» [57, с. 130].

5 мая 1920 г. Эйнштейн выступил в Лейденском университете с докладом «Эфир и теория относительности». Именно здесь он впервые оценил как весьма важную проблему объединения гравитации и электромагнетизма в рамках некоторой единой теории поля: «...большим шагом вперед было бы объединение в одну общую картину гравитационного и электромагнитного полей. Тогда была бы достойно завершена эпоха теоретической физики, начатая Фарадеем и Максвеллом; сгладилась бы противоположность между эфиром (из предыдущего ясно, что под «эфиром» Эйнштейн понимает искривленное пространство-время. — В. В.) и материей, и вся физика стала бы замкнутой теорией, подобной общей теории относительности, охватывающей геометрию, кинематику и теорию тяготения» [166, с. 689]. Эйнштейн далее указывает на теорию Вейля как на конкретный пример объединения такого рода, но тут же отвергает ее, считая ее не выдерживающей сравнения с опытом. Таким образом, уже в начале 1920 г. перед Эйнштейном ясно вырисовывался идеал замкнутой единой полевой теории, «подобной общей теории относительности». Правда, он делает тут же несколько отрезвляющую оговорку: «Размышляя о ближайшем будущем теоретической физики, мы, безусловно, не можем отрицать возможности встретиться с непреодолимыми границами для теории поля, которые могут поставить факты, охватываемые квантовой теорией». Возможно, эта оговорка — результат первого неудачного штурма проблемы «по-

нять квантовую структуру с помощью дифференциальных уравнений», хотя, как он примерно в это же время писал одному из своих голландских коллег, он продолжал твердо верить, «что этот путь (т. е. путь, связанный с реализацией программы ЕГТП.— В. В.) станет путем подлинного прогресса».

В переписке Эйнштейна и Бессо, относящейся ко второй половине 1920 г., теория Вейля все еще в центре внимания. Эйнштейн не изменил своего отношения к ней, более того, он находит все новые аргументы против нее, хотя и замечает, что «Вейль остается всегда глубоким, ясным умом, и читать им написанное всегда удовольствие...» (из письма от 26 июля 1920 г.) [56, с. 93].

Во второй половине 1920 г. своеобразного максимума достигает антиэйнштейновская кампания, неприглядную роль в которой стал играть нобелевский лауреат Ф. Ленард [188, с. 156—163]. В конце сентября в Бад-Наугейме на 86-м собрании немецких естествоиспытателей он возглавил антирелятивистов, допускавших весьма резкие выпады против Эйнштейна и теории относительности. На этом же собрании с изложением своей теории выступил Вейль [144].

Эйнштейн еще раз четко сформулировал свои доводы против его теории. Паули отметил неудачи полевых теорий, в том числе и эйнштейновской теории 1919 г., в их попытках решить проблему материи ρ , указав на отсутствие операционально-измерительного определения понятия напряженности поля внутри электрона, подчеркнул тем самым ограниченность «теорий непрерывного типа». Ответ Эйнштейна на вопрос Паули о том, следует ли при решении проблемы материи придерживаться теорий континуального типа, или же надо искать это решение на пути модификации классической полевой и пространственно-временной концепции «в смысле атомизма», не был достаточно определенным, хотя, казалось, он должен был выбрать первую альтернативу.

Более четкий ответ Эйнштейна на вопрос Паули был дан в его докладе «Геометрия и опыт», прочитанном на торжественном заседании Прусской академии наук в Берлине 27 января 1921 г. [189]. Подчеркнув, что представления о римановой структуре пространства-времени имеют глубокие экспериментальные основания (в отличие от геометрии Вейля), он замечает: «Предложенная здесь физическая интерпретация геометрии не может быть непосредственно применена к областям пространства субмолекулярных размеров. Тем не менее даже в вопросах строения элементарных частиц она сохраняет некоторый смысл. В самом деле, в том случае, когда мы описываем электрические элементарные частицы, составляющие материю, можно сделать попытку сохранить физический смысл за теми аспектами поля, которые использовались в физике для описания геометрического поведения тел, больших по сравнению с молекулами. Только успех может служить оправданием такой попытки приписать физическую реальность основным понятиям римановой геометрии вне области их физического определения. Однако может оказаться, что подобная экстраполяция имеет не больше оснований,

чем распространение понятия температуры на части тела молекулярных размеров» [189, с. 88]¹⁹.

В январе 1921 г. речь шла только о попытке использования классических, макроскопических концепций поля и пространства-времени для изучения структуры микрочастиц, уже обнаруживших в своем поведении и строении явно неклассические особенности. Тогда Эйнштейн сам подчеркивал, что «только успех может служить оправданием такой попытки». В период рождения программы ее «родители» и приверженцы испытывают сомнения в ее обоснованности и перспективности; они проявляют осторожность в прогнозах и готовность в случае неудачи отказаться от нее.

В «Кратком очерке развития теории относительности», опубликованном в начале 1921 г. в «Nature», Эйнштейн формулирует четыре основные проблемы ОТО, «которые ждут решения в настоящее время» [191, с. 104]. Две из них относятся к космологии, а две оставшиеся — как раз к единой теории поля (проблема формального объединения гравитации и электромагнетизма и вопрос о роли гравитации в строении элементарных частиц материи). Таким образом, несмотря на критическое отношение Эйнштейна к конкретным вариантам единой теории поля Гильберта и Вейля, он на рубеже второго десятилетия сам провозглашает в качестве основных проблем ОТО создание единой геометризованной теории поля, способной решить и вопрос о строении материи (экспансия ОТО вглубь), а с другой стороны, разработку космологии (экспансия ОТО вширь). Последнее направление даже к 1921 г. достигло значительно больших успехов по сравнению с первым. Общерелятивистская космологическая программа бурно прогрессировала в 20—30-х годах (особенно в связи с работами В. де Ситтера, А. А. Фридмана, Ж. Леметра, А. Эддингтона, Р. Толмена, Э. Хаббла и самого Эйнштейна). Программа же ЕГТП в этот период так и не привела, как мы увидим, к реальным достижениям.

Все-таки Эйнштейна до 1921 г. проблема объединения гравитации и электромагнетизма интересовала меньше, чем вопрос о полевой структуре частиц материи, который был основным предметом

¹⁹ "Die hier vertretene physikalische Interpretation der Geometrie versagt zwar bei ihrer unmittelbaren Anwendung auf Räume von submolekularer Grösseordnung. Einen Teil ihrer Bedeutung behält sie indessen auch noch die Fragen der Konstruktion der Elementarteilchen gegenüber. Denn man kann versuchen, denjenigen Feldbegriffen, welche man zur Beschreibung des geometrischen Verhalten von gegen das Molekül grossen Körpern physikalisch definiert hat, auch dann physikalische Bedeutung zuzuschreiben, wenn er sich um die Beschreibung elektrischen Elementarteilchen handelt, die die Materie konstruieren. Nur der Erfolg kann über die Berechtigung eines solchen Versuches entscheiden, der den Grundbegriffen der Riemannschen Geometrie über ihren physikalischen Definitionsbereich hinaus physikalische Realität zuspricht. Möglicherweise könnte es sich zeigen, dass diese Extrapolation ebensowenig angezeigt ist wie diejenige der Temperaturbegriffs auf Teile eines Körpers von molekularer Grösseordnung" [190, с. 6]. Мы приводим это высказывание в оригинале ввиду его крайней важности для понимания процесса формирования установок программы ЕГТП у самого Эйнштейна.

обсуждения в его теории 1919 г. Во всяком случае, до 1921 г. он не предпринимал попыток разработать собственный вариант геометрического синтеза гравитации и электромагнетизма и не присоединялся ни к одному из известных, прежде всего к вейлевскому. Но переписка Эйнштейна показывает, что он постоянно размышлял над теорией Вейля и по-прежнему восхищался ее математической стройностью. Но эта теория, как вы видели, была неприемлема для него по физическим соображениям. И вот в марте 1921 г. Эйнштейн попытался так обобщить геометрию Вейля, чтобы, сохранив все достоинства математической схемы, устранить из теории недостатки, связанные с физическим истолкованием оснований теории.

Об этой своей попытке он сообщал Зоммерфельду 9 марта: «Я нашел своего рода добавление к основам общей теории относительности, родственное вейлевскому, но отличающееся от него тем, что φ_ν выступают только как электрические напряженности $\left(\frac{\partial \varphi_\mu}{\partial x_\nu} - \right.$

$\left. - \frac{\partial \varphi_\nu}{\partial x_\mu} \right)$; но пригодно ли оно физически — сомнительно. Господь бог делает все, как он того хочет, и не допускает, чтобы ему что-то предписывали» [68, с. 219]. В ответном письме Зоммерфельд писал: «Что Вы ассимилируете Вейля (а значит, и Ми) в измененном виде — это хорошо» [68, с. 220].

Эта работа Эйнштейна датирована 17 марта 1921 г. Сначала он излагает исходные идеи теории Вейля, заслуживающей «большого внимания хотя бы в силу смелости и логичности его математической мысли» («die (Theorie.— B. B.) schon ihres folgerichtigen und kühnen mathematischen Aufbaues wegen ein hohes Interesse verdient») [192, с. 104; 193, с. 261]. В сущности, речь идет о двух соображениях, на которых основана эта теория. Во-первых, имеется в виду замена интервала ds^2 , как основной характеристики пространственно-временного континуума, уравнением локального светового конуса $ds^2 = 0$. Физическое оправдание этой замены могло бы заключаться в том, что метрические соотношения следует формировать на основе оперирования со световыми сигналами, подчиняющимися уравнениям электромагнитного поля, в которые входят только отношения $g_{\mu\nu}$.

Вторым исходным положением теории Вейля является предположение о зависимости длины переносимого масштаба от интеграла $\int \varphi_\mu dx_\mu$, взятого по пути этого переноса, где вектор φ_μ , подобно $g_{\mu\nu}$, вносит определенный вклад в метрику (и связность) и отождествляется с электромагнитным потенциалом.

На основе этих двух соображений разворачивается вся теория Вейля. «Отдавая должное стройности и изящности построений Вейля, — резюмирует Эйнштейн в вводную часть своей заметки, — я все же думаю, что они не соответствуют физической реальности. Мы не знаем о природе таких используемых для измерений предметов, относительная протяженность которых зависела бы от их предыстории. Я не вижу также непосредственного физического смысла ни во введенной Вейлем кратчайшей линии, появляющейся в этом и

других уравнениях теории, ни в электрических потенциалах» [192, с. 105]²⁰.

Перечисленные трудности теории Вейля, по мнению Эйнштейна, связаны главным образом, со вторым положением. Риманова геометрия, замечает Эйнштейн, основывается на двух предпосылках: 1) существование переносимых масштабов; 2) независимость их от пути переноса. В теории Вейля отвергается лишь вторая предпосылка. Отказавшись еще и от первой предпосылки, мы пришли бы к теории более общей, чем теория Вейля. Фундаментальным положением этой обобщенной теории было бы уравнение локального светового конуса, определяющее группу ее ковариантности.

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu = 0. \quad (54)$$

Ни понятия расстояния, ни понятия масштабов и часов не использовались бы в такой теории. Не вполне ясна геометрическая структура соответствующего пространства; по-видимому, речь при выполнении условия (54) может идти об искривленном пространстве с конформной геометрией. Эйнштейн думал — и об этом советовался с венским математиком Виртингером — о таком обобщении уравнения геодезической, в котором существенную роль играли бы только отношения компонент $g_{\mu\nu}$. В результате он пришел к выводу о возможности соответствующего обобщения:

$$\delta \int d\sigma = 0, \quad (55)$$

где в качестве $d\sigma$ следует взять величину

$$d\sigma = J g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu, \quad (56)$$

причем J — это инвариант веса -1 , образованный из тензора Вейля

$$J = \sqrt{H}, \quad (57)$$

$$H = H_{iklm} H^{iklm}, \quad (58)$$

а тензор Вейля выражается через тензор Римана

$$H_{iklm} = R_{iklm} - \frac{1}{d-2} (g_{il} R_{km} + g_{km} R_{il} - g_{im} R_{kl} - g_{kl} R_{im}) + \frac{1}{(d-1)(d-2)} (g_{il} g_{km} - g_{im} g_{kl}) R. \quad (59)$$

²⁰ Здесь еще раз Эйнштейн суммирует свои критические замечания по теории Вейля. Ввиду некоторых неточностей перевода мы дадим этот отрывок в своем переводе: «При всем своем восхищении единством (Einheitlichkeit) и красотой (Schönheit) создания вейлевской мысли, я думаю, что оно не способно устоять при сопоставлении с физической реальностью. Мы не знаем в природе таких объектов, используемых для измерения, относительно растяжение которых (Ausdehnung) зависело бы от их предыстории. Я не вижу также непосредственного физического смысла как во введенной Вейлем кратчайшей линии, так и в электрических потенциалах, входящих явно в уравнение этой линии и в другие уравнения теории Вейля» [193, с. 262].

Здесь R — скалярная кривизна, d — размерность пространства. Эйнштейн в геометрии такого рода думал, отказавшись от понятия метрической связности, но используя понятие кривизны, объединить гравитацию и электромагнетизм так, чтобы избежать введения переносимых масштабов и явного оперирования с электромагнитными потенциалами. Вероятно, последовательное развитие этой геометрической схемы должно было бы привести к геометрии конформной связности, разработанной в 1923 г. Э. Картаном [194]. Но с самого начала перед ней стояли существенные физические и математические трудности, связанные с истолкованием электромагнитного поля как геометрического феномена, с построением функционала действия и т. д. В конце статьи Эйнштейн писал, вполне понимая модельный, эскизный характер предложенной им схемы: «Мы задались целью изложить здесь только логическую возможность, заслуживающую опубликования, независимо от того, будет ли она использована в физике или нет» [192, с. 101]. Аналогичную схему примерно в это же время пробовал развить немецкий математик Р. Бах [195]. В пятом издании своей книги «Пространство. Время. Материя» Вейль оценил эти попытки как бесперспективные, так как теоретико-инвариантные соображения в этой схеме не позволяют получить разумное выражение для функционала действия [64, с. 324].

Таким образом, Эйнштейн сам встал на путь активной разработки единых геометризованных теорий поля. Фактически уже теория 1919 г. вполне была в духе теорий такого рода. Но в ней не ставилась задача геометризации электромагнетизма и, в сущности, не привлекалась новая геометрия, более общая, чем риманова. В конформной же теории 1921 г. выдвигалась даже более общая геометрическая схема, чем в теории Вейля. Впрочем, характер геометризации электромагнитного поля оставался неясным. В дальнейшем это направление не получило развития.

С 1920 г. Эйнштейн начал серию своих зарубежных поездок, в которых он выступал с докладами и лекциями по теории относительности. В 1920 г. он был в Лейдене и Копенгагене (всего около пяти недель). В 1921 же году весь февраль он провел в Вене, Праге и Амстердаме, а затем с апреля по июнь был в США и Англии, а в октябре побывал еще и в Италии. В 1922 г. за границей он провел почти полгода, побывав во Франции, проведя лето в Голландии, а с ноября по март 1923 г. — в Японии, Палестине, Испании. Эти поездки не только способствовали популяризации теории относительности во всем мире, но имели более широкое, даже политическое, значение, помогая восстановлению прерванных войной научных связей и повышению престижа немецкой науки.

В Принстоне в мае 1921 г. Эйнштейн прочел четыре знаменитые лекции, выпущенные вскоре отдельной книгой под названием «Сущность теории относительности» и содержащие мастерское изложение основ специальной и общей теории относительности [196]. Принстонские лекции содержали костяк, фундамент теории относительности и не касались фактически единых теорий поля. Только одно

замечание свидетельствует об изменении эйнштейновской позиции по отношению к проблеме ЕГТП. Обсуждая вопрос об уравнениях электродинамики в рамках ОТО, он подчеркивает, что стандартный учет электромагнитного поля в уравнениях гравитации посредством использования соответствующего тензора энергии-импульса «многие теоретики считали необоснованным и неудовлетворительным». «Кроме того,— продолжает Эйнштейн,— таким путем нельзя объяснить равновесие электрических зарядов, из которых построены элементарные заряженные частицы. Более предпочтительной была бы теория, в которой гравитационное и электромагнитное поля не выступали бы как логически разобщенные понятия» [196, с. 74]. Упомянув затем о результатах Вейля и Калуцы (хотя работа Калуцы была опубликована только в декабре 1921 г.), Эйнштейн заметил, что он «уверен что они (эти результаты.— В. В.) не приближают нас к действительному решению основной проблемы». О своей конформной теории он даже не упомянул.

Осенью (именно 19 сентября) выходит из печати очередной том «Энциклопедии математических наук» со статьей Паули по теории относительности [63], содержащей детальный обзор и критический анализ теорий Ми, Вейля и эйнштейновской теории 1919 г. В это же время Эйнштейна начинает увлекать идея эксперимента, способного однозначно решить вопрос о том, имеет ли свет волновую или корпускулярную природу. 8 декабря вместе с работой Калуцы он представил свою работу, в которой предложил такой опыт с излучением света от каналовых лучей, и сообщил, что он вместе с Гейгером приступил к его подготовке. 30 декабря Эйнштейн сообщал Борну об удачном завершении эксперимента и решении вопроса в пользу квантов: «Вот теперь благодаря превосходному сотрудничеству Гейгера и Боте закончен эксперимент по излучению. Результат таков: свет, испускаемый движущимися частичками каналовых лучей, строго монохроматичен, в то время как по волновой теории длина волны должна была бы быть различной и в различных направлениях.

Тем самым надежно доказано, что волнового поля на самом деле не существует и боровская эмиссия является мгновенным процессом в собственном смысле этого слова. Это мое самое сильное научное потрясение за многие годы» [89, с. 33].

Этот эксперимент находился в самой непосредственной связи с исследованиями по единой теории поля. Успехи квантовой теории и неудачи Гильберта, Вейля, Эддингтона, самого Эйнштейна на пути объединения гравитации и электромагнетизма (в его классической, максвелловской форме) могли означать, что электромагнитное поле в действительности имеет квантовую структуру и упомянутое объединение должно с самого начала учитывать это. Опыт с каналовыми лучами подтверждал эту точку зрения. В результате должно было пошатнуться представление о первичности классической, концептуальной структуры электромагнитного поля, бывшее основополагающим во всех попытках геометрического синтеза гравитации и электромагнетизма. Поэтому-то Эйнштейн и писал о том, что результат

опыта был для него «самым сильным научным потрясением за многие годы».

Но не прошло и месяца, как Эйнштейн, в значительной мере под давлением критики со стороны Лауэ и Эренфеста, понял ошибочность своего вывода. Более подробно поучительная история этого заблуждения рассмотрена в статье М. Клейна [152]. Уже 28 января 1922 г. Эйнштейн писал Зоммерфельду: «...должен Вам сообщить, что опыт, на который я возлагал столько надежды, ничего не доказывает. Более строгое рассмотрение показало, что волновая теория ведет к тем же следствиям, что и квантовая...» [68, с. 231]. В статье, представленной на заседании Берлинской академии наук 2 февраля 1922 г., Эйнштейн признал ошибочность своего первоначального замысла [197]²¹.

Рассматривая теорию Калуцы, мы уже писали о совместной работе Эйнштейна и Громмера, поступившей в редакцию иерусалимского журнала 10 января 1922 г. и посвященной доказательству несуществования всюду регулярного центрально-симметричного решения в этой теории. Эйнштейн теперь уже прочно встал на позиции стратегии ЕГТП. «Пожалуй, наиболее важным в настоящее время вопросом в общей теории относительности, — так начинается статья, — является вопрос о единой природе гравитационного и электромагнитного полей. Хотя единая природа этих двух видов поля априори ниоткуда не следует, преодоление этого дуализма являлось бы, несомненно, большим успехом теории» [183, с. 130]. Подвергнув далее критике первую попытку в этом направлении, именно теорию Вейля, авторы статьи высоко оценили новую пятимерную теорию Калуцы («которая устраняет все эти недостатки (т. е. недостатки теории Вейля.— В. В.) и отличается удивительной формальной про-

²¹ Очевидно, в феврале 1922 г. Эйнштейн писал Борну (письмо не датировано): «Недавно я сел в лужу (ein monumentale Bock geschossen) (эксперименты с излучением света каналовыми лучами). Но утешаю себя мыслью, что только мертвецы застрахованы от ошибок» [89, с. 38]. Комментарий Борна к этим словам Эйнштейна, написанный в 1965 г., представляется здесь весьма уместным: «Здесь Эйнштейн признает, что его соображения, приводимые к эксперименту с каналовыми лучами, были неверными: это был крупный япсус (ein kapitalen Bock). К этому я должен добавить, что сейчас (1965), когда я снова читал старые письма Эйнштейна, его рассуждения были вообще мне непонятны и сразу же казались неприемлемыми (вспомним, однако, что Борн и Франк в ответ на эйнштейновское письмо от 30 декабря 1921 г. писали, что они „крайне потрясены содержанием... (этого.— В. В.) письма“ и что они не могут „реконструировать установку для проведения эксперимента с каналовыми лучами“ [89, с. 34].— В. В.)... Это объясняется, естественно, очень просто: тем, что за прошедшие с тех пор более чем 40 лет очень многое стало понятным в вопросах распространения света. Это относится и к утверждению о том, что законы распространения света в прозрачных телах не имеют отношения к квантам и правильно описываются с помощью волновой теории... Вероятно, это уже тогда было понятно Лауэ, почему он и возражал против эйнштейновской идеи. Эйнштейн это понял и согласился с тем, что „дал маху“ [там же]. Заметим, что, вероятно, наиболее раннее упоминание об идее эксперимента с каналовыми лучами встречается в письме Эйнштейна к Зоммерфельду от 27 сентября 1921 г. [68, с. 226]. Через месяц примерно он писал об этом же М. Бессо [56, с. 102].

стотой») и кратко рассмотрели ее основы. Они отметили и «принципиально слабый пункт теории Калуцы», связанный с отсутствием непосредственного операционально-измерительного смысла ds^2 в пятимерном пространстве, а также «сомнительную асимметрию», связанную с выделением пятого измерения посредством «условия цилиндричности».

В свете недавнего результата относительно природы света Эйнштейн мог заключить, что все попытки объединения гравитации и электромагнитного поля (в его классическом представлении) едва ли способны привести к успеху. Одним же из главных критериев перспективности (или плодотворности) единой теории поля был для Эйнштейна, как мы знаем, утвердительный ответ на вопрос о существовании в теории центрально-симметричного всюду регулярного решения, которое можно было бы истолковать как электрон (или, более общо, как заряженную элементарную частицу). Отсутствие таких решений было одной из главных причин, по которым Эйнштейн отвергал и теорию Вейля, и свою собственную теорию 1919 г. Расчет, проведенный Эйнштейном (совместно с Громмером), показал, что «в теории Калуцы нет центрально-симметричного решения, зависящего только от $g_{\mu\nu}$, которое можно было бы отождествить с (песингулярным) электроном» [183, с. 133].

Авторы исходят из вариационной формулировки теории с лагранжианом

$$H = g^{\mu\nu} \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta}, \quad (60)$$

полевые уравнения которой в первом приближении принимают вид

$$\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\sigma}}{\partial x_{\sigma}} = 0. \quad (61)$$

Далее формулируются условия центральной симметрии статического решения (обращение в нуль $g_{14}, g_{24}, g_{34}, g_{15}, g_{25}, g_{35}$, представимость чисто пространственных $g_{\mu\nu}$ в виде $g_{\alpha\beta} = \lambda \delta_{\alpha\beta} + \mu x_{\alpha} x_{\beta}$, где λ и μ — функции только $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$; g_{44}, g_{45}, g_{55} также являются функциями лишь r).

Варьируя действие с лагранжианом (60), вычисленное при этих условиях, по переменным g_{44}, g_{45}, g_{55} , он получает соотношения

$$g_{44}/g_{45} = \text{const}, \quad g_{55}/g_{45} = \text{const}. \quad (62)$$

Заметив, что на бесконечности пространственно-временное многообразие должно быть плоским и электростатический потенциал должен обратиться там в нуль, авторы указывают на обращение в нуль и отпошений (62). А это и доказывает несуществование пространственно неоднородного электрического потенциала, а тем самым и соответствующего решения.

6 июня 1922 г. в письме к Вейлю Эйнштейн несколько пессимистически оценивал положение в области единых геометризованных теорий поля, отдавая, впрочем, предпочтение теории Калуцы: «Я не

верю в идею связи между электрическим полем и изменением длины отрезков (здесь имеется в виду теория Вейля.— В. В.). С высказыванием Эддингтона дела у меня обстоят так же, как с теорией Ми: это превосходная рама, но совершенно неизвестно, как ее заполнить. Проследили ли Вы за попытками Калуцы? По-моему, здесь скорее пахнет чем-то реальным, но электрона, свободного от особенностей, эта теория также не дает. В то же время мне кажется неправильным допускать существование особенностей. На мой взгляд, для того чтобы действительно двинуться вперед, следовало бы найти всеобщий выведенный у природы принцип» [57, с. 147].

Таким образом, Эйнштейн прошел на рубеже второго десятилетия путь от явно негативного отношения к концепции геометрического объединения гравитационного и электромагнитного полей (1915—1918) к признанию этой концепции в качестве основной стратегии развития фундаментальной физической теории (1919—1921).

Несмотря на то что он подвергал острой критике каждую из конкретных схем геометрического синтеза полей,— это касается теорий и Гильберта, и Вейля, и Эддингтона, и Калуцы — в целом грандиозная по своему замыслу идея все больше овладевала им. И время от времени он пытался и сам развивать то один, то другой вариант. Теория Эйнштейна 1919 г. до некоторой степени родственна теории Гильберта; эйнштейновская конформная теория 1921 г. является непосредственным развитием теории Вейля; совместная работа с Громмером посвящена теории Калуцы, а с начала 1923 г., как мы увидим, Эйнштейн пытается модифицировать теорию Эддингтона.

Одним из главных критериев жизнеспособности различных вариантов ЕГТП Эйнштейн считал существование в теории статических сферически-симметричных всюду регулярных решений, которые можно было бы интерпретировать как заряженные частицы (прежде всего как электрон). Тем самым он с самого начала поиски единого геометрического описания полей связывал с задачей-максимум всякой единой полевой теории — с объяснением на ее основе существования частиц. В теории 1919 г. на первый план выдвигалась именно эта задача-максимум, в то время как вопрос о геометрическом объединении гравитации и электромагнетизма даже не ставился.

На исследования Эйнштейна по ЕГТП и на его позицию по отношению к ним, как мы пытались показать, могла влиять редкая в то время уверенность в реальном существовании квантов света, которую он надеялся подкрепить в 1921—1922 гг. непосредственным экспериментом. Замысел этого эксперимента, который должен был исключить возможность волнового истолкования структуры излучения, оказался ошибочным. Идея корпускулярно-волнового дуализма света, одним из главных авторов который был, конечно, Эйнштейн, им же самим неоднократно подвергалась сомнению; причем в 1921 г. континуалист Эйнштейн как будто отдал предпочтение чисто корпускулярной точке зрения.

ВЫВОДЫ

Если рассматривать исследовательскую программу как своеобразную матрицу, порождающую теории определенного типа, то основным признаком возникновения такой программы является начало множественного рождения указанных теорий. Именно такая ситуация создавалась в 1921 г. в отношении единых геометризованных теорий поля. Хотя в центре внимания продолжала оставаться теория Вейля, претерпевшая к этому времени, впрочем, существенные изменения (по сравнению с первоначальным вариантом 1918 г.), в течение одного года возникло еще несколько принципиально различных единых теорий (или проектов таких теорий) — аффинная теория Эддингтона, пятимерная теория Калуцы, проект конформной теории Эйнштейна, которые объединяла общность замысла и математического аппарата. Эта общность заключалась в поиске такого обобщения римановой структуры пространства-времени, лежащей в основе ОТО, которое позволило бы не только гравитационное, но и электромагнитное поле интерпретировать как проявление геометрии пространственно-временного континуума. Характерные черты этого геометрического подхода, с теми или иными особенностями проявившиеся в рассмотренных теориях, были названы во введении к этой главе. Это — геометризация физических взаимодействий, непрерывность основных структур (классическое поле, отождествляемое с пространственно-временным континуумом), классическая причинность, преобладание структурно-математического и аксиоматико-дедуктивных аспектов.

Впоследствии и сам Эйнштейн, и другие физики, занимавшиеся едиными геометризованными теориями поля (В. Паули, П. Бергман, Ю. Б. Румер и др.), подчеркивали, что, в сущности, имеются два основных направления в построении этих теорий: 1) выход за рамки римановой геометрии (главным образом за счет того или иного обобщения понятия связности — в теориях Вейля, Эддингтона, конформной теории Эйнштейна) и 2) увеличение числа измерений четырехмерного риманова пространства-времени (пятимерная теория Калуцы)²². Оба этих направления возникли приблизительно в 1921 г.

²² Например, Эйнштейн в 1938 г. писал (в совместной работе с П. Бергманом): «До сих пор были сделаны две довольно простые и естественные попытки связать гравитацию и электричество с помощью единой теории поля: одна — Вейлем, другая — Калуцой» [198, с. 492]. П. Бергман в одной из первых книг (1942 г.), в которых единым теориям было уделено особое внимание, также рассмотрел теорию Вейля, теорию Калуцы и обобщения последней [12]. В. Паули, переиздавая в 1956 г. свою энциклопедическую статью на английском языке, ввел дополнение, посвященное единым теориям, появившимся после 1920 г. Он разделил все единые теории на две большие группы: а) теория с несимметричным g_{ik} и Γ^i_{jk} (примером которых является теория Эддингтона) и б) пятимерные и проективные теории (начало которым было положено теорией Калуцы) [2, с. 427].

Ю. Б. Румер, автор статьи о единых теориях поля в «Физическом энциклопедическом словаре» (1962), также выделил два класса таких теорий: римановы четырехмерные (образец — теория Вейля) и пятимерное направление (образец — теория Калуцы) [199, с. 5—6].

Рассмотренные единые теории сталкивались с трудностями одного рода, будь то теории Вейля, Эддингтона или Калуды: отсутствие достаточных физических оснований для геометризации электромагнитного поля и в отличие от ОТО разрыв в физических и геометрических основаниях теории, неоднозначность выбора лагранжиана теории, отсутствие статических сферически-симметричных всюду регулярных решений, отсутствие новых эффектов, доступных измерению, и т. д. Но триумф ОТО, грандиозность и математическая глубина единых теорий, их утонченный теоретизм, противостоящий эмпиризму и эклектике квантовых схем начала 20-х годов, привлекали многих физиков и математиков к программе ЕГТП, порождая немалые надежды на то, что решение проблемы на этом пути вполне достижимо и вовсе не за горами. Громкие имена пионеров программы ЕГТП (Эйнштейн, Гильберт, Вейль, Эддингтон, Паули и др.) служили залогом глубины, серьезности и перспективности этого направления.

Конечно, в своей наиболее последовательно развитой форме программа ЕГТП, как было подчеркнуто во введении к этой главе, противостояла квантово-теоретической программе. Но в 1921 г. это противостояние не было вполне отчетливым. Некоторые из авторитетных приверженцев единых теорий считали неизбежным существование дуализма поле — вещество и даже не ставили перед этими теориями задачу-максимум программы, связанную с полевым истолкованием частиц, а также не стремились вывести квантовые закономерности на чисто полевой геометрической основе (Вейль, Эддингтон и др.).

Еще до того, как программа ЕГТП вполне сформировалась, некоторые приверженцы теории Вейля, внесшие в ее разработку существенный вклад, усмотрев в ней принципиальные затруднения физического характера, переключили свои усилия в область квантовой теории (Паули). Другие сторонники, а порой и основоположники этого направления, например Вейль, после 1921 г. постепенно утрачивали интерес к программе ЕГТП. Это было связано как с отсутствием ее реального физического прогресса, так и со значительными математическими трудностями на пути ее развития. Однако Эйнштейном эта программа овладевала все больше и больше. И даже после возникновения квантовой механики, открывшей эпоху нового теоретизма, когда интересы подавляющего большинства теоретиков переместились в сферу квантово-теоретической программы, Эйнштейн продолжал с еще большей энергией разрабатывать программу ЕГТП. Он испытывал все новые и новые схемы геометризации, возвращался к старым вариантам, модифицируя их. Иногда, отчасти благодаря своему авторитету, ему удавалось привлечь к работе над едиными теориями поля молодых исследователей, главным образом математиков (Я. Громмер, В. Майер, Н. Розен, Б. Гоффман, П. Бергман и др.). Иногда возникали кратковременные вспышки интереса к этим теориям и среди физиков, успешно работавших в области квантовой теории. Например, в 1926—1927 гг. появились определенные надежды на установление глубоких связей между пятимерием и квантовой

механикой (работы О. Клейна, Т. де Дондера, В. А. Фока, Л. де Бройля, Г. А. Гамова и Д. Д. Иваненко, П. Эренфеста и Г. Уленбека, Ф. Лондона и др.), а в начале 30-х годов проективная формулировка пятимерия привлекла внимание не только математиков (О. Веблена, Д. ван Дантцига, Я. А. Схоутена и др.), но и физиков (В. Паули).

Но только немногие, и прежде всего Эйнштейн, на протяжении многих лет не выходили за рамки программы ЕГТП. Поэтому особый интерес в истории единых теорий поля представляет изучение «мировой линии» именно Эйнштейна в рассматриваемый период. В этой главе мы выбрали один из наиболее важных периодов в истории ЕГТП (1921 год) и постарались охватить все основные теоретические схемы, выдвинутые в это время различными исследователями. В следующей главе, выбрав главную фигуру в рассматриваемой истории, именно Эйнштейна, мы попытаемся проследить, начиная с 1922—1923 гг. и кончая 1932—1933 гг., эволюцию единых теорий прежде всего по его работам. Таким образом, подходы, использованные в этих главах (только что завершенной и последующей), находятся примерно в таком же отношении, как представления Эйлера и Лагранжа в гидродинамике²³. Правда, и 1921 год — не рядовой момент в истории единых теорий поля, и Эйнштейн — отнюдь не рядовая фигура в этой истории. К тому же и 1921 год был взят с некоторой окрестностью (1919—1922), и эволюция эйнштейновских исследований будет рассматриваться на более широком фоне работ в этой области.

²³ Как известно, в эйлеровском представлении выделяется в пространстве определенная точка и рассматривается, что происходит в ней, когда через нее проходят различные частицы (элементарные объемы) жидкости, в частности изучается поведение скорости жидкости в этой точке. Лагранжево же представление заключается в том, что выделяется некоторая частица жидкости (элемент объема жидкости) и рассматривается траектория ее движения от начального ее положения до настоящего момента времени, в частности скорость этой частицы выражается как функция времени и координат начального ее положения. Первый метод иногда называют статистическим, так как для описания жидкости в целом нужно произвести усреднение по точкам пространства. Второй называют историческим, потому что в нем прослеживается «история» [200, с. 539].

Глава пятая

Путь Эйнштейна: десятилетие надежд и разочарований

ВВЕДЕНИЕ

Несколько обстоятельств оправдывают выделение «мировой линии» Эйнштейна в потоке исследований по единым теориям поля в период с 1923 г. до начала 30-х годов. Начиная именно с этого времени он становится вскоре признанным лидером всего направления, как бы приняв эстафету от Вейля, главного авторитета в рассматриваемой области в предшествующее пятилетие. Основные установки программы ЕГТП в работах Эйнштейна выражены наиболее отчетливо и последовательно, в частности он никогда не упускал из виду задачу-максимум, стоявшую перед ней: истолкование корпускулярных и квантовых аспектов структуры материи.

Эйнштейн внимательно следил и за работами других исследователей, подхватывая идеи, казавшиеся ему перспективными. Он разрабатывал почти все основные варианты геометрического объединения полей, временами возвращаясь к выдвинутым ранее схемам. Наиболее жизнеспособными в этом смысле оказались направления Вейля — Эддингтона и Калуцы, рассмотренные в предыдущей главе.

Как раз в 1922—1923 гг. в трудах Э. Картана, Я. Схоутена, О. Веблена и других, опиравшихся на работы Т. Леви-Чивиты и Г. Вейля, были разработаны основные принципы классификации обобщенных пространств, выходящих за рамки римановой геометрии. За исключением пятимерных римановых схем, подавляющее большинство геометрий, используемых для построения ЕГТП, оказались частными случаями геометрии четырехмерных пространств аффинной связности. Классификация пространств этого типа, данная в 1923 г. Э. Картаном, отличается простотой и наглядностью [194]. Но ни Эйнштейн, ни другие приверженцы программы ЕГТП, по крайней мере в 1920—1930-х годах, не пытались использовать различные геометрические схемы нутем их систематического перебора в соответствии с классификацией Картана, хотя к началу 30-х годов так или иначе были опробованы чуть ли не все возможные варианты четырехмерных неримановых пространств аффинной связности.

Опишем вкратце классификацию Картана, которая была использована также в единственном обстоятельном обзоре единых теорий поля — книге М. А. Тошела [22] (см. также [301]). Согласно Картану, произвольное пространство аффинной связности может быть описано двумя видами кривизны (кривизна вращения, или обычная риманова кривизна, и кривизна гомотетии, или сегментарная кривизна) и одним видом кручения. Картан рассматривает изменение

приращений произвольного вектора m и единичных векторов e_i при их параллельном переносе по замкнутому бесконечно малому контуру: $\oint dm$ и $\oint de_i$ ¹. В аффинном пространстве, в частности и в евклидовом, оба эти интеграла обращаются в нуль. В римановом пространстве, являющемся частным случаем пространства аффинной связности, первый интеграл также равен нулю, что приводит к симметричной аффинной связности. Но второй интеграл $\oint de_i$ оказывается отличным от нуля, что приводит к наличию в каждой точке ненулевой кривизны вращения. Наконец, в произвольном пространстве аффинной связности и интеграл $\oint dm$ отличен от нуля, что приводит к ненулевому кручению. Если приращение длины вектора в этом случае (имеется в виду случай произвольной метрической связности) $\oint dl$ отлично от нуля, то существует еще один вид кривизны — кривизна гомотетии. В случае риманова пространства $\oint dl = 0$ и кривизна гомотетии также равна нулю. Если $ds^{\mu\nu}$ — площадь замкнутого контура, то три упомянутые величины можно следующим образом выразить через тензор кривизны $R_{\mu\rho\sigma}^{\nu}$ и коэффициенты аффинной связности $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$:

$$\Omega_{\mu}^{\nu} \text{ (кривизна вращения)} = -R_{\mu\rho\sigma}^{\nu} ds^{\rho\sigma}, \quad (1)$$

$$\Omega^{\rho} \text{ (кручение)} = -(\Gamma_{\mu\nu}^{\rho} - \Gamma_{\nu\mu}^{\rho}) ds^{\mu\nu}, \quad (2)$$

$$\Omega \text{ (кривизна гомотетии)} = \Omega_{\mu}^{\mu} = -R_{\mu\rho\sigma}^{\mu} ds^{\rho\sigma}. \quad (3)$$

Это сразу же ведет к следующей классификации пространств аффинной, точнее, метрической связности, если принимается во внимание кривизна гомотетии:

$$\Omega_{\nu}^{\mu} = 0, \quad \Omega^{\mu} = 0, \quad \Omega = 0 \text{ — евклидово пространство;}$$

$$\Omega_{\nu}^{\mu} \neq 0, \quad \Omega^{\mu} = 0, \quad \Omega = 0 \text{ — риманово пространство;}$$

$$\Omega_{\nu}^{\mu} \neq 0, \quad \Omega^{\mu} = 0, \quad \Omega \neq 0 \text{ — пространства аффинной связности}$$

без кручения, используемые в единых теориях Вейля, Эддингтона и теориях Эйнштейна 1923—1925 гг., которые будут рассмотрены в настоящей главе;

$$\Omega_{\nu}^{\mu} \neq 0, \quad \Omega^{\mu} \neq 0, \quad \Omega = 0,$$

$$\Omega_{\nu}^{\mu} = 0, \quad \Omega^{\mu} \neq 0, \quad \Omega = 0,$$

$$\Omega_{\nu}^{\mu} \neq 0, \quad \Omega^{\mu} \neq 0, \quad \Omega \neq 0$$

¹ Точнее, рассматриваются проекции соответствующих векторов и их приращений на касательное аффинное пространство в некоторой произвольной точке многообразия.

— пространства аффинной связности с кручением, использованные в различных вариантах ЕГТП Эйпштейном, Л. Инфельдом и др. Два оставшихся варианта ($\Omega_{\nu}^{\mu} = 0, \Omega^{\mu} = 0, \Omega \neq 0$ и $\Omega_{\nu}^{\mu} = 0, \Omega^{\mu} \neq 0, \Omega \neq 0$), насколько нам известно, не рассматривались.

Аналогичная классификация в это же время была разработана и Схоутоном [202]. В сжатом виде она приведена и в известной книге Схоутена и Д. Стройка, вышедшей в 1935 г. [203]. Схоутен показал, что произвольная аффинная связность выражается соотношением

$$\Gamma_{\mu\lambda}^{\kappa} = \left\{ \begin{matrix} \kappa \\ \mu\lambda \end{matrix} \right\} + S_{\mu\nu}^{\kappa} - S_{\lambda\mu}^{\kappa} - S_{\mu\lambda}^{\kappa} + \frac{1}{2} (Q_{\mu\lambda}^{\kappa} + Q_{\lambda\mu}^{\kappa} - Q^{\kappa}_{\mu\lambda}), \quad (4)$$

причем величина $S_{\mu\lambda}^{\kappa} = 1/2 (\Gamma_{\mu\lambda}^{\kappa} - \Gamma_{\lambda\mu}^{\kappa})$ выражает степень асимметрии связности (перенесения), $\left\{ \begin{matrix} \kappa \\ \mu\lambda \end{matrix} \right\}$ символы Кристоффеля, а величины $Q_{\mu}^{\kappa\lambda} = \nabla_{\mu} g^{\kappa\lambda}$ являются компонентами ковариантной производной фундаментального тензора 2-го ранга $g_{\mu\nu}$ (формально введенного в геометрии аффинной связности). Тогда, если $S_{\mu\lambda}^{\kappa}$ и $Q_{\mu\lambda}^{\kappa} = 0$,

то связность называется симметричной и метрической (риманова геометрия); если же $S \neq 0$, то связность несимметрична (что эквивалентно наличию кручения), случай $S = 0$ и $Q_{\mu}^{\kappa\lambda} = Q_{\mu}^{\lambda\kappa}$, называемый Схоутоном симметричным и полуметрическим, приводит к геометрии Вейля. Такого рода классификация, эквивалентная по существу картановской, использовалась для классификации единых теорий поля, например, Э. Шмутцером [23] и В. И. Родичевым [204].

В действительности классификация Схоутена учитывала возможность различного типа связности для контравариантных и ковариантных векторов ($\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ и $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$), причем мера их различия определялась величинами $C_{\mu\nu}^{\lambda} = \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\mu}^{\lambda}$. Тогда всевозможные геометрии аффинной связности (их оказывается $3^3 = 27$) определяются различными комбинациями из этих трех величин (тензоров) $C_{kl}^i, S_{kl}^i, Q_{ikl}$, которые В. Ф. Каган (в своем блестящем обзорном докладе на Всероссийском съезде математиков в Москве в мае 1927 г.) назвал «схоутенами» [205]. Пространства с ненулевыми C_{kl}^i насколько нам известно, также не использовались для построения единых теорий поля.

Хотя математика уже с 1922 г. давала систематический принцип для опробования различных подходов для решения проблемы метрического синтеза гравитации и электромагнетизма, приверженцы программы ЕГТП при выборе геометрической схемы опирались на собственную интуицию и наводящие соображения физического характера². К тому же в общем-то не было никаких физических до-

² Эта особенность разработки ЕГТП в 20-х годах была отмечена и М.-А. Гонпела: «Фактически большинство авторов первоначально не обратили внимания на существование ряда величин (двух видов кривизны и кручения), которые характеризуют структуру пространства и которыми можно было бы

водов в пользу выбора геометрий аффинной связности. В 1923—1924 гг. стали разрабатываться, прежде всего Картаном, теории пространств проективной и конформной связности, локально устроенных как проективное и конформное пространства и позволяющих устанавливать соответствие между локальными пространствами посредством проективных и соответственно конформных преобразований [194]. Эти геометрии также можно было бы положить в основу геометрического объединения полей. С другой стороны, после работы Калуцы появилась возможность использования многообразий с числом измерений, большим четырех.

Возможны и иные классификации единых теорий. Рассмотрим классификационные соображения Вейля и Паули, относящиеся к началу 50-х годов. Вейль выделяет три класса теорий: 1) теории, основанные на использовании калибровочной инвариантности; 2) теории аффинного типа; 3) теории, связанные с отказом от симметрии метрического тензора или коэффициентов аффинной связности [18].

В этой своеобразной классификации основным принципом является способ введения электромагнитного поля. Так, в первый класс попадают и теория Вейля, и пятимерная теория Калуцы. Обе теории связаны с таким расширением группы произвольных непрерывных преобразований координат, которое бы тем или иным образом индуцировало калибровочное преобразование электромагнитного потенциала. В этот же класс включаются и проективные варианты пятимерной схемы.

В аффинных теориях основными величинами оказываются коэффициенты аффинной связности. В них существует большая свобода выбора инвариантов, позволяющих с помощью принципа действия получить уравнения как гравитационного, так и электромагнитного поля. Первой чисто аффинной теорией была теория Эддингтона. В 1923—1925 гг. Эйнштейн активно разрабатывал это направление.

Третий класс теорий включает в себя разнообразные схемы, основанные на отказе от выполнения условий симметрии либо для метрического тензора, либо для коэффициента аффинной связности. Так, при отказе от симметрии g_{ik} последний разлагается на симметричную часть, отождествляемую с гравитационным полем, и антисимметричную часть, отождествляемую с электромагнитным полем. Кстати говоря, между теориями второго и третьего класса резкой разницы нет. Последние также являются или чисто аффинными, или аффинно-метрическими. А в теориях второго класса электромагнитное поле часто связывается с антисимметричной частью тензора кривизны 2-го ранга (тензора Риччи).

распорядиться. Именно из-за этого единые теории долгое время являлись несколько произвольными, основывающимися на такой геометрии, которая могла бы допускать искусственные видоизменения. Однако, если при построении единых теорий оставаться в рамках многообразия аффинной связности, то фактически оказывается возможным подбор только трех элементов, характеризующих структуру многообразия: двух видов кривизны и кручения» [201, с. 372—373].

С этой точки зрения классификация Паули, введенная им в Дополнении к английскому изданию его «Теории относительности» (1956) [2, 63], представляется более естественной. Он разделяет все единые геометризованные теории на две группы: 1) теории с несимметричными g_{ik} и Γ_{ik}^l и 2) пятимерные и проективные теории. В этом Дополнении теория Вейля не рассматривается, поскольку она была изложена еще в первом издании книги Паули. Не вполне ясно, включает ли он ее во вторую группу, или она должна быть выделена в особую группу. Вероятно, согласно Вейлю, ее следовало бы присоединить ко второй группе.

Наконец, М.-А. Тоннела считает полезным (и мы фактически придерживались этой точки зрения в предыдущих разделах) разделить все теории на собственно единые, решающие только задачу-минимум, иначе говоря, теории, в которых электромагнетизм и гравитация объединяются в единое целое на геометрической основе, и так называемые недуалистические теории, в которых на первый план выдвигается задача-максимум (сведение источников поля к самому полю) [22, 201]. Естественно, что последовательная единая теория поля должна в конечном счете быть и недуалистической. Залогом недуалистичности единых теорий поля, конструируемых на основе ОТО, является их пелинейность.

В заключение заметим, что классификация Картана (и близкая к ней классификация Схоутена) наиболее последовательна, детально и систематична, особенно при рассмотрении неримановых четырехмерных схем. Именно поэтому она была использована в различных обзорах ЕГТП, прежде всего в упомянутых выше работах М.-А. Тоннела, а также Э. Шмутцера, В. И. Родичева и др. Но с физической точки зрения, вполне правомерной представляется и классификация Паули — Вейля. Большинство рассмотренных ранее ЕГТП и тех теорий, которые будут рассматриваться в этой главе, — единые теории, решающие лишь задачу-минимум, хотя при их рассмотрении нередко обращалось внимание и на возможности решения в их рамках задачи-максимум.

Возвращаясь к эйнштейновским поискам полевого синтеза и предвосхищая последующее изложение, еще раз подчеркнем, что, во-первых, Эйнштейн испробовал чуть ли не все возможные варианты геометрического объединения: пятимерные, включая проективные схемы, и четырехмерные неримановы с различными комбинациями Ω_{μ}^{ν} , Ω^{μ} и Ω . И во-вторых, Эйнштейн никогда не упускал из виду задачу-максимум. Некоторые из его работ специально посвящены таким недуалистическим схемам, в других он обсуждает возможности решения задачи-максимум в рамках той или иной единой теории (вопрос о существовании несингулярных статических центрально-симметричных решений), в третьих ищет иные возможности полевого описания источников (частиц).

Еще летом 1922 г. Эйнштейн, как мы видели, наибольшие надежды возлагал на пятимерие, несмотря на то что за полгода до этого он вместе с Громмером установил отсутствие в пятимерной теории не-сингулярных статических центрально-симметричных решений. Теорию Вейля он по-прежнему считал ошибочной, а теория Эддингтона представлялась ему слишком широкой и неопределенной, хотя и привлекательной по своему замыслу («это превосходная рама, но совершенно неизвестно, как ее занолнить» [57, с. 147]).

С ноября 1922 г. до весны 1923 г. Эйнштейн совершил одно из самых больших и увлекательных путешествий. Он побывал в Китае и Японии, а затем посетил Палестину и Испанию. В Японии Эйнштейн узнал о присуждении ему Нобелевской премии по физике за 1921 г. Там же он написал Предисловие к первому своему собранию трудов, подготовленному издательством Кайдоша (27 декабря) [206]. В статье «О современном кризисе теоретической физики», опубликованной в декабре 1922 г. в японской газете «Кайзо», он, ничего не сказав о единых теориях, основное внимание сосредоточил на кризисе фундаментальных понятий физики, вызванном обнаружением квантовых закономерностей микромира. «...Следует ожидать, — писал он, — что прогресс науки вызовет такой переворот в ее основах, который окажется не менее глубоким, чем переворот, связанный с теорией поля» [207, с. 57]. Статья заканчивалась выражением сомнения в том, что математический аппарат дифференциальных уравнений будет в состоянии составить основу квантовой теории: «Чтобы действительно обосновать квантовые соотношения, по-видимому, необходим новый математический язык. Во всяком случае, запись законов природы в виде комбинации дифференциальных уравнений и интегральных условий, как мы делаем сегодня, противоречит здравому смыслу» [207, с. 60].

Но, несмотря на это, Эйнштейн продолжал разрабатывать направления ЕГП, существенно опиравшиеся на континуалистские математические концепции, прежде всего на дифференциальную геометрию и теорию дифференциальных уравнений. 15 февраля М. Планк представил на заседании Прусской академии наук работу Эйнштейна «К общей теории относительности», завершенную в январе 1923 г. в Японии и присланную в Берлин [176]. В ней был дан первый набросок единой геометризованной теории поля, которая примыкала к теории Эддингтона и которую Эйнштейн называл аффинной теорией поля.

Встав на путь Эддингтона и беря за основу закон «параллельного переноса»

$$\delta A^\mu = -\Gamma_{\alpha\beta}^\mu A^\alpha dx^\beta \quad (5)$$

и коэффициенты симметричной аффинной связности $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ в качестве переменных теории, Эйнштейн разлагает тензор Риччи на сим-

метричную и антисимметричную части

$$R_{kl} = g_{kl} + \Phi_{kl}, \quad (6)$$

отождествляемые им соответственно с метрическим тензором g_{ik} и тензором электромагнитного поля Φ_{kl} .

Затем Эйнштейн ищет подходящий лагранжиан, который посредством вариационного принципа дал бы возможность получить уравнения гравитационного и электромагнитного полей. Он отмечает наиболее перспективную возможность

$$\mathcal{L} \sqrt{-g} = 2 \sqrt{-|R_{ik}|}, \quad (7)$$

т. е. выражение, которое имеет смысл тензорной плотности элемента объема и которое «образовано из величин R_{kl} без расщепления на симметричную и антисимметричную части» [176, с. 137]. В этой «нерасщепленности» Эйнштейн видел существенное достоинство теории: «Если эта функция Гамильтона окажется хорошей, то теория придет идеальным способом к объединению гравитации и электричества в одно понятие, причем не только оба вида поля будут определяться едиными величинами Γ , но и функция Гамильтона будет единой, тогда как до сих пор она состояла из слагаемых, логически независимых одно от другого» [там же].

Далее Эйнштейн заменяет выражение (6) следующим:

$$\lambda^2 R_{kl} = g_{kl} + \Phi_{kl},$$

учитывая, что инвариант $g_{ik} dx_i dx_k$ должен быть порядка «человеческих размеров» (т. е. λ — очень большое число). Тогда

$$\frac{1}{\lambda^2} g_{kl} = -\frac{\partial \Gamma_{kl}^\alpha}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Gamma_{k\alpha}^\alpha}{\partial x_l} + \frac{\partial \Gamma_{l\alpha}^\alpha}{\partial x_k} \right) + \Gamma_{k\beta}^\alpha \Gamma_{l\alpha}^\beta - \Gamma_{kl}^\alpha \Gamma_{\alpha\beta}^\beta, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda^2} \Phi_{kl} = \left(\frac{\partial \Gamma_{k\alpha}^\alpha}{\partial x_l} - \frac{\partial \Gamma_{l\alpha}^\alpha}{\partial x_k} \right). \quad (9)$$

Затем варьирование действия с лагранжианом (7) позволяет получить 40 уравнений, из которых можно определить все $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$. При этом появляются симметричная и антисимметричная тензорные плотности $s^{ik} \sqrt{-g}$ и $f^{ik} \sqrt{-g}$, связанные соответственно с гравитационным и электромагнитным полями. Величину $\sqrt{-g} i^i = \frac{\partial (\sqrt{-g} f^{ik})}{\partial x_k}$ он называет плотностью тока. Коэффициенты аффинной связности с учетом электромагнитного поля записываются в виде

$$\Gamma_{kl}^\alpha = \frac{1}{2} s^{\alpha\beta} \left(\frac{\partial s_{k\beta}}{\partial x_l} + \frac{\partial s_{l\beta}}{\partial x_k} - \frac{\partial s_{kl}}{\partial x_\beta} \right) - \frac{1}{2} s_{kl} i^\alpha + \frac{1}{6} \delta_k^\alpha i_l + \frac{1}{6} \delta_l^\alpha i_k. \quad (10)$$

Эйнштейн показывает далее, что при отсутствии электромагнитного поля коэффициенты аффинной связности совпадают с обычными символами Кристоффеля.

Подставляя выражение для $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ (10) в уравнение (9), он получает уравнение

$$\frac{1}{\lambda^2} \Phi_{ik} = 1/6 \left(\frac{\partial i_i}{\partial x_k} - \frac{\partial i_k}{\partial x_i} \right). \quad (11)$$

Поскольку значение λ^2 очень велико, конечные значения Φ_{ik} возможны при очень малых плотностях тока. Если положить согласно этому плотность тока всюду равной нулю (за исключением сингулярных областей), то получаются уравнения Максвелла без источников.

Таким образом, предложенная аффинная схема дает единое описание гравитационного и электромагнитного полей, согласуясь при этом с принципом соответствия, которому Эйнштейн всегда придавал существенное эвристическое значение. Нужно было еще исследовать вопрос о существовании несингулярных частицеподобных решений. «Охватывает ли наша теория также и электрические элементарные образования,— писал он,— можно решить только после строгого рассмотрения случая центрально-симметричного статического поля. Во всяком случае, уравнение (25) (т. е. уравнение (11) в нашей нумерации формул.— *B. B.*) показывает, что конечные значения для плотности тока i^i возможны только при условии, если одновременно i_i становится малой величиной порядка $1/\lambda^2$; таким образом, не исключается существование электронов без сингулярностей» [176, с. 141]. Эйнштейну казалось также, что в новой теории имеется возможность объяснить существующую в природе зарядовую асимметрию, и он оптимистически заключил: «Изложенное выше исследование показывает, что общая идея Эддингтона в соединении с принципом Гамильтона приводит к теории, почти полностью свободной от произвола, отражающей наши современные знания о гравитации и электричестве и объединяющей оба вида поля по-настоящему, законченным образом» [там же]³.

После возвращения в Берлин Эйнштейн вскоре представил в Прусскую академию наук небольшую работу, несколько уточняющую его аффинную теорию: Эта заметка была опубликована 15 мая [209]. Она повторяла в сжатой форме результаты первой статьи, но содержала опровержение его замечания о зарядовой асимметрии: «Действительно t и соответственно $|t^{hi}|$ является четной функцией антисимметричной части f^{hi} величины t^{hi} , а третий член в уравнении (14) (т. е. в уравнении

$$\delta \left\{ \int \left[-2 \sqrt{-r} + \mathfrak{R} - \frac{1}{6} g^{\alpha\beta} i_{\alpha} i_{\beta} \right] d\tau \right\} = 0. \quad - B.B.)$$

квадратично зависит от плотности тока. Теория не может поэтому

³ В оригинале это звучит так: «Die vorstehende Untersuchung zeigt, dass Eddingtons allgemeine Gedanke in Verbindung mit dem Hamiltonschen Prinzip zu einer von Willkür fast freien Theorie führt, welche bisherigen Wissen über Gravitation und Elektrizität gerecht wird und beide Feldarten in wahrhaft vollendeten Weise vereinigt» [208, с. 38].

учесть различие в массах положительных и отрицательных электронов» (209, с. 144).

Эту же теорию в несколько иной, более ясной, форме Эйнштейн изложил на заседании Прусской академии наук 31 мая [210]. Отличие заключалось лишь в выборе лагранжиана. Теперь в качестве такого Эйнштейн выбирает выражение

$$\mathcal{L} \sqrt{-g} = 2\alpha \sqrt{-g} - \frac{\beta}{2} f_{\mu\nu} (f^{\mu\nu} \sqrt{-g}), \quad (12)$$

приводящее к следующей системе полевых уравнений:

$$R_{\mu\nu} - \alpha g_{\mu\nu} = - \left[\beta \left(-f_{\mu\sigma} f_{\nu}^{\sigma} + \frac{1}{4} g_{\mu\nu} f_{\sigma\tau} f^{\sigma\tau} \right) + \frac{1}{6} i_{\mu} i_{\nu} \right], \quad (13)$$

$$-\beta f_{\mu\nu} = \frac{1}{6} \left(\frac{\partial i_{\mu}}{\partial x_{\nu}} - \frac{\partial i_{\nu}}{\partial x_{\mu}} \right); \quad (14)$$

здесь α имеет смысл космологической постоянной, а β — очень малая постоянная, которую при отсутствии зарядов следует положить равной нулю.

На этом этапе Эйнштейн заметил, что уравнения (13) и (14) в конечном счете приводят к тем же результатам, что и уравнения теории Вейля (при некотором специальном выборе лагранжиана). Одновременно он понял, что эти уравнения не приводят к электрону как свободному от сингулярностей решению» [210, с. 148]⁴. В конце мая он пишет Вейлю: «Я вскоре вышлю Вам корректуру работы об обобщенной функции Гамильтона ... Дошедшие до меня высказывания относительно всей проблемы в целом довольно пессимистичны. Математика хороша и прекрасна, но природа водит нас за нос. Впрочем, в этом есть что-то забавное. Я хотел удалиться от Вас и пришел — отвлекаясь от знака космологического члена — к таким же уравнениям, как Вы с Вашим специальным принципом действия. Я хотел отбросить потенциалы, но они пролезают через черный ход⁵. Вся идея должна быть реализована, она необыкновенно прекрасна; но над нами стоит со своей мраморной усмешкой неутомимая природа, давшая нам больше желаний, чем ума» [57, с. 147].

⁴ В мае 1923 г. Эйнштейн работал в Лейдене. П. Эренфест сообщал оттуда А. Ф. Иоффе (в письме от 16 мая 1923 г.): «Эйнштейн находится здесь вот уже 14 дней — совершенно одержим проблемой „электричество—гравитация“. И казалось, что он уже нашел те уравнения, описывающие огромные гравитационные силы внутри электрона, благодаря которым электрон не разрывается, но опять его постигла неудача. Занимается он этим очень интенсивно» [211, с. 167]. Неудача, о которой писал Эренфест, надо думать, заключалась в том, что теория не позволяла интерпретировать электрон как несингулярное решение полевых уравнений.

⁵ Эйнштейн в этой теории стремился с самого начала иметь дело только с напряженностями электромагнитного поля, но в последней статье (доложенной 31 мая) «для физической интерпретации уравнения поля» ему пришлось вернуться к потенциалам $\left(f_{\mu} = -\frac{1}{\beta} i_{\mu} \right)$.

Летом 1923 г. Эйнштейн продолжал считать аффинный подход перспективным. Он написал статью «Теория аффинного поля» для английского журнала «Nature» [212], почти в точности повторяющую предыдущую работу. Эйнштейн подчеркивал, что исходным для него была «идея Эддингтона о том, что „физика поля“ математически должна строиться на теории аффинной связи». Единственным отличием от предыдущей работы был отказ от космологического члена⁶. Полевые уравнения теории совпадали с уравнениями (13) при $\alpha = 0$ и $i^{\mu} = -\gamma g^{\mu\nu} f_{\nu}$ (здесь $\gamma \equiv \beta$). «Из теории,— резюмировал Эйнштейн,— естественным путем следуют как известные законы гравитационного и электромагнитного полей, так и связь этих двух видов поля; однако она ничего не говорит о структуре электроина» [212, с. 153].

В июле Эйнштейн отправился в Швецию на церемонию вручения ему Нобелевской премии. Он не произнес при этом традиционной Нобелевской речи. В сборник Нобелевских речей был включен доклад, сделанный им примерно в это же время (11 июля) в Гетеборге на съезде естествоиспытателей северных стран. Доклад назывался «Основные идеи и проблемы теории относительности» и в основном был посвящен принципиальным вопросам СТО и ОТО [214]. Но в заключительной части Эйнштейн коснулся проблемы единой теории поля. «Теперь,— писал он,— особенно живо волнует умы проблема единой природы гравитационного и электромагнитного полей. Мысль, стремящаяся к единству теории, не может примириться с существованием двух полей, по своей природе совершенно независимых друг от друга. Поэтому делаются попытки построить такую математически единую теорию поля, в которой гравитационное и электромагнитное поля рассматриваются лишь как различные компоненты одного и того же единого поля, причем его уравнения, по возможности, уже не состоят из логически независимых друг от друга членов» [214, с. 127].

Далее Эйнштейн заметил, что естественный путь к такому синтезу — это обобщение четырехмерной римановой геометрии и, таким образом, геометризация электромагнитного поля. Однако основной трудностью на этом пути, по мнению Эйнштейна, было отсутствие экспериментальной, физической основы для геометризации электромагнетизма: «К сожалению, при этой попытке (геометризации электромагнитного поля,— В. В.) мы не можем опереться на опытные факты, как при построении теории тяготения (равенство инертной и тяжелой массы), а вынуждены ограничиться критерием математической простоты, который не свободен от произвола» [214, с. 127—128]. Он упомянул об идеях Леви-Чивиты, Вейля и Эддингтона и указал на аффинный подход в духе Эддингтона, который он разрабатывал весной 1923 г., как на наиболее перспективный способ

⁶ Вероятно, это было связано с признанием Эйнштейном своей ошибки в отношении работы А. А. Фридмана, в которой была доказана возможность динамического центрально-симметричного решения уравнений гравитационного поля без космологического члена. Соответствующая заметка поступила в редакцию «Zeitschr. f. Phys.» 31 мая 1923 г. [213].

решения проблемы: «Находя наиболее простые дифференциальные уравнения, которым можно подчинить аффинную связь, мы вправе надеяться, что натолкнемся на такое обобщение уравнения тяготения, которое будет содержать в себе также и законы электромагнитного поля. Эта надежда, — продолжал Эйнштейн, — и в самом деле оправдалась, но мы не знаем, можно ли рассматривать полученную таким образом формальную связь как действительное обогащение физики, пока из нее не будут получены какие-либо новые физические связи. В частности, теорию поля можно будет признать удовлетворительной, по моему мнению, лишь тогда, когда она позволит описать элементарные электрические частицы с помощью решений, не содержащих особенностей» [214, с. 128].

Итак, с формальной точки зрения аффинную теорию Эйнштейн считал вполне приемлемой, согласующейся с «критерием математической простоты», но он видел, что она пока не привела ни к какому физическому прогрессу. Более того, он не мог ее считать удовлетворительной, так как пришел к выводу о невозможности в ее рамках описать электроны посредством несингулярных решений полевых уравнений. В связи с этим Эйнштейн упомянул о необходимости иметь в виду и квантовые аспекты поведения частиц и электромагнитного поля, хотя «перед лицом этой наиболее глубокой физической проблемы современности (т. е. квантовой проблемы — В. В.) пока оказалась бессильной и теория относительности [там же].

Хотя в эйнштейновских статьях 1923 г. по единой теории поля нет явных упоминаний о возможном выходе этих теорий к наблюдаемым эффектам, имеются некоторые свидетельства поисков Эйнштейном такого рода выхода. Вспоминая о своих научных контактах с Эйнштейном в 1922—1923 гг., В. Герлах писал: «В это время Эйнштейн предложил мне заняться совсем другой проблемой (до этого Герлах вместе с О. Штерном провел замечательный эксперимент, подтвердивший пространственное квантование в магнитном поле. — В. В.), которая, впрочем, разрабатывалась уже Фарадеем, а именно проблемой создания магнитного поля движущейся материей (или изменением состояния ее движения). Имелись в виду измерения около потоков воды или водопадов» [215, с. 98]. Несмотря на длительное обсуждение этих опытов и настойчивость Эйнштейна, Герлах не решился на их проведение⁷.

В письме к Борну и его жене он писал 22 июля 1923 г.: «В делах научных меня занимает в настоящее время один очень интересный вопрос, связанный с аффинной теорией поля. Есть надежда понять поле земного магнетизма и электростатический бюджет Земли и проверить выводы экспериментально. Но с экспериментом надо подождать». Однако тут же, в приписке к письму, он сообщал, что «Фрапк (очевидно, Дж. Франк из Геттингена. — В. В.), который был здесь только что, говорил мне, что по проведенным уже измерениям в ионизованных газах ожидавшийся мною эффект не был

⁷ Я благодарен Б. Е. Явелову за указание на это свидетельство.

обнаружен» [89, с. 44--45]. «Таким образом,— резюмировал Эйнштейн,— с пониманием поля земного магнетизма ничего не вышло».

Но Эйнштейн не отказался от поисков экспериментальных свидетельств своей «аффинной теории поля». Вопрос о возможных следствиях такого рода он обсуждал с брюссельским физиком О. Пикаром в апреле 1924 г. [216, с. 51]. В частности, речь шла о магнитных полях космологического происхождения и возможности их измерения. В связи с этим Эйнштейна интересовали возможные экспериментальные следствия зарядовой асимметрии, выражавшиеся в том, что вклады в напряженности электромагнитного поля от положительных и отрицательных зарядов различаются на очень небольшую величину (идея, родственная концепции Моссоли—Цёлльнера) [38]. Весьма точные опыты, проведенные в 1925 г. Пикаром, не подтвердили наличие этой разницы. Во время своего очередного визита в Лейден в октябре 1924 г. Эйнштейн (вместе с Эрэнфестом) думал о проведении тонкого электростатического эксперимента, который позволил бы подтвердить следствия «аффинной теории», выходящие за рамки максвелловской электродинамики. Эрэнфест писал Иоффе 9 октября: «Эйнштейн и я ежедневно по многу часов углубляемся в одну экспериментальную работу, чтобы установить, действительно ли существует предполагаемый им совершенно сумасшедший электростатический эффект. В данный момент мы пока еще не справились с капризами струнного электрометра» [211, с. 181]. Эрэнфест, очевидно, был настроен весьма скептически по отношению к этим опытам. Через десять дней (19 октября) он писал Иоффе: «Эксперимент, который мы начали совместно с Эйнштейном, в настоящее время, к моей радости, мы бросили. Выяснилось, что отклонения, связанные с ионизацией воздуха, оказываются намного большими, чем сам мистический эффект, который он искал» [211, с. 184].

В статье «Об эфире», написанной в 1924 г., Эйнштейн специально выделяет проблему объяснения магнитного поля Земли и Солнца [217]⁸. Представления, основанные на электродинамике Максвелла,

⁸ Вопрос о связи магнитного поля с вращением нейтральных массивных тел интересовал Эйнштейна с 1915 г., когда он вместе с В. де Гаазом занимался экспериментальным доказательством существования токов Ампера (эффект Эйнштейна—де Гааза) [218]. Установив пропорциональность магнитного и механического моментов для электрона (гиромангнитное отношение), Эйнштейн и де Гааз распространили этот вывод и на вращение Земли. «Получается также,— писали они,— что вращению Земли соответствует параллельное земной оси магнитопондеромоторное поле, направленное с севера на юг и обладающее напряженностью порядка 10^{-11} . Возможно, в этом и заключается причина приближенного совпадения магнитной оси и оси вращения» [219, с. 367]. Специально проблемой «вращательного» происхождения магнитного поля Земли занимался американский физик С. Дж. Барнетт, зарегистрировавший соответствующий эффект при вращении железного цилиндра (эффект Барнетта, первое сообщение — 1909 г.) [218, с. 73—74].

Предьстория такого рода магнитномеханических исследований и их связь с космическим магнетизмом, последующее их развитие кратко рассмотрены в цитированной книге В. Я. Френкеля и Б. Е. Явелова [218], а также в ра-

как казалось Эйнштейну, были не в состоянии объяснить достаточно большие напряженности этих полей. «Скорее,— писал он,— похоже на то, как будто магнитные поля возникают при вращательном движении нейтральных масс. Подобное порождение полей не может предсказать ни теория Максвелла в ее первоначальном виде, ни теория Максвелла, обобщенная в смысле общей теории относительности. Здесь природа указывает нам, по-видимому, фундаментальную, пока еще не объясненную теорией закономерность» [217, с. 159].

В фактах космического магнетизма, прежде всего магнитных полей Земли и Солнца, которые не укладывались в рамки общепринятых представлений того времени, основанных в конечном счете на максвелловской электродинамике, Эйнштейн стремился усмотреть непосредственное физическое, даже экспериментальное, основание для расширения этой теории. Он искал электродинамический аналог основополагающего факта равенства инертной и гравитационной масс. Разработка на основе этого факта принципа эквивалентности и последующее распространение последнего на случай вращающегося диска сыграли существенную роль в генезисе тензорно-геометрической концепции гравитации [223]. И на этот раз возвращение массивных тел указывало как будто на свое родство с электромагнитными явлениями⁹.

В 30—40-е годы вопрос о магнетизме вращающихся масс в связи с едиными геометризованными теориями поля поднимался неоднократно. Любопытный материал об этом имеется, например, в воспоминаниях М. А. Маркова о С. И. Вавилове, проявлявшем живой интерес к этой проблеме [224]. В последующих модификациях неметрической аффинной теории поля возникали подобные магнитомеханические эффекты, которые, впрочем, были слишком слабы, чтобы их зарегистрировать экспериментально [201, с. 374—375]. В 40—50-х годах, как это можно судить по работам Эйнштейна, этот вопрос его интересовал значительно меньше, чем в 20-х годах. Таким образом, в 1923—1924 гг. Эйнштейн весьма настойчиво искал возможности связать свою «аффинную теорию поля» с физическими эффектами, прежде всего с макроскопическими электромагнитными явлениями. Он старался этими идеями заинтересовать экспериментаторов В. Герлаха, Дж. Франка, О. Пикара и др., а также своего друга Эренфеста. Все эти попытки не дали результата, но тем не менее они не подорвали уверенность Эйнштейна в перспективности аффинного направления, которое он продолжал разрабатывать в течение всего 1925 г.

ботах П. М. Блэкета [220] и Г. М. Идлеса [221, с. 52—75]. В настоящее время пет общепринятой теории происхождения магнитных полей космических тел, но идея Барнетта, которую разделял и Эйнштейн, о «вращательной» природе космического магнетизма признана ошибочной. Я благодарен Б. Е. Явелову и Г. М. Идлису за дополнительную информацию по этому вопросу.

⁹ В этой связи Б. Е. Явелов (устное сообщение) высказал предположение, что природа вращательного движения относилась к числу основных эйнштейновских тем (понимаемых, например, в смысле холтоновского «тематизма»).

Но вернемся к концу 1923 г., когда Эйнштейн, придя к выводу, что «аффинная теория» не содержит несингулярных решений, которые можно было бы истолковать как электрон, попытался вывести квантовые особенности поведения электрона на основе концепции переопределенности системы общерелятивистских полевых уравнений.

КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕВЫХ УРАВНЕНИЙ И КВАНТЫ, 1923 г.

Вообще говоря, вопрос об объяснении квантовых особенностей электромагнитного поля и электрона не связывался Эйнштейном с задачей-максимумом на первой стадии ее решения, которая заключалась лишь в доказательстве существования у полевых уравнений несингулярного статического центрально-симметричного решения, интерпретируемого как электрон. Но в дальнейшем, несомненно, и квантовые закономерности должны были получить объяснение на основе полевых уравнений единой теории.

Как выяснилось к концу 1923 г., ни одна из предлагавшихся с 1918 г. единых теорий не имела таких несингулярных решений. Вместе с тем еще в период разработки своей первой, пегеометризованной единой теории поля 1908—1910 гг. Эйнштейн рассматривал возможность истолкования «элементарных электрических и световых квантов» как некоторых особых точек обобщенных полевых уравнений [55, с. 194]. Причем близость по порядку величин постоянных Планка и e^2/c (где e — заряд электрона, а c — скорость света) была для него серьезным доводом в пользу точки зрения, что «та модификация теории, которая дает как следствие элементарный квант (т. е. заряд электрона. — В. В.), будет также содержать в себе квантовую структуру излучения» [52, с. 178].

На заседании Берлинской академии наук 13 декабря 1923 г. была представлена работа Эйнштейна «Предлагает ли теория возможности для решения квантовой проблемы?», в которой без связи с тем или иным конкретным вариантом объединения гравитации и электромагнетизма впервые в рамках программы ЕГТП обсуждался вопрос о квантовых закономерностях поведения частиц [225]. До сих пор Эйнштейн либо ограничивался задачей-минимум, т. е. проблемой объединения гравитационного и электромагнитного полей, либо на основе такого объединения пытался найти ключ к решению задачи-максимум (главным образом из уравнений единого поля получить несингулярные центрально-симметричные статические решения, которые можно было бы истолковать как заряженные элементарные частицы,) либо искал такие возможности (т. е. возможности полевого описания частиц), опираясь на уравнения ОТО или некоторые их обобщения, не связанные непосредственно с единым геометрическим описанием полей.

Эйнштейн начинает с сопоставления программы ЕГТП с квантово-теоретической программой. Слабость последней он усматривает

в ее недостаточной теоретичности: «Большие успехи, достигнутые квантовой теорией за неполную четверть века с момента ее зарождения, не могут скрыть от нас тот факт, что *логическое основание этой теории все еще отсутствует* (курсив наш.— В. В.)» [225, с. 456]. Неудачи классического способа описания микропроцессов, опирающегося на представление о четырехмерном пространственно-временном континууме и классической однозначной причинности, а также на связанный с ними математический аппарат дифференциальных уравнений, привели к сомнениям в универсальности этих предпосылок. «С точки зрения теории познания,— замечает Эйнштейн,— все эти сомнения законны и, в свете существующих глубоких трудностей, вполне понятны» [225, с. 457].

Все же успехи классической полевой концепции, связанной с формализмом дифференциальных уравнений с частными производными, были, по мнению Эйнштейна, за последние полвека столь впечатляющими, что отказ от нее при отсутствии достаточно мощной теоретической альтернативы при решении квантовой проблемы, мог бы оказаться явно преждевременным. Подход к частицам как к сгусткам поля, получивший наибольшее развитие в работах Ми, не привел к успеху. Близко примыкающий к нему подход Эйнштейна к решению задачи-максимум в рамках программы ЕГТП также не дал результата.

Важная особенность квантовой теории, ставящая под сомнение возможность использования классического способа описания, заключается, по мнению Эйнштейна, в том, что «начальное состояние электропа, движущегося вокруг ядра водорода, нельзя выбрать произвольно», так как «этот выбор должен быть согласован с квантовыми условиями» (иначе говоря, «не только развитие во времени, но и начальные состояния подчиняются определенным законам») [225, с. 458]. Это свойство как будто плохо согласуется с классической причинностью, допускающей произвольный выбор начального состояния системы, которая после этого выбора развивается во времени в соответствии с дифференциальными уравнениями, лежащими в основе теории. «Можно ли это свойство процессов природы, которому мы, по-видимому, должны придавать всеобщее значение, описать теорией, основанной на дифференциальных уравнениях в частных производных?» — спрашивает Эйнштейн [там же]. Причем классический, континуалистский способ описания он пока не связывает с программой геометризации. Возможность согласовать описание «свойство процессов природы» с динамическим законом в форме дифференциальных уравнений Эйнштейн увидел в идее «переопределения», согласно которой «число дифференциальных уравнений должно быть больше, чем число определяемых ими переменных поля» [225, с. 458; 226, с. 360].

Он иллюстрирует эту идею на примере евклидовой геометрии, рассматриваемой как частный случай римановой геометрии. Необходимым и достаточным условием евклидовости риманова пространства является обращение в нуль тензора кривизны 4-го ранга R_{iklm} . При этом вообще отпадает нужда в каких-либо «начальных усло-

виях». В результате получается 20 алгебраически независимых уравнений для десяти компонентов метрического тензора g_{ik} .

Затем он дает набросок теории поля с переопределенной системой уравнений, способной в перспективе включать в себя и описание квантовых закономерностей. Искомая система уравнений должна быть общековариантной, в нее должны входить только гравитационные потенциалы g_{ik} и напряженности электромагнитного поля Φ_{ik} . Она должна также согласно принципу соответствия содержать в себе уравнения гравитации и электродинамики, иначе говоря уравнения

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (15)$$

где $T_{ik} = -\Phi_{i\alpha}\Phi_k^\alpha + \frac{1}{4}g_{ik}\Phi_{\alpha\beta}\Phi^{\alpha\beta}$ — тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Наконец, искомая, переопределенная система уравнений должна допускать статическое центрально-симметрическое решение, интерпретируемое как «положительный или отрицательный электрон». Но теперь имеется в виду как раз особое, сигулярное решение.

При выполнении этих условий можно надеяться, что переопределенной системой уравнений «будут одновременно определяться и механические свойства особых точек (электронов) таким образом, что начальные состояния поля и особых точек также будут подчиняться ограничительным условиям» [225, с. 485]. В результате квантовые условия будут также получены как следствие переопределенной системы уравнений.

В качестве модельной системы такого рода по аналогии с евклидовой геометрией Эйнштейн выбрал систему уравнений

$$R_{ik,lm} = \Psi_{ik,lm}, \quad (16)$$

где $R_{ik,lm}$ — тензор Римана—Кристоффеля, а Ψ — некоторый тензор 4-го ранга, однородный и второй степени относительно тензора напряженностей электромагнитного поля $\Phi_{\mu\nu}$ и обладающий теми же свойствами симметрии, что и тензор $R_{ik,lm}$. Эти условия на $\Psi_{ik,lm}$ позволяют записать его в виде

$$\Psi_{ik,lm} = A'\Phi'_{ik,lm} + A''\Phi''_{ik,lm} + A'''\Phi'''_{ik,lm}, \quad (17)$$

где тензоры $\Phi'_{ik,lm}$, $\Phi''_{ik,lm}$, $\Phi'''_{ik,lm}$ записываются следующим образом:

$$\Phi'_{ik,lm} = \Phi_{ik}\Phi_{lm} + \frac{1}{2}(\Phi_{il}\Phi_{km} - \Phi_{im}\Phi_{kl}),$$

$$\Phi''_{ik,lm} = g_{il}\Phi'_{km} + g_{km}\Phi'_{il} - g_{im}\Phi'_{kl} - g_{kl}\Phi'_{im},$$

$$\Phi'''_{ik,lm} = (g_{il}g_{km} - g_{im}g_{kl})\Phi',$$

$$\Phi'_{il} = g^{km} \Phi'_{ik,lm} \quad \Phi' = g_{ik} \Phi'_{ik}.$$

Выбор в качестве A' , A'' , A''' соответственно чисел -2 , $-2/3$ и $-1/6$ дает возможность после умножения уравнения (16) на g^{il} и последующего суммирования по этим индексам получить уравнения гравитации с электромагнитным тензором энергии-импульса. Последние, как было показано ранее Г. Рейснером и Г. Вейлем, допускают центрально-симметричное статическое решение $L(m, \epsilon)$, имеющее особую точку, определяемое двумя постоянными — массой и зарядом и интерпретируемое как положительный или отрицательный электрон [64]. Следовательно, и переопределенная система должна обладать решением $L(m, \epsilon)$. Но система (16) не годится потому, что она в отсутствие электрического поля приводит к евклидовой метрике, т. е. решение $L(m, 0)$ не удовлетворяет ей. Электрон же без массы $L(0, \epsilon)$, как удалось показать Эйнштейну, содержится в системе (16). Поэтому, полагал Эйнштейн, система уравнений (16) близка к искомой. Один из путей переопределения уравнений (15) он видел в их дополнении соотношениями

$$\Psi_{ik,lm;n} + \Psi_{ik,mn;l} + \Psi_{ik,nl;m} = 0, \quad (18)$$

полученными из тождеств Бьянки для тензора $R_{ik,lm}$.

Эйнштейну «вследствие слишком большой сложности вычислений» не удалось показать, что решение $L(m, \epsilon)$ удовлетворяет системе уравнений (18). Надежда на то, что эта система все-таки содержит $L(m, \epsilon)$, основывалась на включении $L(0, \epsilon)$ и $L(m, 0)$ в число решений системы (18). «Итак, — резюмировал Эйнштейн, — существует определенная вероятность того, что система (12) (т. е. (18) в нашей нумерации. — *B. B.*) в сочетании с уравнениями (8) (т. е. уравнениями (15). — *B. B.*) приводит к искомой переопределенности полного поля» [225, с. 461].

Без ответа фактически оставались основные вопросы: является ли $L(m, \epsilon)$ решением этой переопределенной системы уравнений, определяет ли она механические и квантовые свойства особенностей? В корректурном дополнении Эйнштейн заметил, что Громмеру удалось утвердительно ответить на первый вопрос. Ответы на второй и третий вопросы, как казалось Эйнштейну, зависели только от математической искусности. «Два последних вопроса, — писал он в заключение, — предъявляют большие требования к математике, желающему их решить; необходимо изобретать приближенные методы для решения проблемы движения» [там же]. Эйнштейн не считал уравнения (16) и (18) сколько-нибудь окончательными. Скорее они иллюстрировали идею переопределенной системы дифференциальных уравнений, которая, по его мнению, была единственно возможным способом преодоления чисто классической причинности и формулировки квантовых закономерностей на языке дифференциальных уравнений: «В заключение следует еще раз подчеркнуть, что для меня самой главной в этом сообщении является идея о переопределенности; я охотно соглашусь, что уравнения (12) (т. е.

уравнения (18).— В. В.) выведены не так строго, как можно было бы желать» [225, с. 462]¹⁰.

Не настаивая на конкретной форме реализации идеи переопределения системы полевых уравнений, Эйнштейн саму эту идею считал весьма глубокой и перспективной. Ему казалось, что она открывала путь к теоретическому освоению квантового мира на основе классической полевой программы, которая для него была идеалом, нормой физической теории: «То обстоятельство, что здесь, по-видимому, заложена возможность для подлинно научного обоснования квантовой теории, оправдывает все усилия» [225, с. 461—462] («Der Umstand, dass hier eine Möglichkeit zu einer wirklich wissenschaftlichen Fundierung der Quantentheorie vorzuliegen scheint, rechtfertigt grosse Anstrengungen») [226, с. 364]. Эйнштейну казалось, что намеченный им теоретический прорыв в области квантовой физики связан в основном, с преодолением математических трудностей. Поэтому он старался к этой задаче привлечь внимание математиков. «Мои усилия, — писал он, — достигнут цели уже в том случае, если заинтересуют математиков и убедят их, что предполагаемый здесь путь является преодолимым и его обязательно нужно пройти до конца» [226, с. 459].

Очень ясно, хотя и кратко, основной смысл рассмотренной работы изложен в письме Эйнштейна к Бессо от 5 января 1924 г.¹¹: «Идея, над которой я бьюсь, касается понимания сущности квантов, ее смысл: переопределение законов дифференциальными уравнениями, число которых превышает число переменных поля. Этим достигается понимание отсутствия произвольности начальных условий без отказа от теории поля. Конечно, этот путь может оказаться совершенно ошибочным, но он логически возможен, а поэтому должен быть испытан. От уравнения движения материальных точек (электронов) полностью отказываемся; механическое поведение последних определяется законами поля» [227, с. 5].

Несколько слов о дальнейшей судьбе концепции переопределения дифференциальных уравнений поля. Она выдержала проверку временем и оказалась ключевой при решении проблемы вывода уравнений движения материи из уравнений поля. Еще в 1927 г. Эйнштейн продолжал думать, что переопределенные уравнения поля содержат не только закон движения особенностей (это ему удалось показать в двух работах 1927 г., причем первая статья была написана вместе с Громмером [228]), но и квантовые свойства движения частиц. «Достигнутый успех, — писали Эйнштейн и Гром-

¹⁰ В вводной «Общей части» статьи он писал: «Если только вообще возможно решить квантовую проблему с помощью дифференциальных уравнений, то можно надеяться прийти к цели этим путем (т. е. с помощью идеи переопределенной системы уравнений.— В. В.). Ниже я изложу свои попытки в этом направлении, не утверждая, что установленные мною уравнения действительно имеют физический смысл» [225, с. 459].

¹¹ К сожалению, в русском переводе даты этого и нескольких последующих писем указаны ошибочно. Вместо 5 января 1924 г. письмо датировано 5 ноября 1924 г., а датировка писем № 67 и № 68 (в нумерации русского перевода) сдвинута на год вперед (вместо 1924 г. указан 1925 г.). [227, с. 5—7].

мер,— заключается ... в том, что впервые показано, что теория поля может содержать в себе теорию механического движения частиц вещества. Это может иметь значение для теории материи, например для квантовой теории» [228, с. 210].

Во второй статье 1927 г. говорилось: «Большинство физиков сейчас убеждены, что существование квантов исключает теорию поля в обычном смысле. Однако это убеждение основано на недостаточном знании следствий теории поля. Поэтому дальнейшее исследование выводов теории поля относительно движения особенностей кажется мне оправданным, несмотря на преимущество количественных результатов, полученных квантовой механикой» [229, с. 211]. Но исследования проблемы уравнений движения не обнаружили никакой связи с квантовой теорией. Эйнштейн в конце этой статьи признавал, что проведенное «исследование... не дает ничего для понимания квантовых явлений» [229, с. 222].

В середине 30-х годов он вновь вернулся к идее исключения сингулярностей из теории, полагая, что принцип исключения особенностей окажется связанным с правилами квантования [230, с. 433]. В классической статье 1938 г., написанной совместно с Л. Инфельдом и Б. Гоффманом и содержащей достаточно общее решение проблемы вывода уравнений движения из уравнений поля, идея этого вывода явным образом опиралась на концепцию переопределения: «Гравитационные уравнения нелинейны и вследствие необходимой свободы в выборе координатной системы таковы, что между ними существует четыре дифференциальных соотношения, так что они образуют переопределенную систему уравнений. Переопределение ответственно за существование уравнений движения...» [231, с. 451]. На этот раз о получении квантовых свойств частиц ничего не говорилось.

В начале 50-х годов в Приложении 2 к третьему изданию принстонских лекций «Сущность теории относительности» Эйнштейн также говорил о фундаментальном значении концепции переопределения. Заметив, что в ОТО имеется десять полевых уравнений для шести g_{ik} , Эйнштейн подчеркнул: «Система уравнений действительно „переопределена“, но благодаря существованию тождеств (имеются в виду тождества Бьянки.— В. В.) переопределение не приводит к петере совместности... Уравнения гравитационного поля включают в себя закон движения для масс, и это обстоятельство теснейшим образом связано с указанной (допустимой) переопределенностью» [232, с. 729].

В заключение отметим, что переопределенность полевых уравнений, связанная с общей ковариантностью, была фактически использована уже в единой теории поля Гильберта. Уравнения Максвелла получались в итоге как следствие уравнений гравитационного поля. В статье 1923 г. Эйнштейн искал более радикальный способ переопределения, который позволил бы наряду с уравнениями движения получать и квантовые закономерности. Хотя это направление и не оказалось бесплодным, оно не привело, как мы видим, к решающему успеху в разработке недуалистической единой теории

поля, способной охватить квантовые явления. Правда, концепция переопределенности в течение ряда лет поддерживала Эйнштейна в его усилиях решить квантовую проблему на основе программы ЕГТП. Реальный же прогресс на этом пути был достигнут в связи с разработкой проблемы вывода закона движения материи из уравнений гравитационного поля.

АФФИННО-МЕТРИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ, 1925—1926 гг.

В квантовой теории назревали большие события, связанные с открытием квантовой механики. Классическая статья Гейзенберга, открывшая новую эпоху физики, была закончена им 29 июля 1925 г. [233]. Эйнштейн участвовал в этом деле не только своими более ранними работами [234, 235]. 8 января 1925 г. на заседании физико-математической секции Прусской академии наук была представлена его работа «Квантовая теория одноатомного идеального газа. Второе сообщение» [236], сыгравшая важную роль в исследованиях Шредингера по волновой механике. Имея в виду именно эту работу Эйнштейна, Шредингер в ответ на его письмо от 16 апреля, в котором Эйнштейн высоко оценивал работу Шредингера, писал ему 23 апреля: «Ваше и Планка одобрение больше значат для меня, чем одобрение полсвета. Впрочем, все это дело не возникло бы ни теперь, ни когда-либо позже (я имею в виду свое участие), если бы Вы в Вашей второй статье о квантовой теории газов не щелкнули меня по носу, указав на важность идей де Бройля» [237, с. 331]. В начале 1925 г. Эйнштейн написал еще две работы по квантовой теории, связанные со статистикой Бозе — Эйнштейна.

В течение 1925 г. (и раньше) он неоднократно бывал в Киле, где вместе с Г. Аншютцем работал над гирокомпасом [218]. Но не эта работа и даже не фундаментальные работы по квантовой теории, упомянутые выше, были для Эйнштейна главными. Его по-прежнему мучили проблемы единой теории поля. В связи с переводом книги Эддингтона «Математическая теория относительности» на немецкий язык автор и Р. Курант предложили Эйнштейну написать специальное приложение к немецкому изданию, посвященное применению принципа Гамильтона к аффинной единой теории поля, основы которой были заложены Эддингтоном. Эйнштейн написал такое приложение «Теория Эддингтона и принцип Гамильтона», содержащее, впрочем, только более четкое и последовательное изложение его аффинной теории 1923 г. [238]. Этому приложению предшествовало (уже во 2-м английском издании 1924 г.) «примечание автора», фактически дополнительный § 104, называвшийся «Новая теория Эйнштейна» и также содержавший рассмотрение эйнштейновской аффинной теории 1923 г. [239]. Интересно, что Эйнштейн называл ее теорией Эддингтона, а Эддингтон — теорией Эйнштейна.

Как мы отмечали, Эйнштейн в своей аффинной теории 1923 г., в сущности, пришел к уравнениям поля, характерным для теории Вейля (в ее втором варианте), о чем он писал в цитированном выше письме к Вейлю. («Я хотел удалиться от Вас и пришел... к таким же уравнениям, как Вы с Вашим специальным принципом действия».) Эддингтон также подчеркивает отмеченное родство: «Это развитие можно рассматривать как вариант... теории действия Вейля» [239, с. 448]. Энтузиазм в отношении эйнштейновского обобщения теории Эддингтона как у Эддингтона, так и у Эйнштейна в 1924—1925 гг. был невелик. Оба весьма скептически оценивали его возможность. «Теория Эйнштейна,— писал Эддингтон,— очень формальна... и я не могу освободиться от подозрения, что ее математическое изящество достигнуто, пожалуй, приемами, которые не ведут по прямому пути действительного физического прогресса» [там же].

Эйнштейн же, отметив, что теория в достаточно хорошем приближении приводит к уже известным уравнениям гравитации и электромагнетизма и вместе с тем не приводит к неингулярному решению, которое можно было бы интерпретировать как электрон, а также указав на отсутствие какого-либо опытного подтверждения, вытекающего из точной теории вывода о порождении 4-го тока электромагнитным полем, с сожалением резюмировал: «Полученный результат создает у меня впечатление, что углубление геометрических основ, предпринятое Вейлем и Эддингтоном, не смогло привести к прогрессу физических знаний» [238, с. 166]. Правда, и Эддингтон и Эйнштейн сохраняли надежду на то, что последующая работа в этом направлении еще может привести к успеху¹².

Вернувшись в начале июня из Южной Америки, он писал Бессо (в письме от 5 июня 1925 г.): «Я твердо убежден, что вся цепочка идей Вейля — Эддингтон — Схоутен не ведет ни к чему физически полезному, и пошел теперь по иному следу, физически более обоснованному» [227, с. 9]. Имя Я. Схоутена, выдающегося голландского математика, появилось здесь не случайно. В 1922 г. в «Math. Zeitschr.» появилась его программная статья «О различных видах перенесения» [202], в которой была дана классификация пространств аффинной связности по трем тензорным характеристикам, названным впоследствии В. Ф. Каганом схоутенами, C_{hi}^i , S_{hi}^i и Q_{hi} (см. введение к настоящей главе) [205, с. 504—506]. Обращение в нуль всех трех тензоров дает риманову геометрию; обращение в нуль первых двух схоутенов дает широкий класс пространств с симметричной аффинной связностью (в частности, при $Q_{hi} = Q_{ih}$ получается геометрия Вейля); необращение в нуль схоутена S_{hi}^i

¹² «Поскольку, однако, пути дальнейшего развития столь неясны,— писал Эддингтон,— было бы неразумно совсем оставлять без внимания возможность продвижения вперед на каком-либо новом пути; поэтому мы приведем в дальнейшем результаты Эйнштейна...» [239, с. 448]. Эйнштейн же приведенную выше оценку теории закончил словами: «Можно лишь надеяться, что будущее развитие теории покажет несправедливость этого пессимистического мнения» [238, с. 166].

приводит к наличию кручения. Эйнштейн, вероятно, думал о возможности использования различных скоуэеновских пространств; во всяком случае, эта возможность вполне укладывалась в общую схему аффинного подхода, развитого Эддингтоном и Эйнштейном. Новым, «физически более обоснованным» направлением, о котором писал Эйнштейн, было, по-видимому, аффинно-метрическое направление, основанное на использовании в качестве независимых переменных не только коэффициентов аффинной связности Γ_{ih}^l , но и метрического тензора 2-го ранга g_{ih} , не связанного с Γ_{ih}^l какими-либо соотношениями (в отличие от символов Кристоффеля римановой геометрии).

Прежде чем перейти к рассмотрению аффинно-метрического подхода, отметим одно загадочное место в цитированном письме: «Мне кажется, что квантовая проблема требует введения чего-то вроде особого скаляра, и я теперь нашел для этого приемлемый путь» [227, с. 9]. Концепция переопределенности полевых уравнений, которая, как казалось Эйнштейну, открывала путь для получения частицеподобных решений, вывода уравнений движения частиц и описания их квантовых свойств, и в 1925 г. не привела к успеху. Нам кажется, что в цитированной фразе можно увидеть предвосхищение шредингеровской волновой функции, связанное не столько с идеями геометризации, сколько с идеями де Бройля. Вспомним, что в упомянутой второй статье по квантовой теории одноатомного идеального газа, опубликованной в феврале 1925 г., Эйнштейн писал: «Каким образом материальной частице можно сопоставить (скалярное) волновое поле — показал Л. де Бройль в своей работе, заслуживающей всякого внимания и т. д.» [236, с. 496].

Аффинно-метрическая теория Эйнштейна была изложена в академической работе, доложенной на общем заседании Прусской академии наук в Берлине 9 июля 1925 г. Забрав чистое аффинное направление, Эйнштейн выразил весьма твердую убежденность в перспективности нового направления: «Теперь я думаю, что после двухлетних непрерывных поисков нам удалось получить истинное решение, которое и излагается ниже» [240, с. 171].

Наряду с несимметричной аффинной связностью $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$ (64 переменных) Эйнштейн в качестве независимых переменных вводит 16 компонент контравариантной тензорной плотности 2-го ранга (или соответствующего тензора 2-го ранга $g^{\mu\nu}$). Основной инвариантной характеристикой континуума являются тензоры кривизны 2-го и 4-го ранга. В качестве лагранжиана теории Эйнштейн выбирает скалярную плотность

$$\sqrt{-g}H = \sqrt{-g}g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}. \quad (19)$$

Тогда варьирование соответствующего действия по $g^{\mu\nu}$ и $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$ даст 16 уравнений

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad (20)$$

и 64 уравнения (последние — при варьировании по $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$)

$$\frac{\partial(\sqrt{-gg^{\mu\nu}})}{\partial x_\alpha} + \sqrt{-gg^{\beta\nu}}\Gamma_{\beta\alpha}^\mu + \sqrt{-gg^{\mu\beta}}\Gamma_{\alpha\beta}^\nu - \delta_\alpha^\nu\left(\frac{\partial(\sqrt{-gg^{\mu\beta}})}{\partial x_\beta}\right) + \sqrt{-gg^{\sigma\beta}}\Gamma_{\sigma\beta}^\mu - \sqrt{-gg^{\mu\nu}}\Gamma_{\alpha\beta}^\beta = 0. \quad (21)$$

Кстати говоря, как справедливо было отмечено в статье М. Феррариса, М. Франкавиллы и К. Рейны [241], именно в этом месте впервые был применен вариационный принцип в форме Палатини, как раз и связанный с независимым варьированием по $g^{\mu\nu}$ и $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$. «Метод Палатини» широко используется в современных вариационных формулировках ОТО, хотя сам А. Палатини, используя вариации символов Кристоффеля, не выходил в своей работе 1919 г. за рамки метрического подхода [242]. Таким образом, рассматриваемая работа Эйнштейна оказалась важным шагом вперед в развитии вариационных формулировок ОТО.

Упрощение системы (21) приводит к уравнениям

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sqrt{-gg^{\nu\alpha}})}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial(\sqrt{-gg^{\alpha\nu}})}{g x_\alpha} = 0, \\ -\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha} + g_{\sigma\nu}\Gamma_{\mu\alpha}^\sigma + g_{\mu\sigma}\Gamma_{\alpha\nu}^\sigma + g_{\mu\nu}\Phi_\alpha + g_{\mu\alpha}\Phi_\nu = 0, \end{cases} \quad (22)$$

где Φ_μ — некоторый ковариантный вектор. Полной системой полевых уравнений, согласующихся с уже известными законами гравитации и электромагнетизма при отождествлении симметричной части $g_{\mu\nu}$ с метрическим тензором, а антисимметричной части $g_{\mu\nu}$ с тензором электромагнитного поля, является, таким образом, система уравнений (20) и (22), дополненная условием тождественного обращения в нуль вектора Φ . При этом получается переопределенная система: 16 + 64 + 4 алгебраически независимых уравнения для 16 + 64 переменных $g_{\mu\nu}$ и $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$. Эта переопределенность, по мнению Эйнштейна, давала надежду на вывод в рамках теории уравнений движения частиц из уравнений поля и на описание их квантовых свойств. Вместе с тем оставалась еще и другая возможность, связанная с отказом от тождественного обращения в нуль вектора Φ и вполне совместимая с требованиями принципа Гамильтона.

Ограничение симметричными $g_{\mu\nu}$ приводит к симметрии $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ и их представлению в виде символов Кристоффеля, что в сочетании с уравнениями (20) дает ОТО. При этом обращение Φ в нуль оказывается неизбежным. В случае произвольного (несимметричного) тензора $g_{\mu\nu}$ анализ в общем случае оказывается слишком сложным, и, чтобы показать, что система (20) и (22) содержит уравнения электродинамики, Эйнштейн ограничивается первым приближением:

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} + \Phi_{\mu\nu}, \quad (23)$$

где $\gamma_{\mu\nu}$ и $\Phi_{\mu\nu}$ — соответственно симметричный и антисимметричный

бесконечно малые тензоры 1-го порядка. Кроме того, накладывает-ся условие $\varphi_\tau = 0$.

Как и в предшествующих попытках построения единых теорий поля, главным критерием эффективности теории Эйнштейн считал наличие в ней несингулярных центрально-симметричных решений, которые можно было бы истолковать как заряженные элементарные частицы. В конце статьи он сообщал, что вместе с Громмером начал работать над этой проблемой. В письме от 28 июля к Бессо Эйнштейн следующим образом описывает свою новую теорию: «С удовольствием хотел устно представить тебе снесенное мною недавно яйцо, но теперь делаю это письменно. Мы вводим независимо друг от друга аффинную связь ($\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$) и тензор ($g_{\mu\nu}$) (соответственно g^{uv} , g^{uv}) и требуем для произвольной (независимой) вариации g^{uv} и $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ осуществления вариационного принципа

$$\delta \left(\int g^{uv} R_{uv} d\tau \right) = 0 \dots$$

Если допустить, что g^{uv} и $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ симметричны, получаем старый закон гравитации для пустого пространства. Если же отказаться от допущения симметрии, то в первом приближении получаем законы гравитации и максвелловские законы поля для пустого пространства, причем антисимметричная часть g^{uv} представляет электромагнитное поле. Это замечательная возможность, которая может соответствовать реальности. Теперь вопрос в том, совместима ли такая теория поля с существованием атомов и квантов. Не сомневаюсь в ее правильности для макроскопического мира. Если бы расчет конкретных задач был проще! Но все это пока предварительно» [227, с. 12].

Мы уже не раз подчеркивали, что на самом деле непроходимой грани между теоретиками, работавшими в русле квантово-теоретической программы и программы ЕГТП, не было. Эйнштейн в это время живо интересовался квантовой теорией, активно участвуя в ее разработке (упомянем, например, его статьи 1924—1925 гг. по квантовой теории одноатомного идеального газа). Э. Шредингер, де Бройль, О. Клейн, В. А. Фок и другие ведущие «квантовики» пытались связать единые геометризованные теории с квантовой теорией (правда, новая волна таких попыток возникла уже после появления квантовой механики). В этом отношении весьма показательны следующий отрывок из письма Борна к Эйнштейну от 15 июля 1925 г.: «Твое сообщение о наконец-то удавшемся объединении гравитации и электромагнетизма меня очень воодушевило; указанный принцип выглядит очень простым. Иордан и я хотим его „протравить“, как только появится время, но мы умоляем тебя как можно скорее выслать нам свою статью. Все это намного глубже, чем наши небольшие работы. На такое я никогда бы не решился» [89, с. 49—50]. Кстати говоря, в этом же письме Борн обстоятельно рассказывает о состоянии дел в квантовой теории, в частности сообщает о новой работе Гейзенберга, положившей начало квантовой механике в ее матричном варианте (только

через две недели после этого письма Гейзенберг послал ее в редакцию журнала «Zeitschr. f. Phys.»). Вспоминая те далекие годы, Борн в комментарии к этому письму писал: «Я думаю, что мой восторг по поводу эйнштейновской теории был вполне искренним. Мы все считали тогда, что поставленная им цель достижима и очень важна» [89, с. 53]. Таких же взглядов, судя по переписке с Эйнштейном, придерживался и Зоммерфельд, по крайней мере в середине 20-х годов.

Уже в 1923 г., обсуждая свою аффинную теорию поля, Эйнштейн, как мы указывали, пришел к выводу о том, что «теория не может... учесть различие в массах положительных и отрицательных электронов», т. е. что она зарядово-симметрична. Это обстоятельство рассматривалось им как существенная трудность теории, поскольку она, таким образом, не отражала существующую в природе зарядовую асимметрию. Это обстоятельство раньше обсуждалось Вейлем и особенно Паули, который еще в 1919 г. подчеркнул, что требуемая опытом зарядовая асимметрия противоречит общей ковариантности уравнений поля. Общая ковариантность включает в себя и инверсию времени, при которой в статическом случае решение (φ, g_{ik}) переходит в решение $(-\varphi, g_{ik})$, что и означает зарядовую симметрию.

В конце статьи об аффинно-метрической теории поля Эйнштейн делает любопытное замечание о том, что требование инвариантности теории относительно инверсии (отражения) времени ($t' = -t$) позволяет, в противоположность общепринятому отождествлению компонент $\varphi_{11}, \varphi_{23}, \varphi_{31}$ тензора электромагнитного поля с напряженностью электрического поля, приписать этим величинам смысл напряженности магнитного поля, а компоненты $\varphi_{23}, \varphi_{31}, \varphi_{12}$ связать с компонентами электрического поля. Размышляя таким образом над вопросами дискретных пространственно-временных симметрий теории и над проблемой включения в рамки аффинно-метрической теории наблюдаемой в природе зарядовой асимметрии, Эйнштейн в следующей своей работе 1925 г. [243] обобщил результат Паули и пришел к фундаментальному выводу, который в настоящее время расценивается как теоретическое предсказание зарядовой симметрии материи, т. е. предсказание существования античастиц [244, 245].

Важно при этом, что Эйнштейн провел свое доказательство не в рамках какого-либо конкретного варианта единой теории поля, а в условиях самой общей ситуации, справедливой в схеме любой общековариантной теории поля, в которой электромагнитное поле описывается антисимметричным тензором 2-го ранга. В этих условиях, согласно Эйнштейну, не существует таких ковариантных уравнений поля, которые «1) имеют решение, соответствующее отрицательному электрону, 2) не имеют ни одного решения, которое соответствует положительному электрону равной массы» [243, с. 167].

Доказательство не сложное и по своей идее близко к приведенному выше рассуждению Паули, но отличается от него использованием тензора напряженностей электромагнитного поля в качестве

характеристики последнего, а не потенциал. Поэтому результат Эйнштейна согласуется с требованием калибровочной инвариантности. Кроме того, Эйнштейн специально доказывает неизменность массы частицеподобного решения при пространственных или временных отражениях, которые он использует для своего доказательства. Предположив существование решения, соответствующего электрону с зарядом e и массой μ и характеризуемого метрическим ($g_{\mu\nu}$) и электромагнитным ($f_{\mu\nu}$) тензорами, он, опираясь на условия общей ковариантности теории, рассмотрел решение, которое можно получить операцией временного отражения. В силу статического и центрально-симметричного характера решения все временные и недиагональные компоненты $g_{\mu\nu}$ оказываются равными нулю, а пространственные компоненты g_{ik} ($i = k$) остаются без изменения. Временные компоненты f_{ik} , отождествляемые с электрическим полем, меняют знак на противоположный ($f'_{14} = -f_{14}$, $f'_{24} = -f_{24}$, $f'_{34} = -f_{34}$), а компоненты магнитного поля оказываются равными нулю. Изменение знака у электрического поля приводит вследствие уравнений Максвелла к изменению знака заряда, в то время как гравитационное поле и масса остаются неизменными.

Естественно, что полученный результат рассматривался Эйнштейном как существенная трудность на пути развития единых теорий поля. «Наши поиски выхода из этой трудности,— писал он, заканчивая доказательство зарядовой симметрии,— были безуспешными...» [243, с. 168]. Если, следуя предыдущей работе, отождествить с электрическим полем не (f_{14}, f_{24}, f_{34}) , а (f_{23}, f_{31}, f_{12}) , а первую тройку — с магнитным полем, то к зарядовой симметрии, как показывает Эйнштейн, приводит рассмотрение не временного, а пространственного отражения.

В «Добавлении при корректуре» к этой статье Эйнштейн сделал несколько любопытных замечаний, связанных с попыткой более глубокого понимания зарядовой симметрии единых теорий, которую он считал их существенной трудностью. Он заметил, что поскольку плотность заряда определяется как корень квадратный из квадрата плотности тока

$$\rho = \sqrt{g_{\mu\nu} i^\mu i^\nu}, \quad i^\mu = \partial f^{\mu\nu} / \partial x_\nu, \quad (24)$$

то знак заряда в теории не определен. Решение проблемы могло бы заключаться в разрушении симметрии теории относительно инверсии времени. «Нам представляется существенным,— заключал указанное корректурное дополнение Эйнштейн,— знание того, что объяснение неравнозначности обоих видов электричества возможно лишь тогда, когда времени приписано направление течения...» [243, с. 170].

На важный результат Эйнштейна (доказательство зарядовой симметрии всякой общековариантной теории поля, содержащей электродинамику, и предсказание античастиц) не обратили внимания и не вспомнили о нем даже после аналогичного результата, полученного Дираком в 1930 г. в рамках релятивистской квантовой

механики. Основная причина недооценки работы Эйнштейна состоит, по-видимому, в том, что полученный результат сам Эйнштейн рассматривал как серьезное препятствие на пути программы ЕГТП. В дальнейшем, как мы увидим, Эйнштейн искал способы нарушения установленной им симметрии. Впоследствии, однако, эйнштейновская работа 1925 г. «Электрон и общая теория относительности» была оценена как теоретическое предсказание зарядовой симметрии любых полевых теорий и тем самым существования античастиц [244, 245]¹³.

Аффинно-метрическая теория, так же как и прежние единые теории, столкнулась прежде всего с трудностью, которую Эйнштейн, по-видимому, считал основной. Имеется в виду отсутствие в теории несингулярных центрально-симметричных статических решений, интерпретируемых как заряженные элементарные частицы. Кроме того, он пришел к твердому убеждению, что эта теория (и, по всей вероятности, все единые полевые теории такого рода) не способна объяснить наблюдаемую в природе зарядовую асимметрию элементарных частиц. Вывод из доказанной им теоремы о зарядовой симметрии был весьма пессимистическим: «Поэтому все попытки слить воедино электродинамику с законами гравитации представляются нам недостаточно обоснованными» [243, с. 170]. Не удалось выйти и к экспериментальным следствиям, выходящим за рамки ОТО и классической электродинамики. Письмо Эйнштейна к Бессо от 25 декабря 1925 г. подводит негативный итог периоду разработки аффинных и аффинно-метрических теорий поля: «От своей работы в духе Эддингтона я вынужден был отказаться. Вообще я теперь убежден, что с комплексом идей Вейля — Эддингтона, к сожалению, ничего нельзя сделать» [227, с. 15].

Из этого же письма видно, что в конце 1925 г. — начале 1926 г. (и, по-видимому, в течение почти всего 1926 г.) Эйнштейн, разочаровавшись в аффинном и аффинно-метрическом направлениях, вернулся к более реалистической теории 1919 г. с полевыми уравнениями

$$R_{ik} - \frac{1}{4}Rg_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (25)$$

где T_{ik} — тензор энергии-импульса электромагнитного поля¹⁴. О возврате Эйнштейна к уравнениям (25) свидетельствует и статья «О формальном отношении римановского тензора кривизны к уравнениям гравитационного поля», законченная им в начале января 1926 г. [246]. Здесь он вновь обосновывает уравнения (25), опираясь на космологические соображения, связанные с необходимостью

¹³ См. также комментарий к статье [243, с. 170].

¹⁴ В цитированном выше письме к Бессо Эйнштейн писал: «Считаю уравнение

$$R_{ik} - \frac{1}{4}g_{ik}R = -T_{ik}$$

(электромагнитно) почти лучшим из имеющегося в электромагнетизме. Имей 9 уравнений для 14 величин $g_{\mu\nu}$ и $\gamma_{\mu\nu}$. Из новых расчетов, кажется, следует, что эти уравнения дают движение электрона. Но сомнительно, найдется ли здесь место для квантов» [227, с. 15].

введения космологического члена (требование конечности пространственно-подобных сечений мира, вызванное желанием приписать миру конечную среднюю плотность вещества). Однако надежда на получение электронов и уравнений их движения из полевых уравнений (25) и на этот раз не оправдалась: «К сожалению, последние исследования показали, что этим способом нельзя прийти к удовлетворительной теории электронов» [246, с. 184]. Магистральный путь программы ЕГТП, как казалось Эйнштейну, зашел в это время в тупик: «Все наши стремления были направлены к тому, чтобы, следуя по предложенному Вейлем и Эддингтоном или аналогичному пути, прийти к теории, объединяющей гравитационное и электромагнитное поля в одну формальную схему; однако вследствие многочисленных неудач мы пришли к убеждению, что на этом пути нельзя продвинуться к истине» [там же]. Теория с полевыми уравнениями (25) тоже пока не приводила к реальному физическому прогрессу, но казалась менее спекулятивной и связанной с глубокими космологическими соображениями¹⁵.

В этой статье Эйнштейн пытался продемонстрировать математическую естественность и наглядность уравнений (25), показав, в частности, что обращение в нуль некоторым образом определенной антисимметричной части $A_{ik,lm}$ тензора Римана — Кристоффеля $R_{ik,lm}$ эквивалентно обращению в нуль левой части этих уравнений. Он также добавил к тензору Римана — Кристоффеля соответствующий электромагнитный аналог $E_{ik,lm}$:

$$R_{ik,lm}^* = R_{ik,lm} + \kappa E_{ik,lm} \quad (26)$$

— и показал, что обращение в нуль $A_{ik,lm}^*$ эквивалентно системе уравнений без правой части

$$R_{im}^* - \frac{1}{2} g_{im} R^* = 0. \quad (27)$$

Возможно, именно в этих внешне простых уравнениях поля, объединяющих в себе гравитацию и электромагнетизм, Эйнштейн в начале 1926 г. видел возможный путь к решению проблемы. Но уже в середине 1926 г. он разочаровался в « $\frac{1}{2}$ -теории» (т. е. теории с уравнениями (25)).

«Установленное мною уравнение

$$R_{ik} = g_{ik} f_{\alpha\beta} f^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} f_{i\alpha} f_{k\beta} g^{\alpha\beta},$$

— писал он Бессо 11 августа 1926 г., — также меня мало удовлетворяет. Оно не допускает никаких электрических масс, свободных от сингулярностей. Кроме того, я не могу решиться связать две вещи (подобные правой и левой частям уравнения), которые логикоматематически не имеют ничего общего» [227, с. 22]. М.-А. Тонпела в этом месте делает следующее примечание: «Эйнштейн сразу

¹⁵ Любопытно отметить, что даже в 1926 г., несмотря на признание результатов А. А. Фридмана, Эйнштейн, как это видно из цитированной статьи, не отказался полностью от своих первоначальных взглядов на строение Вселенной (статическая замкнутая модель конечного в пространстве мира).

увидел слабость „наивной“ теории, которая кажется склеенной из одного геометрического слагаемого и второго, справедливость которого черпается только из теории Максвелла» [там же]. Кроме того, она исправляет опisku, допущенную Эйнштейном ($(1/2g_{\alpha\beta}f^{\alpha\beta} - f_{\alpha\beta}f^{\alpha\beta}g^{\alpha\beta})$) вместо правой части написанного уравнения), и отмечает его эквивалентность с уравнением (25). Таким образом, в рамках «1/4-теории», которую Тоннела называет «наивной», так и не удалось, уже вторично, найти несингулярные частицеподобные решения. Другой недостаток — отсутствие единой геометрической основы для гравитационного и электромагнитного полей.

Еще более пессимистическую оценку своих усилий в области единых теорий Эйнштейн дает в письме к Зоммерфельду от 21 августа. Зоммерфельд приглашал его выступить в Мюнхене с лекциями. Эйнштейн отказался и мотивировал свой отказ так: «Говорить правду иногда очень тяжело, но нужно: мне не о чем говорить, что было бы достаточно значительным для лекций, о которых идет речь. Поэтому я должен молчать и дать говорить тем, кто может говорить о чем-то, чего другие не знают. Я долго мучился, пытаюсь выявить связь между гравитацией и электромагнетизмом, но теперь уверен, что все сделанное до сих пор в этом направлении напрасно» [68, с. 236].

Особенно резким контрастом на фоне неудач программы ЕГТП, и прежде всего усилий самого Эйнштейна, выглядел теоретический прорыв в области квантовой физики. Даже по переписке лидера программы ЕГТП Эйнштейна с Зоммерфельдом, Борном, Шредингером, Бессо можно судить о стремительности и глубине этого прорыва. «Самое интересное теоретическое достижение последнего времени, — сообщает Эйнштейн Бессо в письме от 25 декабря 1925 г., — это теория квантовых состояний Гейзенберга — Борна — Иордана. Настоящее колдовское исчисление, в котором вместо декартовых координат появляются бесконечные определители (матрицы)» [227, с. 15]. Но с самого начала чувствуется настороженное, скептическое отношение Эйнштейна к новому теоретизму. В упомянутом письме к Бессо он так характеризует это «колдовское исчисление»: «В высшей степени остроумно и благодаря своей сложности застраховано от доказательства ошибочности». Волновая механика Шредингера, континуалистская по своему замыслу, вызывает у него значительно большую симпатию. В начале мая 1926 г. он пишет Бессо: «Шредингер сделал две замечательные работы о правилах квантования (Ann. d. Phys., 1926, vol. 79). Раскрывается глубокая истина» [227, с. 19]¹⁶.

¹⁶ С работами Шредингера Эйнштейна познакомил Планк. Эйнштейн был восхищен волновой механикой. В письме к Шредингеру от 16 апреля 1926 г. он заметил: «Замысел Вашей работы свидетельствует о подлинной гениальности» [237, с. 330]. Однако Эйнштейну вначале показалось, что уравнение Шредингера вступает в противоречие с условием аддитивности квантовых состояний независимых систем. Через неделю он признал ошибочность этого своего вывода, а в письме от 26 апреля отдал предпочтение шредингеровскому подходу перед матричным вариантом квантовой механики: «Я убежден,

В августе 1926 г., когда уже была установлена эквивалентность волнового и матричного формализмов квантовой механики, Эйнштейн следующим образом оценивал оба эти подхода (в письме к Зоммерфельду от 21 августа): «Из новых попыток получить более глубокую формулировку квантовых законов мне больше всего нравится принадлежащая Шредингеру. Если бы только удалось пересадить введенные там волновые поля из n -мерного координатного пространства в трех- и соответственно четырехмерные! Теория Гейзенберга — Дирака заставляют меня восхищаться, но для меня они не пахнут реальностью» [68, с. 236]. «Материальные», или «скалярные», поля Шредингера, описываемые волновыми функциями, как это вскоре понял Эйнштейн, не были классическими полями, описываемыми непрерывными функциями в реальном трехмерном или четырехмерном пространстве. С этой точки зрения и теория Шредингера не отвечала установкам полевой программы, несмотря на ее значительно большую близость к ним по сравнению с матрично-операторной формой квантовой механики. Эйнштейн, вероятно, думал о возможности «пересадки» волновых полей Шредингера в физическое пространство (или пространство-время, но это не удалось, и в конце 1926 г. энтузиазм в отношении волновой механики Шредингера значительно снизился. «Выводы из теории Шредингера, — писал Эйнштейн Зоммерфельду 28 ноября 1926 г., — производят большое впечатление, но все-таки я не знаю, идет ли речь о чем-то большем, чем о старых квантовых правилах, т. е. о чем-то соответствующем какой-либо стороне истинно происходящего. Действительно ли мы приблизились к разгадке тайны?» [68, с. 237].

Вероятностная трактовка волновой функции еще больше разочаровала Эйнштейна. «Квантовая механика — писал он Борну в письме от 4 декабря 1926 г., — заслуживает всяческого уважения, но внутренний голос подсказывает мне, что это не настоящий Иаков. Теория дает много, но к таинствам Старого (т. е. бога. — *Примеч. пер.*) она не подводит нас ближе. Во всяком случае, я убежден, что он играет в кости. Волны в пространстве $3n$ измерений, скорость которых регулируется потенциальной энергией?...» [247, с. 7]¹⁷.

Мы уже отмечали, что решающие успехи квантовой теории в 1925—1926 гг. совпали по времени с некоторым кризисом программы ЕГТП (см., например, цитированное выше признание самого Эйнштейна в письме к Зоммерфельду от 21 августа 1926 г.). Ни чисто аффинные теории, ни аффинно-метрическое направление, еще недавно казавшиеся Эйнштейну столь перспективными, ни концепция переопределения, ни « $1/4$ -теория» не дали реально ощутимых

что Вашей формулировкой условий квантования Вы добились решающего успеха. Я также убежден, что путь, избранный Гейзенбергом и Борном, уходит в сторону» [237, с. 332].

¹⁷ В конечном счете эти сомнения в истинности квантовой механики привели Эйнштейна к ее оценке, как «неполной теории» (неполнота, согласно Эйнштейну, — это такое обстоятельство, которое при описании с помощью ψ -функции не выражает свойств индивидуальной системы, хотя в „реальности“ ее мы все вместе не сомневаемся...» [247, с. 62]). Современное обсуждение этой проблемы в философско-методологическом аспекте содержится в книге [248].

физических результатов. Особенно умозрительными и бесплодными выглядели они на фоне успехов квантовой механики, которая быстро прогрессировала, несмотря на значительные трудности принципиального, теоретического характера.

Интересный эпизод, относящийся к этому времени, вспоминает А. Ф. Иоффе, который вместе с Эйнштейном ехал в поезде на заседание Сольвеевского комитета в Амстердаме в 1926 г. Иоффе уже тогда считал направление ЕГТП бесперспективным. «Новые гипотезы, их анализ, выявление их неубедительности,—вспоминал он впоследствии,—и все новые и новые попытки — это наполняло научную жизнь (Эйнштейна.— В. В.), но не приносило ожидаемых плодов. Во время наших прогулок, особенно ночных, вопрос о единой теории поля как о маниакальном увлечении, из которого не было выхода, часто поднимался самим Эйнштейном, но разговор всегда сводился к изложению последней из его гипотез, от которой он ждал удачи, после чего мог бы вернуться в сферу физики (т. е. сферу физики, не связанную с разработкой единых теорий поля.— В. В.). Гипотеза проваливалась, а через год-два появлялась новая» [249, с. 226—227].

По дороге в Амстердам А. Ф. Иоффе «попытался сбить его с безвыходного пути» и переключить его интересы в сферу квантовой физики, испытывающей в это время огромные трудности, над которыми билось множество физиков: «Обрисовав глубокие противоречия явлений в микромире и разброд мыслей физиков, я высказал убеждение, что Эйнштейн со своей исключительной физической интуицией скорее, чем кто-нибудь другой, может найти выход». Речь шла, по-видимому, о сложностях физического истолкования квантовой механики. «Нельзя не видеть,—убеждал Иоффе Эйнштейна,— тумана мистики, который обволакивает четкие контуры физики, в науку вливается неверие в свои силы, отказ от реальности самой природы. Выход один — Эйнштейн обязан выполнить свой долг и не имеет права скрываться в пучинах единого поля». По словам Иоффе, Эйнштейн «обещал приложить все свои силы, чтобы перестроиться, но сомневался, что это ему удастся» [249, с. 228].

Действительно, в 1926 г. фактически не было опубликовано ни одной работы Эйнштейна по единым теориям поля и вместе с тем появилось несколько статей, в которых предлагался и обсуждался эксперимент с излучением, испускаемым каналовыми лучами, который, по мнению Эйнштейна, позволил бы сделать более определенный выбор в пользу волновой или корпускулярной концепции света [250—253]. Впоследствии была показана ошибочность эйнштейновского замысла [253]. В конце 1926 г. он сообщал Борну: «Я бьюсь над тем, чтобы вывести уравнения движения материальных точек, понимаемых как сингулярности, из дифференциальных уравнений общей теории относительности» [254, с. 130]¹⁸. Возможно, на этом более реалистическом, хотя и окольном пути — здесь

¹⁸ Имеющийся русский перевод неточен [247, с. 7].

Эйнштейн возвращался на твердую почву ОТО — он надеялся, не отказываясь от полевой геометризованной программы, выйти к механике частиц, и в частности к ее квантовым особенностям.

Возвращаясь к аффинно-метрической теории 1925 г., подчеркнем, что именно этот вариант вновь привлек внимание Эйнштейна и других исследователей (например, Шредингера) в 40-х и 50-х годах. По мнению М.-А. Тоннела, «с помощью гипотез, соответствующих теориям последнего типа (т. е. аффинно-метрического типа.— В. В.), Эйнштейну удалось создать единую теорию, обладающую большой общностью и дающую возможность получить наиболее естественное обобщение теории гравитации» [201, с. 373].

В обзоре единых теорий поля, написанном в 1956 г. для английского издания своей энциклопедической статьи по теории относительности, Паули выделил два класса теорий, заслуживающих рассмотрения: теории аффинно-метрического типа с несимметричными g_{ik} и Γ_{ik}^l и пятимерные теории. Наиболее серьезным возражением против аффинно-метрических теорий он считал их расхождение с «принципом неприводимости»: «Все эти теории сталкиваются с одним возражением — они находят в противоречии с принципом, гласящим, что в теории поля должны входить лишь неприводимые величины» [63, с. 306]¹⁹. Такими неприводимыми величинами являются симметричные и антисимметричные величины (в рассматриваемом случае тензоры и геометрические объекты). Поэтому, согласно Паули и Вейлю, «должны быть приведены убедительные математические причины (например, постулат относительно более широкой группы преобразований), объясняющие, почему не происходит разложения приводимых величин, использованных в теории (например, R_{ik} , g_{ik} и Γ_{ik}^e)» [63, с. 306—307], чего не было сделано достаточно убедительным образом ни в 40—50-е годы, ни тем более в 20—30-е.

Паули, впрочем, замечает в цитированном обзоре, что сам Эйнштейн ясно понимал этот недостаток теорий с несимметричными g_{ik} и Γ_{ik}^l и в последних своих работах 1955 г. сделал попытку дать такое объяснение на основе достаточно формальных требований Λ -инвариантности и транспозиционной симметрии [255, 256]. Пер-

¹⁹ Сравни с более ранним высказыванием Г. Вейля: «Если и можно заимствовать из математики важный урок для построения физических теорий, то это то, что некоторую единую физическую сущность представляют только такие величины, которые неразложимы при свойственных им законах преобразования; такими, например, величинами являются симметричный и антисимметричный тензоры g (т. е. g_{ik} .— В. В.) и f (т. е. тензор электромагнитного поля f_{ik} .— В. В.), а не их объединение. Паули формулирует этот принцип так: то, что разделит бог, не дано объединить человеку» («Wenn man der Mathematik eine für die Aufstellung physikalischen Theorien wichtige Lehre entnehmen kann, so ist es die, dass mir Grössen, die unter ihrem speziellen Transformationsgesetz unzerlegbar sind, eine einheitliche physikalische Entität darstellen; eine solche Grösse ist der symmetrische oder schiefssymmetrische Tensor, g und f , aber nicht ihre Zusammenfassung... Pauli formuliert dieses Prinzip so: Was Gott getrennt hat, soll der Mensch nicht zusammenfügen») [18, с. 431].

вая симметрия связана с инвариантностью теории относительно преобразований

$$\Gamma'_{ik} = \Gamma^i_{ik} + \delta^i_{ik} \lambda_{i,k},$$

где $\lambda(x)$ — произвольная функция. Вторая симметрия означает инвариантность при переходе от величин A_{ik} к соответствующим транспонированным величинам. Физический смысл ее, как думал Эйнштейн, «состоит в инвариантности уравнений поля по отношению к изменению знака электрических зарядов» [255, с. 836]. Однако ни λ -симметрия, накладывающая запрет на применение симметричных Γ^i_{ik} , ни транспозиционная инвариантность, связь которой с зарядовой симметрией весьма проблематична, не имеет, по мнению Паули, физического оправдания.

ПРОБЛЕМА УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ И ПЯТИМЕРИЕ, 1927 г.

Во второй половине 1926 г. и в начале 1927 г. открытия в области квантовой механики сыпались как из рога изобилия: борновская вероятностная интерпретация волновой функции (июль 1926 г.), разработка теории преобразований, позволяющей строго доказать эквивалентность матричной и волновой механик (январь — декабрь 1926 г., Дирак, Иордан и др.), установление связи квантовых статистик с квантовой механикой систем одинаковых частиц (лето и осень 1926 г., Гейзенберг, Дирак, Фаулер и др.), разработка Дираком квантовой теории излучения (январь — февраль 1927 г.) и т. д. Гейзенберг к этому времени уже вплотную подошел к открытию принципа неопределенности (осенью 1926 г. он и Паули обсуждали его предварительные формулировки) [257].

В это же время появляется волна исследований по пятимерным единым теориям поля, но не в противовес квантово-теоретической программе, а, напротив, в связи с установлением глубокого родства уравнения Шредингера (или, точнее, его релятивистского обобщения) со скалярным волновым уравнением в пятимерном пространстве. С апреля — мая 1926 г. (28 апреля поступила в редакцию «Zeitschr. f. Phys.» статья О. Клейна [258]) до весны 1927 г. было опубликовано по этой проблеме не менее двух десятков работ О. Клейна, В. А. Фока, Г. А. Мандела, Т. де Дондера, Л. де Бройля, П. Эренфеста и Г. Уленбека, Г. А. Гамова и Д. Д. Иваненко, Ф. Лондона, В. К. Фредерикса, Н. Винера и Д. Стройка и др.

Позиция же Эйнштейна во второй половине 1926 г., как мы видели, не была достаточно определенной. С одной стороны, он явно испытывал большое разочарование в предпринятых до сих пор усилиях по созданию ЕГП. С другой стороны, Эйнштейн сначала воодушевился волновой вариант квантовой механики, но к концу 1926 г., после доказательства эквивалентности волновой и матричной механик и разработки вероятностной трактовки волновой функ-

дии, эйнштейновский энтузиазм в отношении квантовой механики идет на убыль и его сомнения в ее истинности становятся все более серьезными. В квантовой механике наибольшую неприязнь у него вызывали ее принципиально вероятностный характер и невозможность приписать ψ -функции смысл классического поля, подобного электромагнитному и гравитационному полям. Неискоренимый корпускулярно-волновой дуализм, присущий квантовой механике, — концепция, в создание которой Эйнштейн внес значительный вклад, — казался ему крайне неудовлетворительным с точки зрения программы ЕГТП.

И в конце 1926 г. Эйнштейн возвращается к анализу тех возможностей, которые могла дать эта программа для проблемы частиц и их квантовых свойств. Нелинейность и общая ковариантность полевых уравнений, как ему казалось, потенциально содержат в себе и корпускулярный аспект материи, и квантовые черты поведения частиц. Нужно было только суметь извлечь их. Оба эти свойства были присущи и уравнениям одного лишь гравитационного поля, и это означало, что корпускулярные и квантовые закономерности можно было попытаться получить, не прибегая на первых порах к объединению гравитации и электромагнетизма. Это привело Эйнштейна, которому помогал Я. Громмер, к первым важным работам по проблеме вывода уравнений движения частиц материи из полевых уравнений ОТО.

Решение этой проблемы было дано спустя только 11—12 лет в работах Эйнштейна (с Л. Инфельдом и Б. Гоффманом) и В. А. Фока. Оно оказалось связанным с использованием различных приближенных методов. Впоследствии были предложены более современные схемы приближения, имеющие также более широкую область применимости (для более широкого класса движущихся объектов).

Хотя проблема получения уравнений движения из уравнений поля разрабатывалась Эйнштейном (отчасти совместно с Громмером) в рамках только ОТО, это не означало, что он полностью разочаровался в программе ЕГТП и отказался от дальнейших исследований в этом направлении. Во-первых, он полагал, что результаты, полученные в ОТО, можно будет без труда перенести в единую теорию поля, уравнения которой были пока неизвестны. Во-вторых, успех в решении проблемы движения частиц в ОТО свидетельствовал бы о перспективности и программы ЕГТП. И наконец, как это явствует из первой же работы Эйнштейна и Громмера об уравнениях движения, Эйнштейн вернулся к идее истолкования частиц как сингулярностей поля. Некоторые же из более ранних вариантов ЕГТП, прежде всего пятимерная теория Калуцы, были забракованы, в частности, и потому, что они не содержали несингулярных статических центрально-симметричных решений, подлежащих отождествлению с заряженными частицами. Поэтому аргументы такого рода против ЕГТП как будто утрачивали силу, и, разуверившись в аффинных и аффинно-метрических теориях, родственных теориям Вейля и Эддингтона, Эйнштейн вернулся к пятимерной схеме Калуцы.

Параллельно с исследованиями проблемы движения он в более простой и строгой форме восстанавливает схему Калуцы, хотя как будто и не получает существенно новых результатов (работа о законе движения была доложена на заседании Прусской академии наук 6 января 1927 г. [228], а работа о теории Калуцы — 17 февраля [259], первая часть была представлена еще раньше — 20 января [260]). Обращение к пятимерию в это время, как мы видели, было вполне естественным шагом Эйнштейна. Оно, конечно, могло бы быть вызвано своеобразным возрождением пятимерной теории поля в связи с квантовой механикой. С середины 1926 г. в одном только журнале «*Zeitschr. f. Phys.*» появилось не менее десятка статей по применению пятимерного подхода к квантовой механике. Эйнштейн, по-видимому, не обратил внимания на эти статьи, иначе бы он не преминул упомянуть о новом аспекте пятимерия, обнаруженном О. Клейном и В. А. Фоком и связанном с интерпретацией релятивистского обобщения уравнения Шредингера как скалярного волнового уравнения в пятимерном пространстве. В корректурном дополнении ко второй части своего доклада о теории Калуцы он, впрочем, упомянул, что «Г. Мандель сообщил... (ему.— В. В.), что изложенные здесь результаты не новы и содержатся в работах О. Клейна... Ср. также работу В. А. Фока...» [259, с. 197].

Именно проблема уравнений движения и пятимерие составили основной предмет его размышлений и исследований в 1927 г., когда квантовая механика после выдвигания принципов неопределенности и дополнительности обрела свою законченность. На Сольвеевском конгрессе в октябре 1927 г., который подвел итоги периода создания квантовой механики, началась знаменитая дискуссия между Бором и Эйнштейном по принципиальным проблемам квантовой механики.

Вернемся, однако, к работе Эйнштейна и Громмера «Общая теория относительности и закон движения» (доложена 6 января 1927 г.) [228]. Неудачи Эйнштейна на пути разработки им программы ЕГТП, в частности неудачные попытки интерпретировать во всех вариантах ЕГТП частицы как несингулярные центрально-симметрические статические решения, вернули его к мысли рассматривать частицы как сингулярности поля. При этом уравнения единого поля должны были также содержать в себе и уравнения движения этих сингулярностей. Естественно было считать тогда, что в отсутствие электромагнитных полей нейтральные частицы должны описываться сингулярностями уравнений гравитационного поля, а закон их движения — выводиться из этих уравнений.

Однако к реализации этой идеи Эйнштейн приступил лишь в 1927 г. Сам он объяснил это запоздание следующим образом: «Возможность того, что закон движения особенностей может содержаться в уравнениях поля, мы обдумывали уже много раньше. Однако казался непреодолимым, отпугивал следующий довод. Закон гравитационного поля может быть с большой точностью для реальных случаев аппроксимирован линейным законом. Линейный же закон поля, акалогично электродинамическому, допускает произвольно

движущиеся особенности (т. е. закон движения независим от уравнений поля.— В. В.). Кажется само собой разумеющимся, что от такого приближенного решения методом последовательных приближений можно было бы перейти к очень мало отличающемуся от него строгому решению. Если бы это было так, то могли бы существовать строгие уравнения соответствующего поля при произвольно заданном движении особенностей, т. е. закон движения особенностей не содержался бы в уравнениях поля» [228, с. 201].

Другая причина была названа выше: Эйнштейн был погружен в разработку единых теорий поля и рассматривал частицы не как особенности полевых уравнений, а, наоборот, как неспециальные решения этих уравнений. Во введении Эйнштейн и Громмер сравнивают соотношение уравнений поля и движения в электродинамике и ОТО. Положение дел в электродинамике, а также в классической теории гравитации таково, что там эти уравнения вполне независимы, и это, по мнению авторов, связано с линейностью полевых уравнений. Дуализму поле — частицы соответствует дуализм уравнений, описывающих их движение.

Авторы отмечают попытку Ми преодолеть этот дуализм в его нелинейной электродинамике. Согласно его подходу «вся физическая реальность описывается свободным от сингулярностей полем; последнее описывает не только „пустое пространство“, но также и материальные частицы, и закономерности этой реальности полностью определяются дифференциальными уравнениями в частных производных» [228, с. 199]. Эта же идея, в сущности, была воспринята программой ЕГТП, которую вслед за Вейлем и Эддингтоном разрабатывал и Эйнштейн: «Хотя эта попытка пока оказалась безуспешной, она продолжает оставаться ведущей программой даже вне чисто электродинамической области (Вейль, Эддингтон)» [там же].

В ОТО возможны, по мнению Эйнштейна и Громмера, три подхода к проблеме соотношения уравнений поля и движения. Первый вполне аналогичен тому, который принят в электродинамике и ньютоновской теории: уравнения движения материальной точки, совпадающие с уравнениями геодезической, постулируются независимо от уравнений гравитационного поля (для пустого пространства). Второй подход основан на введении тензора энергии-импульса материи и на предположении, близком к концепции Ми, что соответствующие уравнения гравитационного поля не содержат сингулярностей. Тогда четыре нетеровских тождества (или тождества Бьянки) накладывают дивергентное условие на тензор материи, откуда в предположении, что материя расположена вдоль узких «мировых трубок», следует вывод о совпадении осей этих «трубок» с геодезическими линиями. Это и означает фактически, что уравнения движения являются следствием уравнений поля. Но этот подход, тесно связанный с идеей Ми и программой ЕГТП, не привел к успеху именно потому, что не удалось ни в рамках ОТО, ни на основе различных вариантов ЕГТП получить частицы как неспециальные решения полевых уравнений.

«Подозрение, что это вообще неправильный путь к пониманию частиц материи, — подчеркивают авторы статьи, — после очень многих тщательных попыток стало у нас настолько сильным, что нам не хочется здесь об этом говорить» [228, с. 200]. В этой фразе заключено разочарование и в единых теориях аффинного и аффинно-метрического типа, и в самой идее истолкования частиц как неспециальных решений полевых уравнений.

Третий подход связан с истолкованием частиц как особенностей и с получением уравнений движения этих частиц из полевых уравнений: «Таким образом, мы встаем на путь объяснения элементарных частиц как особых точек или сингулярных мировых линий. Этот путь подсказывается еще и тем, что как уравнения чистого гравитационного поля, так и уравнения, дополненные максвелловским электромагнитным полем... имеют простое центрально-симметричное решение с сингулярностью. Итак, мы пришли к третьему методу рассмотрения, при котором, кроме гравитационного и электромагнитного полей, отсутствуют другие полевые переменные... место которых, однако, занимают особые мировые линии... Оказывается правдоподобным, — продолжали Эйнштейн и Громмер, — что закон движения особенностей полностью определяется уравнениями этого поля и характером особенностей» [228, с. 200]. Последний вывод авторы связывали с нелинейностью полевых уравнений. Некоторое сомнение в справедливости этого вывода могло возникнуть из-за кажущейся возможности аппроксимировать строгое решение нелинейных уравнений приближенным решением линейных. Но анализ аксиально-симметричных статических решений уравнений гравитации, полученных в 1918—1922 гг. Г. Вейлем, Т. Леви-Чивитой и Р. Бахом, показала иллюзорность этой возможности [64]. В указанных работах была доказана невозможность существования на оси симметрии двух (и более) особых точек, что означало отсутствие статических решений с осевой симметрией, соответствующих двум покоящимся точечным массам. Это наводило на мысль о том, что уравнения поля сами исключают такие движения частиц, которые не согласуются с уравнениями поля.

В цитированной работе Эйнштейн и Громмер показывают затем, что в простейшем случае, когда уравнения движения особенности сводятся к уравнению его равновесия в поле тяготения, эти уравнения полностью определяются уравнениями поля. Статья заканчивается замечанием, которое подсказывает еще один сильный стимул для исследований проблемы движения частиц: успехи квантовой теории движения частиц. «Достигнутый успех, — резюмируют авторы, — заключается... в том, что впервые показано, что теория поля может содержать в себе теорию механического движения дискретных частиц вещества. Это может иметь значение для теории материи, например для квантовой теории» [228, с. 210].

В течение всего 1927 г. Эйнштейн продолжал исследование проблемы вывода уравнений движения из уравнений поля. В конце ноября он закончил вторую статью (уже без помощи Громмера) с таким же названием. Она была доложена на заседании Берлин-

ской академии наук 8 декабря 1927 г. [261]. И в этой статье чувствуется резкая оппозиция квантово-геометрической программе. Эйнштейн в условиях быстрого прогресса последней стремится доказать жизнеспособность уже вступившей в фазу устойчивого регресса программы ЕГТП. Его цель — показать, что классическая геометрическая полевая программа в состоянии указать по крайней мере перспективу объяснения дискретных аспектов материи, одним из которых являются уравнения движения элементарных частиц (на первых порах хотя бы классические, а затем, возможно, и квантово-механические). Имея в виду вывод закона движения из полевых уравнений, он замечает: «Этот результат представляет интерес с точки зрения общего вопроса, противоречит ли теория поля постулатам квантовой теории. Большинство физиков сейчас убеждены, что существование квантов исключает теорию поля в обычном смысле. Однако это убеждение основано на недостаточном знании следствий теории поля. Поэтому дальнейшее исследование выводов теории поля относительно движения особенностей кажется мне оправданным, несмотря на преимущество количественных результатов, полученных квантовой механикой» [261, с. 211].

В дальнейшем, пользуясь приближенными методами, Эйнштейн показывает, что уравнения поля содержат закон движения особенностей (при условии, что в первом приближении задан характер особенности). При этом «в случае статической и центрально-симметричной особенности получается закон геодезической, дополненный электромагнитными силами». Конечно, это не означало полного решения проблемы, так как этот результат был получен с точностью до величин 3-го порядка и только для точечных частиц, понимаемых как сингулярности поля. Более полное и строгое решение проблемы было дано в 1937—1939 гг. в работах А. Эйнштейна, Л. Инфельда и Б. Гоффмана (1937—1938 гг.), А. Эддингтона и Дж. Кларка (1938 г.) и В. А. Фока (1938 г.), хотя и сейчас нельзя еще считать проблему исчерпанной. История решения этой проблемы — большая самостоятельная тема, заслуживающая специального исследования²⁰.

²⁰ Нам неизвестны историко-научные исследования проблемы уравнений движения в ОТО и единых теориях поля. Помимо работ по аксиально-симметричным решениям, указанным ранее, и 5-го издания цитированной книги Вейля, Эйнштейн впоследствии упоминал из ранних работ по этой проблеме статьи Дросте и де Ситтера (1916 г.), а из более поздних — статьи 30-х годов Леви-Чивиты (1937), Матисона (1931), свои собственные статьи, написанные совместно с Н. Розеном (1935—1936), Дж. Робертсона (1938) и др. [231, с. 450—451]. Краткое и ясное изложение работы Эйнштейна, Гоффмана и Инфельда содержится в книге П. Бергмана [12]. Состояние проблемы к началу 60-х годов дано, например, в книге Л. Инфельда и Е. Плебаньского [262], а также в написанной Дж. Гольдбергом главе 3 книги «Гравитация: введение в современные исследования», изданной под редакцией Л. Виттена [263]. Работы Фока наиболее обстоятельно описаны им самим в более поздних обзорах [264] и в книге [265]. Современные исследования в этой области обсуждаются в трехтомной монографии Мизнера, Торна и Уилера [270].

Отметим, что в работе трех авторов 1938 г. [231] была подчеркнута истинная природа феномена включенности уравнений движений в законы поля, а именно переопределенность полевых уравнений. Эта же переопределенность была следствием общей ковариантности теории. «Переопределение,— говорилось в этой статье,— ответственно за существование уравнений движения, а нелинейный характер (полевых уравнений.— В. В.) — за существование членов, выражающих взаимодействие движущихся тел» [231, с. 451]. Впрочем, несколько более тонкий анализ вопросов переопределения и его связи с общей ковариантностью и нелинейностью уравнений гравитационного (а также двух последних аспектов между собой) содержится в книге П. Бергмана [12].

В. А. Фок, который, по крайней мере в 30-х годах, не был сторонником программы ЕГТП, подчеркивал, что «общая теория относительности есть прежде всего теория тяготения». «Мы полагаем поэтому, что проблемы общей теории относительности,— продолжал он,— не могут иметь ничего общего с проблемой структуры элементарных частиц... Эйнштейн, говоря об особенных точках решений своих уравнений, имеет в виду в первую очередь элементарные частицы, а не небесные тела» [266, с. 234]. Фок же проблеме движения решает специально для случая конечных масс, подчеркивая тем самым, что в его работе речь идет прежде всего о выводе уравнений движения тел астрономического масштаба. Проблемы же элементарных частиц, с его точки зрения, должны решаться с позиций квантово-теоретической программы, а не ЕГТП-программы... «Неполное и условное признание Эйнштейном квантовой механики,— подчеркивал Фок,— несомненно имеет своей основой не только его научный консерватизм, но и надежду объяснить элементарные частицы как особые точки поля» [266, с. 234]²¹.

Один фрагмент из переписки Эйнштейна еще раз свидетельствует о том, что в 1927 г. он возлагал на решение проблемы уравнений движения особенно большие надежды, стремясь на этом пути укрепить позиции полевой программы в ее противостоянии квантово-теоретической программе. В письме к Вейлю от 26 апреля 1927 г. он писал: «Получив Ваше любезное письмо, я внимательно изучил Ваши доводы относительно закона движения электронов и был прежде всего крайне восхищен их красотой и прозрачностью... Я потому придаю всему делу такое значение, что было бы очень важно выяснить, следует ли считать уравнения поля как таковые опровергнутыми фактом существования квантов или нет. Конечно, вполне естественно склоняться к тому, чтобы поверить в это,

²¹ Фок писал это в 1938 г., когда квантово-теоретическая программа уже явно опередила программу ЕГТП. Этой надежды (т. е. надежды на истолкование элементарных частиц как сингулярностей единого поля.— В. В.),— писал он,— мы ни в коей мере не разделяем, и нам кажется, что колоссальные успехи квантовой механики за последние 10—15 лет при полном неуспехе сделанных за то же время попыток Эйнштейна объяснить элементарные частицы при помощи единой теории поля достаточно выяснили положение в пользу квантовой механики» [266, с. 235].

и большинство уже верит. Но до сегодняшнего дня, как мне кажется, ничего в этом смысле еще не доказано» [57, с. 155].

В статье, посвященной 200-летию со времени смерти Ньютона и опубликованной в 1927 г., Эйнштейн с тревогой писал о том, что идеалы ньютоновской концепции природы, с которой, очевидно, он связывал и геометризованную полевою программу, поставлены под угрозу последними достижениями квантовой механики: «Не без серьезных оснований многие физики утверждают, что перед лицом этих фактов (из области физики теплового излучения, спектров и радиоактивности.— В. В.) оказывается бессильным не только дифференциальный закон, но и закон причинности... Отрицается сама возможность пространственно-временного построения, однозначно соответствующего физическим явлениям». Он признает успехи квантовой теории, но подчеркивает, что «те, кто применяет этот метод, вынуждены отказаться от локализации материальных частиц и от строго каузальных законов» [267, с. 88].

В конце 1927 г. состоялся 5-й Сольвеевский конгресс, зафиксировавший триумф квантовой механики. Эйнштейн выступил по докладу Бора с критическими замечаниями в адрес утвердившейся физической интерпретации квантовой механики, интерпретации, связанной с именами Борна, Гейзенберга и Бора. Рассмотрев мысленный эксперимент с электронами, проходящими через небольшое отверстие и затем падающими на экран он пытался найти брешь в интерпретации Бора — Гейзенберга и доказать неполноту квантовомеханического описания, подрывающего, как ему казалось, принципы полевой программы — непрерывность и классическую причинность, связанные с возможностью однозначного описания физических процессов в пространстве и во времени [268].

Работы Громмера и Эйнштейна по проблеме закона движения в ОТО были значительным достижением. Они привели, как мы уже говорили, к удовлетворительному решению этой проблемы в конце 30-х годов и породили важное направление развития ОТО. Но основным стимулом для Эйнштейна при разработке этой проблемы было стремление доказать жизнеспособность программы ЕГТП, хотя бы в принципе указать на ее возможности при изучении дискретных аспектов материи в условиях бурного прогресса конкурирующей программы. Однако на фоне этого прогресса достижение ОТО и программы ЕГТП осталось фактически без внимания. Фок в этой связи писал в 1939 г.: «Несмотря на огромную важность этого результата, — он является, по нашему мнению, одним из главных обоснований общей теории относительности — указанные две работы Эйнштейна (первая — совместно с Громмером.— В. В.) прошли мало замеченными и не получили надлежащего развития» [266, с. 233].

Статья о пятимерной теории Калуцы была доложена 17 февраля 1927 г. (первая часть была представлена 20 января) [259, 260]. Эйнштейн полагал, что ничего принципиально нового его работа не вносит в эту теорию: «Отклонения от его (т. е. Калуцы.— В. В.) рассуждений чисто формальны» [259, с. 193]. Главной ее целью

было обратить внимание на эту теорию как на перспективное направление в русле программы ЕГТП. После разочарования в теориях аффинного и аффинно-метрического типа естественно было вернуться к пятимерию. К тому же в связи с размышлениями над проблемой движения частиц в ОТО Эйнштейн изменил свою точку зрения на частицы: он отказался от представления о них как о не-сингулярных центрально-симметричных статических решений в пользу идеи отождествления их с особенностями полевых уравнений. И, как мы уже заметили, довод против теории Калуцы, опирающийся на отсутствие подходящих несингулярных решений и выдвинутый в 1922 г. в совместной статье Эйнштейна и Громмера [269], утрачивал свою силу. Возможно, и оживление идеи пятимерия, связанное с квантовомеханическими работами О. Клейна, В. А. Фока и др., как-то сказалось на возобновлении интереса Эйнштейна к пятимерию, хотя в корректурном примечании к статье он говорит о своем незнании с этими работами, которые, как указал Эйнштейну на это Г. А. Магдаль, содержат результаты и его исследования.

Содержание эйнштейновской работы весьма близко к § 1 цитированной выше статьи О. Клейна, опубликованной полугодом ранее. Основной прогресс, достигнутый Клейном по сравнению с работой Калуцы 1921 г., заключался в том, что объединение гравитации и электромагнетизма, осуществленное последним лишь в первом приближении, получалось теперь как точный результат. Это касалось и уравнений поля, и уравнений движения заряженной частицы. Кроме того, Клейн ввел фактически «усиленное условие цилиндричности» (выражение Эйнштейна), содержащее наряду с «условием цилиндричности»

$$\partial \gamma_{\mu\nu} / \partial x^0 = 0 \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3, 4), \quad (28)$$

где $\gamma_{\mu\nu}$ — метрический тензор пятимерного риманова пространства, требование $\gamma_{00} = 1$ (или $\gamma_{00} = \alpha = \text{const}$). Это означало дополнение группы общей ковариантности « x^0 -преобразованиями» (терминология Эйнштейна):

$$x^0 = \bar{x}^0 + \Psi(\bar{x}^1, \bar{x}^2, \bar{x}^3, \bar{x}^4). \quad (29)$$

Уравнения гравитационного и электромагнитного полей выводились из единого вариационного принципа

$$\delta \int P \sqrt{-\gamma} dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 dx^4 = 0, \quad (30)$$

где P — пятимерная скалярная кривизна. Эйнштейн, впрочем, исходил из эквивалентного лагранжиана

$$G = \sqrt{\gamma} \gamma^{\mu\nu} (\Gamma_{\mu\nu}^\alpha \Gamma_{\alpha\beta}^\beta - \Gamma_{\mu\alpha}^\beta \Gamma_{\nu\beta}^\alpha). \quad (31)$$

Отождествление уравнений движений заряженной частицы с уравнениями геодезической линии в 5-мерном пространстве было осуществлено также и В. А. Фоком [270].

Но главной целью статей Клейна и Фока было не столько получение этих результатов, представляющих основной интерес с точки зрения программы ЕГТП, сколько обнаружение возможности истолковать релятивистское обобщение уравнения Шредингера как скалярное волновое уравнение в пятимерном пространстве. Иначе говоря, пятимерие их интересовало прежде всего в плане разработки квантово-теоретической программы, которая в этом пункте оказывалась неожиданно связанной с программой ЕГТП. Клейн подчеркивал, что оптико-механическая аналогия, лежащая в основе волновой механики, свое полное выражение находит именно при использовании пятимерного пространства. Это, с его точки зрения, было более серьезным поводом для модификации пространственно-временных представлений в духе теории Калуцы, чем аргументы, связанные с реализацией программы ЕГТП.

Клейн уже в этой статье 1926 г. выдвинул идею замены условия цилиндричности условием периодической зависимости всех полевых величин от пятой координаты x^0 с периодом, пропорциональным постоянной Планка h ²². Тем самым возникал замысел своеобразного объединения гравитации и электромагнетизма с волновой механикой на основе пятимерной геометрической схемы, хотя механизм этого объединения оставался неясным. «Также остается открытым вопрос, — отмечал Клейн, — достаточно ли для описания четырнадцати потенциалов (требование программы ЕГТП. — В. В.), или подключение метода Шредингера означает введение некоторой новой полевой переменной ("Zustandsgröße")» [258, с. 906].

Фоку²³ также наиболее существенным казалось установление связи пятимерия с квантовой механикой: «Введение 5-го координатного параметра представляется нам удобным способом для установления как уравнения Шредингера, так и уравнения классической механики в инвариантной форме» [270, с. 226]. Кстати говоря, обсуждая инвариантные свойства релятивистского скалярного

²² «Если рассматривать такие решения этого уравнения (т. е. скалярного волнового уравнения в пятимерном пространстве. — В. В.), — писал Клейн, — при которых пятое измерение фигурирует как чисто гармонически изменяющаяся величина с некоторым периодом, определяемым постоянной Планка, то мы приходим к ... квантово-теоретическим методам» [258, с. 895].

²³ В. А. Фок не знал о работе Клейна, с которой он познакомился, когда его статья была уже в печати. Он отметил, что для него стимулирующее значение имели обсуждения с советскими теоретиками В. К. Фредериксом и Г. А. Манделем. Последний, не зная о работах Калуцы и Клейна, самостоятельно разработал пятимерную схему объединения гравитации и электромагнетизма [271]. Фок познакомился с пятимерием по рукописи статьи Мандела. О роли же Фредерикса Фок писал: «Идея этой работы возникла в разговоре с профессором В. Фредериксом, которому я благодарен также за некоторые ценные советы» [270, с. 226]. Фредерикс же, который был хорошо осведомлен о единичных геометризovaných теориях поля Гильберта, Вейля и Эддингтона, очевидно, не знал о работе Калуцы, о которой он не преминул бы упомянуть во введении к книге «Основы теории относительности», написанной совместно с А. А. Фридманом [272].

волнового уравнения, Фок впервые ввел локальные калибровочные преобразования

$$\begin{aligned}\psi' &= e^{-i\frac{e f(x)}{\hbar c}} \psi, \\ \Phi_i' &= \Phi_i + \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}.\end{aligned}\tag{32}$$

Впоследствии на этом пути возникла калибровочная концепция электромагнитного поля, которая в 50-х годах привела к калибровочной концепции в теории элементарных частиц (см. гл. 6).

В 1927 г. появился большой обзор В. К. Фредерикса «Теория Шредингера и общая теория относительности» [273], где обсуждались работы Клейна, Фока и других по проблеме пятимерия в связи с квантовой механикой (обзор был закончен осенью 1926 г.). Результаты Клейна и Фока, как казалось Фредериксу, позволяли новым путем подойти в рамках программы ЕГТП к квантовой механике: «Мы видим, — писал он, — что пятимерное пространство, рассматриваемое Фоком и Клейном, обладает весьма замечательными особенностями. Говорить о „единой“ геометрии поля на основании этих работ, правда, пока не приходится, но для нахождения ее, как нам кажется, пройден еще один важный и интересный этап — мы сказали бы особенно интересный потому, что он тесно связан с теорией квант, подойти к которым до сего времени теория относительности не сумела» [273, с. 89].

Калуду и Эйнштейна на первых порах как будто не особенно волновал вопрос о физическом смысле пятого измерения, хотя с позиций программы ЕГТП пятимерное пространство-время следовало рассматривать как обобщение реального четырехмерного пространства-времени ОТО. После работ Клейна и Фока возникли две точки зрения на этот вопрос. Первая ясно выражена в приводимых ниже словах Фредерикса: «Вопрос о реальности или нереальности пятого измерения не так существен, как это может показаться с первого взгляда. Инвариантные свойства сферической поверхности в обыкновенном евклидовом пространстве могут изучаться с помощью положений обыкновенной геометрии, но они могут быть получены и как свойства сферической, неевклидовой геометрии двумерной геометрии. Подобно тому как третья координата евклидова пространства делает изучение сферической поверхности более простым, так и в деле изучения свойств нашего четырехмерного мира пятая координата может быть лишь средством для упрощения наших выводов» [273, с. 89].

Отношение к пятимерию как к чисто вспомогательной конструкции, имеющей, скорее всего, формально-вычислительный характер, было связано, по-видимому, с тем, что пятимерная метрика

$$\gamma_{ik} = g_{ik} + \frac{e^2}{m^2 c^4} \Phi_i \Phi_k,\tag{33}$$

в отличие от ее четырехмерной части носила не универсальный характер, а напротив, зависела от свойств рассматриваемой части-

цы, если, например, речь шла об описании движения заряженной частицы с зарядом e и массой m . «Не нужно забывать,— подчеркивал в этой связи Фредерикс,— что мероопределение (4) (т. е. (33).— В. В.) пригодно только для данной частицы с определенным зарядом и массой» [273, с. 87].

Впоследствии, в 40—50-х годах, советский физик Ю. Б. Румер, подчеркивая отмеченную неуниверсальность пятимерной римановой метрики, писал: «Это показывает, что 5-пространство 5-оптики (5-оптикой оп называл развитое им обобщение теории Калуцы — Клейпа,— В. В.) не является универсальным пространством общей теории относительности (расширенным на одно дополнительное измерение), а *конфигурационным пространством* для частицы, движение которой мы рассматриваем» [13, с. 27].

Впрочем, признание конфигурационного характера пятимерного пространства не означало отказа от поисков физического смысла пятого измерения. Вторая точка зрения, которую пачали разрабатывать О. Клейн, Ф. Лондон и другие, а позже развивал, в частности, Ю. Б. Румер, состояла в том, чтобы связать его с той или иной физической величиной. Основанием для такой связи служили и родство пятого измерения с электромагнетизмом и квантами, и условия цилиндричности и периодичности. Клейн считал, что пятое измерение имеет зарядовую природу в том же смысле, как трехмерное пространство имеет импульсную природу: ненаблюдаемость пятого измерения влечет за собой сохранение заряда, точно так же как однородность трехмерного пространства — сохранение импульса. Клейн связывал квантовый характер заряда с цикличностью пятого измерения с периодом порядка 10^{-30} см. В результате пятимерное пространство оказывалось как бы замкнутым по 5-й координате. Крайняя малость указанного периода объясняет то, почему пятое измерение не проявляется в физических явлениях [274]. Ф. Лондон пытался связать 5-е измерение с углом поворота электрона вокруг своей оси [275]. Через 10 лет после описываемых событий А. Эйнштейн и П. Бергман возродили идею Клейна, допустив топологическую замкнутость пятимерного пространства в пятом измерении с крайне малым периодом b [198]. Двумерной моделью такого пространства оказывалась цилиндрическая поверхность с радиусом $b/2\pi$. Еще через 10 лет Ю. Б. Румер приписал пятому измерению физический смысл действия, а постоянную Эйнштейна и Бергмана b отождествил с постоянной Планка, обобщив, таким образом, клейновское условие периодичности [13].

Эйнштейн в статье 1927 г. игнорировал все аспекты пятимерия, связанные с квантовой механикой, вероятно, потому, что частицы он надеялся получить как сингулярные решения объединенных полевых уравнений, а квантовые особенности их поведения — как свойства этих решений. Ничего существенно нового по сравнению с работами Клейна и Фока он не получил, если не считать двух замечаний, касающихся интерпретации «усиленного условия цилиндричности». Во-первых, он заметил, что «если теперь принять, что объективный смысл имеют не сами величины $\gamma_{\mu\nu}$, но только их

отношения, или, другими словами, что в пространстве задана не метрика ds (т. е. $ds = \gamma_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$. — В. В.), а совокупность «световых конусов» ($ds = 0$), то функция Гамильтона будет зависеть лишь от первых двух приведенных выше комбинаций (т. е. фактически от отношений γ_{mn}/γ_{00} , γ_{0m}/γ_{00} и их производных. — В. В.) ... Это означает, — продолжал он, — что требование $\gamma_{00} = 1$ не приводит к сужению основных теоретических возможностей и мы приходим к „усиленному условию цилиндричности“» [259, с. 194].

Во-вторых, Эйнштейн указал на то, что выбор в качестве γ_{00} именно $+1$ и, таким образом, выбор пространственно-подобного характера пятого измерения определяет положительный знак второго члена в лагранжиане объединенного поля

$$P = R + \frac{1}{2} f_{ik} f^{ik}. \quad (34)$$

Иначе говоря, указанный выбор знака γ_{00} связан с требованием, «чтобы уравнения единого поля приняли обычную форму» [259, с. 197].

Против пятимерного подхода к построению единой теории гравитации и электромагнетизма Вейль, Паули и другие выдвигали в разное время следующие два возражения. Во-первых, формальный характер объединения. Дело в том, что независимо от природы полей общая ковариантность в сочетании с калибровочной инвариантностью приводит к пятимерному формализму. Во-вторых, — и это возражение является наиболее серьезным — «не существует причин с точки зрения ограниченной группы цилиндрической метрики, чтобы в качестве подынтегрального выражения в интеграле действия выбрать именно пятимерную скалярную кривизну» [63, с. 312].

В связи с преодолением этой трудности в 40-х и 50-х годах возникло несколько направлений, пацеленных на обобщение теории Калуцы — Клейна. При отказе от «усиленного условия цилиндричности» и отождествления γ_{55} с некоторым скалярным полем (в духе первоначального варианта теории Калуцы) появилась возможность разработки пятимерной теории с переменной гравитационной постоянной (П. Дирак, П. Иордан, И. Тири и др.), теории, которая, в свою очередь, привела к ряду новых трудностей, в частности операционально-измерительного и экспериментального характера [там же].

Другой путь обобщения пятимерной теории был связан с заменой условия цилиндричности условием периодичности (периодической зависимости всех полевых величин от пятой координаты x^5). Эта идея, выдвинутая Клейном еще в 1926 г., получила затем развитие в работах Эйнштейна с сотрудниками, Ю. Б. Румера и др. В этом случае можно было говорить о группе преобразований

$$\begin{aligned} x'^i &= p^i(x^0, x^k), \\ x'^0 &= x^0 + p^0(x^0, x^k), \end{aligned} \quad (35)$$

где p^μ — произвольные периодические функции x^0 с периодом 2π , которая оправдывала введение пятимерной скалярной кривизны P

в качестве основного инварианта, хотя и оставляла открытым вопрос о существовании других более сложных инвариантов.

На этом пути возникли любопытные возможности связать пятимерие с квантовой механикой, например, в духе 5-оптики Румера, но открытие множества разнообразных элементарных частиц, особенно в 50-х годах, подчеркнуло явную ограниченность пятимерной теории, в которой, как, впрочем, и в других ЕГП, основное внимание уделялось объединению лишь гравитационного и электромагнитного взаимодействий.

Возможности пятимерной схемы, однако, нельзя считать исчерпанными. А. Салам в своей нобелевской лекции, отмечая «главные достижения на пути реализации мечты Эйнштейна», первым из них назвал «чудо Калуцы — Эйнштейна» [1, с. 32]. Он, в частности, упомянул об исследованиях Джулии и Кремера (1979), «которые в своих изысканиях начали с попытки использования идей Калуцы и Клейна с целью получения теории расширенной супергравитации (компактифицированном) пространстве-времени высшей размерности, точнее, в одиннадцати измерениях» [1, с. 33]²⁴.

В современной монографии по теории калибровочных полей неоднократно встречаются упоминания об использовании пятимерной концепции, например, в связи с геометрической интерпретацией массы калибровочного поля, истолкованием лагранжиана гравитации и янг-миллсовских полей как скалярной кривизны более чем четырехмерного расслоенного пространства: «Такой подход обобщает единую теорию гравитации и электромагнетизма Калуцы — Клейна на неабелевы калибровочные поля» [7, с. 133]. В другом месте авторы пишут: «Присутствие тензорного поля $g_{\mu\nu}$, векторного поля A_μ и скалярного поля χ делает теорию Калуцы — Клейна привлекательной для обобщений на случай калибровочных теорий со спонтанным нарушением симметрии в римановом V_4 и суперсимметричных теориях» [7, с. 145].

В конце этой главы мы рассмотрим модификацию теории Калуцы — Клейна, предпринятую в начале 30-х годов Эйнштейном в сотрудничестве с В. Майером. А из следующей главы, содержащей очерк формирования и развития калибровочной концепции поля, будет видна, в частности, роль пятимерия в генезисе понятия калибровочной симметрии.

ГЕОМЕТРИЯ С АБСОЛЮТНЫМ ПАРАЛЛЕЛИЗМОМ:

1928—1930 гг.

Итак, были испытаны различные варианты аффинных и аффинно-метрических схем (включая теории Вейля и Эддингтона), пятимерия: специальному исследованию подверглась также проблема получения уравнений движения частиц, рассматриваемых как сингулярности

²⁴ В связи с этим сошлемся на недавнюю работу И. А. Воронова и Я. И. Когана, в которой используется обобщение пятимерного подхода Калуцы — Клейна в целях построения единой теории четырех фундаментальных взаимодействий [276].

поля, из уравнений этого поля. Успехи пока были весьма ограниченными, особенно в сравнении с достижениями квантово-теоретической программы. Все предпринятые до 1928 г. попытки полевого геометрического синтеза гравитации и электромагнетизма, несмотря на их математическую изощренность, не удовлетворяли Эйнштейна и были в конечном счете им отвергнуты. Проблемы полевого истолкования элементарных частиц и объяснения их квантовых свойств (а также квантовых свойств электромагнитного поля) также оставались нерешенными. Возможность вывода уравнений движений частиц из уравнений ОТО, продемонстрированная в 1927 г. Эйнштейном (отчасти совместно с Я. Громмером), давала лишь некоторую надежду на аналогичное решение этого вопроса в будущей единой теории поля.

В 1928 г. Эйнштейн нашел новый способ объединения гравитации и электромагнетизма в рамках программы ЕГТП, основанный на геометрии аффинной связности «с сохранением понятия „абсолютного“ параллелизма» [277, с. 223]. Первое изложение новой единой теории было дано в работе, доложенной Планком в Берлинской академии наук (первая часть — 7 июня [277], вторая часть — 14 июня [278], обе опубликованы 10 июля 1928 г.). В первой части рассматривались геометрические основы теории, во второй — физическое истолкование новой геометрии. В сущности, речь шла о весьма своеобразном расширении римановой геометрии, при котором тензор кривизны $R^{\nu}_{\mu\sigma\rho}$ и соответствующая форма Ω^{ρ}_{ν} обращаются в нуль (как, впрочем, и кривизна гомотетии Ω), а тензор кручения и соответствующая форма Ω^{ρ} отличны от нуля. В такой геометрии оказывается возможным сравнение векторов не только по абсолютной величине (как в римановой геометрии), но и по направлению, т. е. можно говорить о параллелизме векторов, удаленных друг от друга на конечное расстояние («дальний параллелизм» или «абсолютный параллелизм»). Эйнштейн в первой своей работе и в большинстве последующих работ использовал термин «Fernparallelismus» («дальний», или «далекий», параллелизм, или, по выражению К. Ланцоша, «телепараллелизм»); широко применяется также термин «абсолютный параллелизм» [279].

При разработке этой геометрии Эйнштейн взял за основу локально-реперный формализм, получивший в 20-х годах развитие в дифференциально-геометрических исследованиях Э. Картана, Р. Вайценбека, Т. Леви-Чивиты и др. В 1926—1927 гг. Э. Картан прочел курс римановой геометрии на основе ортореперного подхода и метода внешних форм [280]. Еще раньше Р. Вайценбек рассматривал риманово пространство, наделенное локально-реперной структурой [281]. В 1926 и 1927 гг. вышли в свет ставшие теперь классическими монографии Л. Эйзенхарта «Риманова геометрия» [282] и «Нериманова геометрия» [283], в которых также использовался формализм локальных ортогональных реперов²⁵.

²⁵ Этот формализм применительно к ОТО получил впоследствии название тетрадного и лег в основу соответствующей (тетрадной) формулировки ОТО.

Эйнштейн же использовал ортореперный метод не для переформулировки ОТО, а для построения новой геометрии, предназначенной для единого описания гравитационного и электромагнитного полей. При этом в его первых публикациях отсутствовали как-либо ссылки на исследования дифференциальных геометров.

Рассмотрим более детально эйнштейновскую работу 1928 г. [277, 278]. С самого начала он подчеркивает, что основным стимулом для него был поиск наиболее естественного обобщения римановой геометрии, в котором было бы место для геометрического описания электромагнитного поля. «В геометрии Римана, — писал Эйнштейн, — которая дала возможность физического описания гравитационного поля в общей теории относительности, совершенно отсутствуют понятия, которые можно было бы сопоставить с электромагнитным полем. Поэтому физики-теоретики, надеясь построить логическую теорию, объединяющую с одной точки зрения все физические поля, стремятся найти такие естественные обобщения геометрии Римана, в которых содержится больше понятий, чем в последней (*natürliche Verallgemeinerungen oder Ergänzungen der Riemannschen Geometrie... welche begriffsreicher sind als diese...*)» [277, с. 223; 285, с. 217].

Характерной чертой новой геометрической схемы он считал возможность сравнения удаленных друг от друга векторов не только по величине, как в римановой геометрии, но и по направлению, а также вытекающую отсюда возможность говорить о параллелизме таких векторов. В конце первой части он сравнивает новую геометрию с геометриями Римана и Вейля: «Для векторов, разделенных конечным расстоянием: в теории Вейля — невозможно сравнение ни по длине, ни по направлению; в теории Римана (т. е. ОТО. — В. В.) — возможно сравнение по длине, но не по направлению; в рассмотренной здесь теории — возможно сравнение и по длине, и по направлению» [277, с. 223]. Переход от римановой геометрии к более «аморфным» ее обобщениям типа вейлевской не привел к успеху, и Эйнштейн попытался перейти к более «жесткой» структуре, которая, однако, была бы настолько «богатой», чтобы ее геометрические характеристики содержали величины, отвечающие как гравитационному, так и электромагнитному полю.

Если для Вейля одним из главных стимулов, как мы видели, была установка на дальнейшее исключение «элементов дальнего действия» из физической геометрии, то новая геометрическая схема как будто вступала в противоречие с этой установкой, поскольку вводила новый «элемент дальнего действия» — параллелизм векторов, удаленных друг от друга на конечное расстояние. Иначе говоря, в пространстве с «абсолютным параллелизмом» изменение компонент вектора при параллельном переносе не зависит от пути переноса.

Упомянутые лекции Картана были затем изданы под названием «Риманова геометрия в ортогональном репере» [280]. Аналогичным образом назвала свою книгу, посвященную тетрадной формулировке ОТО, В. И. Родичев: «Теория тяготения в ортогональном репере» [284].

Как и ортореперный метод, пространства с абсолютным параллелизмом не были для геометров новинкой. Впервые, по-видимому, они обсуждались Картаном в его большой статье о структуре непрерывных групп, опубликованной в 1904—1905 гг. [286]. Уже тогда Картан показал, что римановы пространства с нулевым тензором кривизны допускают введение понятия абсолютного параллелизма. В 1926—1927 гг., т. е. за год-два до появления эйнштейновской единой теории поля, основанной на геометрии с абсолютным параллелизмом, эта геометрия вновь рассматривалась в совместных работах Картана и Схоутена [287] (а также в фундаментальной статье Картана [288], переведенной впоследствии на русский язык [289, с. 39, 55]) на основе новейших достижений дифференциальной геометрии, опирающихся, в частности, на понятие аффинной связности. Когда Картан узнал об эйнштейновской единой теории поля, основанной на идее абсолютного параллелизма, он опубликовал в «Math. Annalen» статью, специально посвященную развитию понятия абсолютного параллелизма в дифференциальной геометрии [290]. С этой статьей Картана соседствовала статья Эйнштейна, содержащая изложение последнего варианта его единой теории (она поступила в редакцию журнала 19 августа 1921 г. [291]). «От Вейценбека и Картана, в частности, — писал Эйнштейн, — я узнал, что теория континуумов рассматриваемого здесь рода (т. е. пространств с абсолютным параллелизмом. — В. В.) сама по себе не является новой. Картан любезно взял на себя труд составить исторический обзор соответствующего раздела математики, который дополняет мою работу (речь идет об упомянутой выше работе Картана, помещенной вслед за статьей Эйнштейна. — В. В.)» [291, с. 307]²⁶.

Вернемся к первой публикации теории Эйнштейна. Суть эйнштейновского подхода заключалась в том, что пространственно-временной континуум он наделял полем четырехмерных псевдоортогональных реперов (« n -Bein Feld», в русском переводе был использован мало распространенный эквивалент «поле n -подов»). Относительно такого репера, построенного в некоторой точке P , вектор A^ν (заданный по отношению к некоторой гауссовой системе координат x^ν) имеет компоненты A_α . Если через h_α^ν обозначить компоненты орторепера относительно этой системы координат x^ν , то компоненты вектора A^ν и A_α оказываются связанными друг с другом соотношением

$$A^\nu = h_\alpha^\nu A_\alpha. \quad (36)$$

Справедлива также формула

$$A_\alpha = h_{\mu\alpha} A^\mu, \quad (37)$$

²⁶ Очевидно, важный материал по теориям с абсолютным параллелизмом, особенно в связи с предшествующими геометрическими исследованиями Картана и его реакцией на работы Эйнштейна, содержится в переписке между Эйнштейном и Картаном, о которой нам стало известно после завершения настоящей работы и с которой, к сожалению, так и не удалось своевременно познакомиться [291a].

где $h_{\mu a}$ — нормированные миноры величин h_a^μ . Из локальной евклидовости континуума и формулы (37) следует выражение метрики через величины h_a^μ или $h_{\mu a}$:

$$g_{\mu\nu} = h_{\mu a} h_{\nu a}, \quad (38)$$

причем $h_{\mu a} h_a^\nu = \delta_\mu^\nu$ и $h_{\mu a} h_b^\mu = \delta_{ab}$, а при фиксированном a величины $h_{\mu a}$ и h_a^μ имеют векторный характер.

Поле ортореперов определяется 16 функциями h_a^μ , в то время как риманова метрика только 10 функциями $g_{\mu\nu}$. Соотношение (38) позволяет ввести метрику; метрики же недостаточно для того, чтобы определить поле ортореперов. Далее Эйнштейн показывает возможность при наличии поля ортореперов ввести понятие «абсолютного» параллелизма: «...если (A) и (B) — два вектора в точках P и Q (по отношению к своим локальным n -подам) — обладают одинаковыми соответственными локальными координатами (т. е. $A_a = B_a$), то они будут равными и „параллельными“» [277, с. 225]. При этомряду с группой общей ковариантности в геометрию вводится группа вращений четырехмерных ортореперов (т. е. группа Лоренца).

Абсолютный параллелизм оказывается несовместимым с наличием кривизны. Для того чтобы пространство аффинной связности обладало свойством абсолютного параллелизма, необходимо и достаточно тождественное обращение в нуль тензора кривизны. Эйнштейн дает набросок доказательства этого утверждения. Более строгое доказательство — см., например, [292]. Из условия абсолютности параллельного переноса вектора A_a следует

$$dA_a = d(h_{\mu a} A^\mu) = \frac{\partial h_{\mu a}}{\partial x^\sigma} A^\mu dx^\sigma + h_{\mu a} dA^\mu = 0, \quad (39)$$

откуда непосредственно получается закон параллельного переноса вектора A^μ

$$dA^\nu = -\Delta_{\mu\sigma}^\nu A^\mu dx^\sigma, \quad (40)$$

где

$$\Delta_{\mu\sigma}^\nu = h^{\nu a} \frac{\partial h_{\mu a}}{\partial x^\sigma} \quad (41)$$

является аффинной связностью. Вычисление тензора кривизны при использовании соотношений (41) приводит к нулевому результату.

Таким образом, связность $\Delta_{\mu\sigma}^\nu$ реализует интегрируемый параллельный перенос вектора. Неинтегрируемый перенос, осуществляемый римановой связностью $\Gamma_{\mu\nu}^\sigma$, порождает вектор $A^\nu + \bar{d}A^\nu$, и поэтому величина $dA^\nu - \bar{d}A^\nu = (\Gamma_{\alpha\beta}^\nu - \Delta_{\alpha\beta}^\nu) A^\alpha dx^\beta$ является вектором, а величина $\Gamma_{\alpha\beta}^\nu - \Delta_{\alpha\beta}^\nu$ — тензором. Фундаментальную роль в этой геометрии играет антисимметричная часть этого тензора

$$1/2 (\Delta_{\alpha\beta}^\nu - \Delta_{\beta\alpha}^\nu) = \Lambda_{\alpha\beta}^\nu, \quad (42)$$

характеризующая степень неевклидовости пространства и имеющая смысл тензора кручения. Обращение тензора (42) в нуль является необходимым и достаточным условием евклидовости пространства.

«Так как тензор $\Lambda_{\alpha\beta}^{\nu}$ является к тому же, очевидно,—резкимплет Эйнштейна,—простейшим с формальной точки зрения, то простейшие характерные свойства рассматриваемого континуума следует связать именно с ним, а не с более сложным тензором кривизны Римана» [277, с. 228]. 16 величин $h_{\mu\alpha}$ позволяют описать не только гравитацию (для этого достаточно 10 величин $g_{\mu\nu}$), но и электромагнетизм. Вместо тензоров Римана, Риччи и скалярной кривизны можно для этого использовать тензор $\Lambda_{\alpha\beta}^{\nu}$ и соответствующие скалярные конструкции

$$g^{\mu\nu}\Lambda_{\mu\beta}^{\alpha}\Lambda_{\nu\alpha}^{\beta}, g_{\mu\nu}g^{\alpha\beta}g^{\sigma\tau}\Lambda_{\alpha\beta}^{\mu}\Lambda_{\sigma\tau}^{\nu}.$$

Эйнштейн выбирает в качестве основного инварианта первый и формулирует вариационный принцип для получения полевых уравнений в виде

$$\delta \int h g^{\mu\nu} \Lambda_{\mu\beta}^{\alpha} \Lambda_{\nu\alpha}^{\beta} d\tau = 0. \quad (43)$$

Уверенность в перспективности новой геометрии давало то, что в первом приближении уравнения поля, вытекающие из вариационного принципа (43), приводили к уравнениям гравитации и электромагнетизма. Натолкнувшись на новую, нетривиальную геометрию, Эйнштейн затем «обнаружил, что из подобной теории совсем просто и естественно получаются, по крайней мере, в первом приближении, законы поля тяготения и электродинамики. Поэтому,—продолжал он,—можно думать, что эта теория вытеснит первоначальный вариант общей теории относительности» [278, с. 229].

В первом приближении ($h_{\mu\alpha} = \delta_{\mu\alpha} + k_{\mu\alpha}$, где $k_{\mu\alpha}$ — бесконечно малая первого порядка) уравнения поля, связанные с вариационным принципом (43), сводятся к следующим уравнениям 2-го порядка:

$$\frac{\partial^2 k_{\beta\alpha}}{\partial x_{\mu}^2} - \frac{\partial^2 k_{\mu\alpha}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\beta}} + \frac{\partial^2 k_{\alpha\mu}}{\partial x_{\beta} \partial x_{\beta}} - \frac{\partial^2 k_{\beta\mu}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\alpha}} = 0. \quad (44)$$

Вводя вместо $k_{\mu\nu}$ более привычные величины

$$g_{\alpha\beta} = (\delta_{\alpha\alpha} + k_{\alpha\alpha})(\delta_{\beta\beta} + k_{\beta\beta})$$

или величины $\bar{g}_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta}$, которые с точностью до величины 1-го порядка равны ($k_{\alpha\beta} + k_{\beta\alpha}$), а также электромагнитные потенциалы

$$\varphi_{\alpha} = \Lambda_{\alpha\mu}^{\mu} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial k_{\alpha\mu}}{\partial x_{\mu}} - \frac{\partial k_{\mu\mu}}{\partial x_{\alpha}} \right), \quad (45)$$

Эйнштейн получает уравнения поля (44) в виде

$$\frac{1}{2} \left(- \frac{\partial^2 \bar{g}_{\alpha\beta}}{\partial x_{\mu}^2} + \frac{\partial^2 \bar{g}_{\mu\alpha}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\beta}} + \frac{\partial^2 \bar{g}_{\mu\beta}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\alpha}} - \frac{\partial^2 \bar{g}_{\mu\mu}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} \right) = \frac{\partial \varphi_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial \varphi_{\beta}}{\partial x_{\alpha}}. \quad (46)$$

Тогда при отсутствии электромагнитного поля уравнения (46) переходят в первом приближении в уравнения гравитации ОТО

$$R_{\alpha\beta} = 0. \quad (47)$$

Точно так же несложные манипуляции с уравнениями (44)–(46) приводят к уравнениям Максвелла для вакуума:

$$\partial\varphi_\alpha/\partial x_\alpha = 0, \quad \partial^2\varphi_\alpha/\partial x_\beta^2 = 0. \quad (48)$$

Конечно, это распадение уравнений (44) на уравнения Эйнштейна и Максвелла происходит в первом приближении, причем уравнения (44) заключают в себе больше информации, чем только уравнения (47), (48). Использование в качестве лагранжиана второго инварианта $g_{\mu\nu}g^{\alpha\sigma}g^{\beta\tau}\Lambda_{\alpha\beta}^\mu\Lambda_{\sigma\tau}^\nu$, как указал в заключение Эйнштейн, приводит к аналогичным результатам. Итак, вопрос о выборе лагранжиана оставался не вполне решенным.

10 января 1929 г. Планк представил Берлинской академии новую работу Эйнштейна, который в это время был за пределами Германии [293]. В этой работе речь шла о некоторой модификации теории с абсолютным параллелизмом. Сохранив геометрию, Эйнштейн попытался найти полевые уравнения, минуя вариационный принцип. «Попытки вывода уравнений поля из принципа Гамильтона не привели меня к простому и однозначному пути», — писал Эйнштейн [293, с. 252]. По-прежнему главную роль при получении полевых уравнений играл тензор кручения $\Lambda_{\mu\sigma}^\nu$ (Эйнштейн, впрочем, не называл его так).

Из условия обращения в нуль тензора кривизны легко получается тождество

$$\Lambda_{kl;\alpha}^\alpha + \varphi_{l;k} - \varphi_{k;l} - \varphi_\alpha\Lambda_{kl}^\alpha = 0, \quad (49)$$

которое, если ввести антисимметричную по индексам k и l тензорную плотность

$$B_{kl}^\alpha = h(\Lambda_{kl}^\alpha + \varphi_l\delta_k^\alpha - \varphi_k\delta_l^\alpha) \quad (50)$$

и обобщенную дивергенцию плотности

$$T::\sigma = T::\sigma - T::\alpha\Lambda_{\alpha\sigma}^\sigma, \quad (51)$$

можно переписать в виде

$$(B_{kl}^\alpha)_{;\alpha} = 0. \quad (52)$$

«После того как я открыл тождество (36) (т. е. (50). — *B. В.*), стало ясно, что при естественном ограничении многообразия рассматриваемого нами вида должна играть важную роль тензорная плотность \mathfrak{B}_{kl}^α (т. е. B_{kl}^α — *B. В.*). Поскольку ее дивергенция $\mathfrak{B}_{kl}^\alpha{}_{;l}$ тождественно равна нулю, сразу напрашивается мысль выдвинуть требование (уравнения поля), чтобы дивергенция \mathfrak{B}_{kl}^α также обращалась в нуль» [293, с. 255] — таков был новый, весьма

формальный подход к построению полевых уравнений. В конечном счете Эйнштейн приходит к системе полевых уравнений

$$B_{kl|l} - B_{h\tau}^{\sigma} \Lambda_{\sigma\tau}^{\alpha} = 0, \quad (53)$$

$$[h(\varphi_{h;\alpha} - \varphi_{\alpha;h})]_{|\alpha} = 0, \quad (54)$$

где подчеркивание индексов означает их поднятие или опускание (например, Λ_{kl}^{α} означает чисто контравариантный тензор, соответствующий тензору Λ_{kl}^{α}). В первом приближении эти уравнения давали уравнения гравитации и электродинамики. Совместность их как будто обеспечивалась тем, что для 12 переменных ${}^*h_{\alpha}$ (обозначение, введенное Вайценбеком [294] и затем использованное Эйнштейном; это число объясняется учетом требования общей ковариантности: $16 - 4$) существует 20 уравнений (53)—(54) и 8 связывающих их тождеств.

«Более глубокое исследование следствий уравнений поля (11), (10а) (т. е. (53)—(54).— *B. B.*),— заключал Эйнштейн,— должно показать, действительно ли метрика Римана в соединении с абсолютным параллелизмом дает адекватное понимание физических свойств пространства» [293, с. 258]. В конце статьи он выразил благодарность математику Г. Мюнтцу и «Физическому фонду» Прусской академии наук, который обеспечил его «таким помощником в исследованиях, как д-р. Громмер».

Начало 1929 г. было для Эйнштейна периодом оптимистических надежд. Ему казалось, что на этот раз он явно на верном пути. Закончив только что рассмотренную работу, он с воодушевлением писал Бессо (в письме от 5 января 1929 г.): «Но самое прекрасное, над чем ломал голову и что вычислял целыми днями и половиной ночей, теперь уже готово и сжато на семи страницах под названием «Единая теория поля». Оно выглядит архаичным, и дорогие коллеги, как, впрочем, и ты, мой дорогой, сначала высунут язык во всю длину, ибо в уравнения не входит постоянная Планка. Но когда явно дойдут до предела возможностей статистического помешательства (*statistische Fimmel*), то вернутся к пространственно-временному описанию (точнее, пониманию — *Auffassung*.— *B. B.*), и тогда эти уравнения (т. е. уравнения поля (53), (54).— *B. B.*) смогут дать исходную точку. Фактически я нашел геометрию, обладающую не только римановой метрикой, но и абсолютным параллелизмом, который мы до сих пор интуитивно считали характерным для Евклида. Простейшие уравнения поля подобного множества (точнее, многообразия — *Mannigfaltigkeit*.— *B. B.*) приводят к известным законам электричества и гравитации. Даже уравнения $R_{ik} = 0$ нужно будет снести на чердак, несмотря на достигнутые успехи» [227, с. 28].

Здесь, кстати говоря, программа ЕГТП отчетливо противопоставляется квантово-теоретической программе. После возникновения квантовой механики возникло целое направление теоретических поисков на стыке этих двух программ. Особенной популярностью

пользовались здесь пятимерные теории (см. предыдущий раздел). Эйнштейну же были чужды усилия в этом направлении. Эта позиция по отношению к квантово-теоретической программе сказала и при разработке теории с абсолютным параллелизмом. В радикально новой геометрии он увидел перспективу своеобразного классического реванша («Но когда явно дойдут до предела возможностей статистического помешательства, то вернутся к пространственно-временному описанию, и тогда эти уравнения смогут дать исходную точку»). Ниже мы увидим, что эйнштейновская теория с абсолютным параллелизмом вскоре была подхвачена многими теоретиками опять-таки с целью развития релятивистской квантовой механики и установления ее связи с гравитацией (работы Н. Винсера, Г. Вейля, И. Е. Тамма, В. А. Фока и Д. Д. Иваненко и др.). Эйнштейн же и на этот раз не поддерживал усилий такого рода. С его точки зрения, квантовые закономерности должны были получить свое объяснение на основе исследования частицеподобных решений (или особенностей) уравнений единого поля, полученных совершенно независимо от положений квантовой механики.

В лондонской газете «Daily Chronicle» от 26 января 1929 г. было опубликовано интервью с Эйнштейном по поводу его новой теории, выдержка из которого была напечатана в разделе «News and Views» журнала «Nature» [293, с. 258—259]. Кратко охарактеризовав программу ЕГТН и предшествующие неудачи на пути ее реализации, он сказал: «Я придумал некоторую особую теорию, отличающуюся определенными условиями как от моей общей теории относительности, так и от других теорий четырехмерного пространства. Благодаря этим условиям одни и те же математические уравнения дают законы, которые управляют электромагнитным полем, и законы, которые управляют полем тяготения... Задачей моей работы является дальнейшее упрощение теории и, в частности, сведение к одной формуле, объединение поля тяготения и электромагнитного поля... Теперь и лишь только теперь мы знаем, что силы, которые движут электроны по эллипсам вокруг ядер в атомах, — те же, что и силы, движущие Землю в ее годичном пути вокруг Солнца, и те же, которые приносят к нам лучи света и тепло, делающие возможной жизнь на нашей планете» [295, р. 174—175].

В двух номерах газеты «Таймс» от 4 и 5 февраля 1929 г. была опубликована популярная заметка Эйнштейна «Новая теория поля», перепечатанная вскоре в журнале «Observatory» [296], в которой Эйнштейн сделал попытку общедоступно и наглядно истолковать геометрию с абсолютным параллелизмом как основу единой теории поля. Он пояснил промежуточный характер новой геометрии примером с параллельными прямыми и параллелограммом. Как и в евклидовой геометрии, в геометрии с абсолютным параллелизмом можно говорить о параллельных прямых. Но если мы попытаемся пересечь пару параллельных другой такой парой, чтобы получить параллелограмм (как это имеет место в евклидовой геометрии), то в новой геометрии нам эту фигуру получить не удастся. Прямая Q_1R , параллельная прямой P_1P_2 (точки P_1, Q_1 лежат на прямой l_1 ,

точка P_2 — на прямой l_2 , параллельной l_1), не пересечет прямую l_2 . Это свойство может быть положено в основу геометрии с абсолютным параллелизмом. «Эйнштейновская мировая геометрия, — заметил Эддингтон, — может быть кратко описана как геометрия, в которой существуют *параллельные*, но не существуют *параллелограммы*» [297, р. 281]. Мера отклонения прямой Q_1R от прямой l_2 характеризуется степенью закрученности пространства, а именно тензором кручения $\Lambda_{\mu\nu}^\sigma$.

В марте 1929 г. Эйнштейн вернулся к использованию вариационного принципа для установления полевых уравнений (работа «Единая теория поля и принцип Гамильтона» докладывалась на заседании Прусской академии наук 21 марта [298]). Дело в том, что Г. Мюнтц и К. Ланцос обратили внимание Эйнштейна на недостаток четырех тождеств, необходимых для обеспечения совместности полевых уравнений. Вывод же уравнений поля из вариационного принципа автоматически гарантировал совместность этих уравнений. Однако выбор необходимого лагранжиана не отличался простотой и естественностью, а для получения в первом приближении уравнений Максвелла требовались некоторые искусственные построения. К этой работе близко примыкает более популярная статья, написанная для сборника, посвященного 70-летию юбилею А. Стодоль.

Лагранжиан единого поля в новом варианте выбирается в виде линейной комбинации

$$H = AH_1 + BH_2 + CH_3,$$

где $H_1 = g^{\mu\nu}\Lambda_{\mu\beta}^\alpha\Lambda_{\nu\alpha}^\beta$, $H_2 = g^{\mu\nu}\Lambda_{\mu\alpha}^\alpha\Lambda_{\nu\beta}^\beta$, $H_3 = g^{\mu\nu}g^{\sigma\tau}g_{\lambda\xi}g_{\mu\nu}\Lambda_{\sigma\tau}^\lambda\Lambda_{\xi\tau}^\lambda$. Трудность, однако, заключалась в том, что для определения коэффициентов A , B и C отсутствовали ясные аргументы. «Разработка и физическая интерпретация теории, — писал Эйнштейн, — затрудняются по той причине, что для выбора соотношений между постоянными A , B и C априори не существует никаких оснований» [299, с. 250]. Определенную надежду на разрешение этой трудности давало то, что при $B = -A$, $C = 0$ получались уравнения, которые в первом приближении совпадали с уравнениями гравитации и электромагнетизма и которые, как показали расчеты, проведенные совместно с Г. Мюнтцем, для поля незаряженной материальной точки приводили к решению Шварцшильда.

Эйнштейновская теория с абсолютным параллелизмом вызвала большой интерес и в Германии, и за рубежом. Об этом свидетельствовали не только популярные статьи Эйнштейна и интервью с ним в газетах и журналах (например, в «Таймс» и «Дейли кроникл»), но и появление, в основном начиная с 1929 г., ряда работ видных теоретиков и математиков по различным проблемам этой теории. В течение полутора-двух лет были опубликованы работы Р. Вайценбека, Т. Леви-Чивиты, Э. Картана, А. С. Эддингтона, Г. Вейля, Е. Вигнера, Н. Випера (отчасти совместно с М. Вайяртой), К. Ланцоса, И. Е. Тамма (отчасти совместно с М. А. Леонтовичем),

В. А. Фока (отчасти совместно с Д. Д. Иваненко) и др., так или иначе связанные с этой теорией.

Все эти работы достаточно условно можно разделить на три группы: 1) те, которые концентрировали основное внимание на геометрических аспектах теории; 2) работы, не выходящие за рамки программы ЕГТП и посвященные либо популяризации и разъяснению основ теории, либо попыткам разрешения ее трудностей, либо критике и иному истолкованию геометрической схемы; 3) работы, в которых делались попытки связать теорию с квантовой механикой.

К первой группе относились, например, статьи Р. Вайценбека, Т. Леви-Чивиты, Э. Картана. Вайценбек (его статья, опубликованная еще в 1928 г. [294], была, вероятно, одним из самых первых откликов на теорию Эйнштейна) более детально исследовал основные инварианты геометрии с абсолютным параллелизмом, использованные затем Эйнштейном. Он также ввел новое обозначение для тетрад h_a . Леви-Чивита, отметив, что геометрия с абсолютным параллелизмом и связанные с ней геометрические методы разрабатывались ранее Вайценбеком и итальянским геометром Дж. Витали, дал более стандартное и ясное построение этой геометрии. Он использовал понятие конгруэнции и ввел на его основе понятие «мировой решетки» («world lattice») ²⁷, эквивалентное полю тетрад [300]. Он также ввел в употребление антисимметричные коэффициенты вращения Риччи γ_{ik} , определяющие изменение вектора, заданного ортогональными компонентами A^a , при параллельном переносе.

Картан, как мы уже указывали, дал обстоятельный исторический обзор предшествующих исследований по геометрии с абсолютным параллелизмом [290]. Он указал также на возможные трудности, связанные с исследованием космологических проблем в рамках геометрии с абсолютным параллелизмом. В лекциях, читанных в Научно-исследовательском институте математики и механики в Москве (с 16 по 20 июня 1930 г.), Картан подчеркивал основополагающее значение новейших достижений дифференциальной геометрии, в частности разработанных им, Схоутоном и другими систематической классификации обобщенных геометрий, в развитии теоретической физики; упомянув в этой связи и о геометрии с абсолютным параллелизмом, он заметил: «Ясно, что большое число обобщенных геометрий — до сих пор только геометрические достопримечательности. Они имеют, однако, двойное преимущество бросать свет на самые основы дифференциальной геометрии и образовывать резервуар геометрических схем, из которого могут черпать математика и математическая физика. Таким образом, например, риманова геометрия с абсолютным параллелизмом, которая лежит в основе новейших изысканий Эйнштейна, входит в общую схему, которую мы изложили» [301, с. 62].

²⁷ Впоследствии Г.-Ю. Тредер сравнивал пространство абсолютного параллелизма с кристаллической решеткой [216, с. 38].

Вторую группу представляют, помимо последних работ самого Эйнштейна, статьи А. С. Эддингтона, Дж. Мак-Витти, К. Ланцоша, Г. Пиаджио и др. Особый интерес представляет реакция одного из пионеров программы ЕРТН — Эддингтона. В Англии он, по-видимому, был первым, кто откликнулся на новую теорию Эйнштейна. Его небольшая статья появилась в выпуске «Nature», датированном 23 февраля 1929 г. [297]. Сжато, четко и достаточно наглядно охарактеризовав основы геометрии с абсолютным параллелизмом (именно в этой статье он заметил, что в этой геометрии «существуют параллели, но не существуют параллелограммы») и описав способ ее использования для построения единой теории поля, он сравнивает новую схему с геометрией аффинной связности, лежащей в основе его собственной теории 1921 г. При этом обнаруживается их дuality: в теории Эддингтона (как, впрочем, и в теории Вейля) параллельный перенос вектора неинтегрируем, связность симметрична, тензор кривизны $R_{\alpha\mu\nu}^{\mu}$ определяет структуру геометрии, а тензор кручения равен нулю; в теории Эйнштейна параллельный перенос вектора интегрируем, связность несимметрична, тензор $R_{\alpha\mu\nu}^{\alpha} = 0$, а тензор кручения $\Lambda_{\alpha\mu}^{\nu}$, напротив, определяет структуру пространства-времени.

Придерживаясь принятого им разделения геометрии на «мировую» и «естественную» (первая является условной схемой, своеобразным графическим представлением, «graph»; вторая — истинно физической, обнаруживающей себя в физических измерениях, и является римановой), Эддингтон соглашается принять геометрию с абсолютным параллелизмом лишь в первом смысле, как одну из ряда возможных геометрических схем, уступающую, впрочем, более адекватным, с его точки зрения, аффинным схемам. «Со своей стороны, — заключал он статью, — я не могу отказаться от аффинной картины, в которой гравитационные и электрические величины дополняют друг друга как соответственно симметричные и антисимметричные свойства мировых измерений; трудно представить более стройный способ их согласования. Вероятно, того, кто верит, что теория Вейля и ее аффинные обобщения вносят столь большую ясность, следует простить за сомнения в том, что новая теория предлагает достаточный стимул для изменения геометрии» [297, с. 281].

Ланцош [302] и Мак-Витти [303] исследовали проблему совместности полевых уравнений и их решения в частных случаях (в 1-м приближении). Пиаджио дал упрощенное, популярное изложение теории, отметив отсутствие связи новой теории с экспериментом и трудность проблемы получения точных решений. Он также обратил внимание на то, что в этой теории «имеется возврат к ситуации, характерной для Ньютона, который считал реальным абсолютное вращение...» [304, с. 879].

К третьей группе принадлежали в большинстве своем работы более молодых теоретиков, занимавшихся по преимуществу квантовой механикой. Их больше волновал вопрос о связи ОТО с кван-

товой теорией. В тетрадном методе и геометрии абсолютного параллелизма они усмотрели новые возможности реализовать эту связь. При этом имелись в виду только что разработанная релятивистская квантовая механика Дирака и связанное с ней представление о спине электрона. Одной из первых работ такого рода была заметка Н. Винера и М. Вайярты в «Nature» (от 2 марта 1929 г.). «Понятие параллелизма, справедливое для пространства в целом, и эйнштейновские n -реперы (« n -uples») позволяют перенести теорию Дирака в общую теорию относительности почти без всякого изменения», — писали авторы этой статьи ... — Нужно только, — продолжали они, — P_0, P_1, P_2, P_3 (т. е. операторы импульсов. — В. В.) интерпретировать не как производные по x, y, z, t , а как производные вдоль линий тетрад (quadruples) ... Эйнштейновские величины $^*h_\lambda$ одной ногой стоят в макромеханическом мире, формально описываемом эйнштейновским гравитационным потенциалом и соответствующим индексом λ , а другой — в мире Минковского, микромеханическом мире, характеризуемом индексом s [305, с. 317]²⁸.

Несколько работ (две из них совместно с М. А. Леонтовичем) о связи теории Эйнштейна с квантовой теорией написал И. Е. Тамм (первая работа датирована 14 марта 1929 г. [307]). Он попытался перенести уравнение Дирака в геометрию с абсолютным параллелизмом, дополнив его в присутствии электромагнитного поля некоторым членом, связанным с тензором кручения $\Lambda_{\mu\nu}^\sigma$, а именно членом

$$i_{\mu}\psi = i \frac{\hbar}{2\pi} \sqrt{\Lambda_{\mu\lambda}^{\lambda} \Lambda_{\mu\nu}^{\nu}}$$

Основания для его введения он нашел в естественном предположении: «Если отнести векторы A^s и p_s (фигурирующие в уравнении Дирака

$$(A^s p_s + Bmc)\psi = 0 \quad (55)$$

и совпадающие соответственно с дираковскими матрицами и операторами импульса. — В. В.) к эйнштейновским параллельным реперам, тогда волновое уравнение обладает в существенном такой же простой формой (4) (т. е. (55). — В. В.) в произвольном поле, как в случае без поля» [307, с. 185]. Поскольку, считал Тамм, до сих пор не найдено статического сферически-симметричного решения полевых уравнений, отвечающего заряженной частице, то, возможно, «простейшее решение эйнштейновских полевых уравнений, соответствующее покоящейся заряженной частице, отличается не сферической, но аксиальной симметрией и тем самым принимает во внимание спин заряженной частицы» [308, с. 192].

Другая особенность теории Эйнштейна заключалась в том, что в ней, по мнению Тамма, нельзя было связать уравнения движения частиц с геодезическими линиями (из-за отсутствия в уравнениях геодезического члена, отвечающего силе Лоренца). С другой сторо-

²⁸ См. также следующую работу Н. Винера [306].

ны, ему казалось, что в теорию естественно вводится уравнение Дирака. Поэтому, считал Тамм, «в этой теории волномеханический принцип стоит выше принципа кратчайшего пути, так что уравнения движения (заряженной) частицы следует выводить с помощью предельного перехода из волнового уравнения» [308, с. 193]. В этих особенностях он видел намеки на то, что теория с абсолютным параллелизмом содержит важные квантовые черты, и считал поэтому, что она предусматривает возможность естественного объединения с теорией Дирака. В этом пункте Тамм существенно расходился с Эйнштейном, который считал недопустимым введение постоянной Планка в основные уравнения единой теории поля²⁹.

Краткая заметка В. А. Фока и Д. Д. Иваненко «Квантовая геометрия», опубликованная в «Nature» и датированная 21 марта 1929 г., положила начало важным исследованиям советских ученых, приведших к корректному перенесению уравнения Дирака в риманову геометрию [310]. Они предложили использовать эйнштейновскую тетрадную структуру для построения геометрии с фундаментальной линейной формой

$$ds = \sum_k \gamma_k dx_k,$$

где γ_k — матрицы Дирака, полагая, что если гравитации и соответствующим уравнениям Эйнштейна отвечает квадратичная дифференциальная форма, то уравнению Дирака следует сопоставить указанную выше линейную форму, причем дираковские матрицы должны преобразовываться с помощью эйнштейновских $h_{\alpha\mu}$. Эта геометрия, по мнению авторов, должна была бы лечь в основу синтеза гравитации, электромагнетизма и квантовой теории.

В дальнейшем Фок и Иваненко взяли из теории Эйнштейна только тетрадный метод, который оказался весьма ценным инструментом при изучении взаимодействия фермионов (сначала только электрона) с гравитационным полем. В конечном счете это привело к одному из направлений спинорного анализа, а также сыграло оп-

²⁹ С. М. Рытов в своих воспоминаниях о Тамме писал: «Освободившись от работы над учебником („Основы теории электричества“.— В. В.), он тотчас же перешел в лекциях к тому, что его занимало. В весеннем семестре 1929 г. он прочел курс „Физические основы теории относительности“, посвященный главным образом общей теории относительности и необходимый для понимания следующего курса, который он сразу же вслед за этим и начал в апреле 1929 г. Курс назывался „Теория гравитации и электромагнитного поля А. Эйнштейна“. Речь шла о новой работе А. Эйнштейна, одной из первых его попыток построения единой теории поля гравитационного и электромагнитного полей.

Эта теория сильно увлекла Тамма. Он не просто знакомил нас с ней, а пытался ее усовершенствовать, полагая, что трудности, с которыми она сталкивается, могут быть преодолены, если привлечь квантовую механику (уравнения Дирака). К 1929 г. относится пять публикаций Тамма (две из них — совместно с М. А. Леонтовичем), посвященных именно этим вопросам. Конечно, нам, студентам, эти работы не были известны, да и вряд ли мы смогли бы их одолеть. Но в лекциях он обрисовал всю ситуацию с предельной ясностью» [309, с. 186].

ределенную роль в разработке калибровочной концепции поля (см. гл. 6).

В близком направлении, в значительной мере отталкиваясь от теории Эйнштейна с абсолютным параллелизмом, работал в то же время Г. Вейль. Первая его статья «Гравитация и электрон», опубликованная в «Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)», была закончена в начале 1929 г. (исправления, сделанные при корректуре, датированы 4 марта 1929 г.) [311]³⁰. Вейль также взял на вооружение тетрадный метод Эйнштейна, хотя, подобно Фоку и Иваненко, использовал его в рамках ОТО, а не единой теории с абсолютным параллелизмом. «Несмотря на некоторое формальное совпадение,— писал Вейль,— мой подход радикально отличается тем, что я отказываюсь от абсолютного параллелизма и придерживаюсь классической теории гравитации Эйнштейна» [313, с. 245].

Более важным стимулом для него были трудности теории Дирака. В работах 1929 г. Вейль разработал способ введения уравнения Дирака в схему ОТО, а также калибровочную концепцию электромагнитного поля, которую он связывал также с ОТО (см. гл. 6). Признав и используя тетрадный подход, Вейль подверг критике концепцию абсолютного параллелизма: «В теории бесконечно далекого (т. е. абсолютного.— В. В.) параллелизма я сомневаюсь по ряду причин. Во-первых, моя математическая интуиция не может принять *столь искусственную геометрию*; мне трудно понять, какая сила объединяет локальные системы координат в различных мировых точках, расположенные произвольным образом по отношению друг к другу (in ihrer verdrehten Lage), в некоторую единую жесткую структуру... Во-вторых, возможность независимого вращения координатных систем в различных точках... эквивалентна существованию симметричного тензора энергии-импульса, или выполнению теоремы о сохранении момента импульса (в теории же с абсолютным параллелизмом эта возможность не реализуется.— В. В.)» [там же].

Более развернутую критику единой теории с абсолютным параллелизмом Вейль дал в своей кембриджской лекции «Геометрия и физика» (май 1930 г.) [17]. Главными недостатками этой теории он считал отказ от того уровня «геометрического близкодействия», который был достигнут при переходе от СТО к ОТО, и отсутствие физического агента, обеспечивающего единую настройку локальных ортореперов; определенные трудности с формулировкой законов сохранения энергии-импульса и особенно момента импульса; наконец, наличие в такого рода геометрии двух типов прямейших (или геодезических) линий, которое не имеет никакого физического основания³¹.

³⁰ Вскоре эта статья с некоторыми модификациями и дополнениями была опубликована еще в двух журналах [312, 313]. Наиболее обстоятельное изложение содержится в публикации [313], которую мы и цитируем в дальнейшем (см. также гл. 6).

³¹ «Уже более двух лет Эйнштейн упорно идет по новому следу... Наряду с римановой метрикой он берет в качестве основной структуры далекий па-

Правда, критическое отношение Вейля к теории Эйнштейна не означало, что он отдавал предпочтение своей единой теории поля 1918—1920 гг. или какой-либо другой ЕГТП. После возникновения квантовой механики Вейль оставляет геометризованную полевую программу. «По моему мнению,— говорил он в цитированной кембриджской лекции,— вся ситуация в последние четыре или пять лет полностью изменилась благодаря открытию материальных полей (имеется в виду волновая механика.— В. В.). Все эти геометрические пируэты (Luftsprünge) оказались преждевременными, и мы возвращаемся на твердую почву физических фактов» [17, с. 56].

Вернемся к лету 1929 г. В это время советские физики готовили 1-ю Всесоюзную конференцию по теоретической физике в Харькове. Проблемы ЕГТП, в частности эйнштейновской теории с абсолютным параллелизмом, были тогда наряду с квантовой механикой в центре внимания советских теоретиков. В конференции готовились принять участие (и участвовали) В. А. Фок, Д. Д. Иваненко, Г. А. Манцель, В. К. Фредерикс, Г. А. Гамов, Я. Громмер, активно занимавшиеся проблемами ЕГТП и связи этих теорий с квантовой теорией³². Был приглашен и Эйнштейн, который не смог приехать «из-за плохого состояния здоровья и большой занятости» [279, с. 70]. В письме к председателю оргкомитета конференции И. В. Обреимову от 11 июля Эйнштейн уже не столь оптимистично характеризовал свою теорию: «Я считаю, что гипотеза далекого параллелизма заслуживает серьезного внимания, поскольку она, возможно, позволяет понять физическую структуру пространства. Однако сейчас я серьезно убежден, что моя прежняя интерпретация электромагнитного поля не является правильной. Разработка теории продвигается медленно, так как я до сих пор не смог преодолеть ряда математических трудностей... Пока что здесь отсутствует так много необходимых пунктов, что я еще не смог прийти

раллелизм векторов. Он предполагает, что локальные реперы связаны друг с другом так, что они все только одновременно могут подвергаться одному и тому же вращению. ... Эйнштейн порвал с инфинитезимальной точкой зрения. Это привело к тому, что все хорошее, достигнутое переходом от СТО к ОТО, оказалось утраченным. Пока что потери не стоят незначительных выгод. Нельзя, например, понять, как в этой теории получается закон сохранения энергии-импульса. С умозрительной (spekulativen) точки зрения я чувствую неестественность геометрии, априори положенной в основу теории; я не могу себе представить, какая сила могла заморозить локальные реперы в их скрученном положении по отношению друг к другу. Еще один сильный аргумент против теории — это закон сохранения момента импульса. Он ... эквивалентен требованию инвариантности, которое предполагает локальные реперы в различных мировых точках независимыми друг от друга и свободно вращаемыми. Далее, в эйнштейновской геометрии имеется два вида прямых, или геодезических, связанных либо с бесконечно малым параллельным переносом Леви-Чивиты, либо с далеким параллелизмом. В природе нет никаких указаний на это удвоение свойства инерция» [17, с. 56].

³² В конференции участвовали также некоторые ведущие советские и зарубежные теоретики: Я. И. Френкель, Л. Д. Ландау, В. Р. Бурсиан, В. А. Амбарцумян, П. Иордан, В. Гейтлер и другие, активно работавшие в области квантовой физики.

к определенному мнению как относительно выбора уравнений поля, так и относительно успеха всего этого варианта» [там же].

Комментируя это письмо спустя почти полвека после описываемых событий, один из участников этих событий — Д. Д. Иваненко заметил: «Однако, несмотря на неудачу в достижении поставленной цели, эта работа Эйнштейна (имеется в виду весь цикл его исследований по единой теории поля с абсолютным параллелизмом.— В. В.) сыграла важную положительную роль, косвенно содействуя установлению теории спиноров в римановой геометрии (особенно в упомянутых трудах Вейля, Фока и Иваненко и более поздних работах Э. Шредингера, Л. Инфельда и Б. Ван дер Вардепа и др. [314].— В. В.), обсуждению проблемы системы отсчета (см., например, монографию Родичева [284] и Владимирова [315].— В. В.), развитию теории калибровочных полей (см. гл. 6.— В. В.), решению ряда конкретных задач ОТО. Действительно, в этой работе впервые для описания гравитации были применены не 10 коэффициентов метрики $g_{\mu\nu}$, но «корни» из них, или 16 тетрадных коэффициентов h_{μ}^{α} ($g_{\mu\nu} = h_{\mu}^{\alpha} h_{\nu}^{\beta}$): они связывают оси ортогонального репера в плоском касательном пространстве («слое») ($\alpha = 1, 2, 3, 4$) с осями гаусс-римановой криволинейной системы координат в пространстве-времени (в «базе») ($\mu = 1, 2, 3, 4$). Тетрады оказались весьма полезными и в самой риман-эйнштейновской геометрии ОТО...» [279, с. 71]. К тому же, как подчеркнул Иваненко, геометрия абсолютного параллелизма была одним из первых примеров использования пространств с кручением, которые и сейчас не утратили своего значения при анализе возможных расширений ОТО.

Когда обнаружился живой интерес математиков к новой единой теории, Эйнштейн решил написать ее изложение для журнала «Math. Annalen» (соответствующая статья поступила в редакцию 19 августа 1929 г. [291]). За ней следовал упоминавшийся исторический обзор более ранних геометрических исследований пространств с абсолютным параллелизмом, написанный Э. Картаном [290], которому Эйнштейн выразил особую благодарность. Еще более обстоятельное и ясное рассмотрение теории, также рассчитанное в первую очередь на математиков, было дано Эйнштейном в его докладе, сделанном 8 ноября 1929 г. в Институте А. Пуанкаре в Париже и затем подготовленном для публикации в «Анналах» этого института [316]³³.

³³ 8 ноября 1929 г. Эйнштейн сообщил М. Соловину: «Сегодня в 5.30 прочитал доклад о своей новой теории в Институте А. Пуанкаре» [227, с. 35]. Спустя несколько месяцев он с удовольствием вспоминал эти дни, проведенные в Париже, о чем писал Соловину 4 марта 1930 г.: «Моя теория поля имеет хорошие успехи. В этой области усиленно работает Картан. Я сам работаю вместе с одним математиком (В. Майером из Вены), замечательным человеком, который уже давно получил бы профессорскую кафедру, не будь он евреем. Я часто вспоминаю о прекрасных днях, проведенных в Париже...» [317, с. 552]. Совместно с Майером Эйнштейн выполнял ряд исследований как по теории с абсолютным параллелизмом, так и по пятимерию (см. начало следующего раздела).

В этих работах Эйнштейн придерживается развитой ранее точки зрения на способ получения полевых уравнений, минуя использование вариационного принципа. В результате особенно важным становится вопрос о совместности полевых уравнений, которому он уделяет большое внимание. Отказ от применения вариационного принципа затрудняет процесс получения уравнений поля, делает его более произвольным. Эйнштейн при этом руководствовался следующими соображениями: «Отправным пунктом мне послужили тождественные соотношения, которым удовлетворяют величины $\Lambda_{\mu\nu}^\alpha$. В общем случае обнаружение определенных тождественных соотношений может явиться большим подспорьем в выборе уравнений поля, подсказывая возможный характер искомого уравнений. Исследование равенств должно, следовательно, предшествовать выбору системы уравнений. Но априори неизвестны величины, между которыми следует искать соотношения» [316, с. 296].

Напрашивается, рассуждает далее Эйнштейн, выбор в качестве полевых уравнений

$$\Lambda_{\mu\nu}^\alpha = 0. \quad (56)$$

Но это уравнение столь же ограничительно, как обращение в нуль тензора Римана — Кристоффеля в ОТО; оно означало бы вырождение «закрученного» пространства в евклидово. Затем Эйнштейн, опираясь на тождества для $\Lambda_{\mu\nu}^\alpha$.

$$G_{\mu\nu}^{\alpha\sigma} - F_{\mu\nu}^{\alpha\sigma} - \Lambda_{\mu\nu}^\alpha F_{\nu\sigma} = 0, \quad (57)$$

где $G^{\mu\alpha} \equiv \Lambda_{\mu\nu;\nu}^\alpha - \Lambda_{\mu\nu}^\sigma \Lambda_{\sigma\nu}^\alpha$,

$$F^{\mu\nu} \equiv \Lambda_{\mu\nu;\alpha}^\alpha,$$

последовательно обсуждает следующие варианты полевых уравнений:

$$\Lambda_{\mu\nu;\sigma}^\alpha = 0, \quad (58)$$

далее

$$\Lambda_{\mu\nu;\alpha}^\alpha = 0, \quad (59)$$

либо

$$\Lambda_{\mu\nu;\nu}^\alpha = 0, \quad (60)$$

либо система уравнений (59) и (60).

Основной критерий при выборе наиболее подходящего варианта — совместность исследуемых систем уравнений, а именно условие «избыток числа уравнений над числом тождественных соотношений должен равняться числу переменных минус n », т. е. $n^2 - n$. Так, система (59) — (60) оказывается с этой точки зрения неудовлетворительной, поскольку число соответствующих уравнений слиш-

ком велико: шесть уравнений (59) и 16 уравнений (60) ($n^2 - n = 16 - 4 = 12$, и поэтому должно существовать еще 10 тождеств, которые не удастся найти). «Так становится понятным, — подчеркивает Эйнштейн, — каким образом условие совместности позволяет нам эффективно ограничить произвол в выборе уравнений поля» [316, с. 298].

Тождество же (57) навело его на мысль выбрать в качестве уравнений поля

$$G^{\mu\alpha} = 0, \quad (61)$$

$$F^{\mu\alpha} = 0. \quad (62)$$

Эта система близка к системе (59)—(60), но она позволяет, как выясняется, найти необходимое число тождественных соотношений, обеспечивающее ее совместность³⁴.

Получив затем уравнения Пуассона (для гравитации) и уравнения Максвелла (для электромагнитного поля) как первое приближение уравнений (61)—(62), Эйнштейн сам сделал несколько критических замечаний в адрес последнего варианта своей теории: «При современном состоянии теории невозможно судить о том, верна ли интерпретация величин, представляющих поле. Поле в действительности определяется в первую очередь своим поведением в первом порядке воздействия на частицы. Однако закон этого воздействия еще неизвестен. Для его открытия потребовалось бы проинтегрировать уравнения поля, что до сих пор сделать не удалось». Это ведет к тому, подчеркивал Эйнштейн, что «полученные до сих пор результаты не дают возможности экспериментальной проверки предсказаний теории... Первая трудность, с преодоления которой должно будет начаться развитие теории, — резюмировал Эйнштейн, — заключается в нахождении лишенных особенностей интегралов, удовлетворяющих дифференциальным уравнениям поля и способных дать правильное решение проблемы частиц и их движения.

³⁴ С помощью тождества

$$\Lambda_{\mu\nu;\alpha} - \left(\frac{\partial \varphi_{\mu}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \varphi_{\nu}}{\partial x^{\mu}} \right) = 0 \quad (\Lambda_{\mu\alpha} = \varphi_{\mu})$$

система (62) приводится к четырем уравнениям

$$F_{\mu} = 0;$$

здесь

$$F_{\mu} = \varphi_{\mu} - \frac{\partial \ln \psi}{\partial x^{\mu}},$$

где ψ — новая скалярная переменная. В результате мы получаем 16 уравнений (61) и четыре уравнения (62), итого 20, для 17 переменных (семпадатой является скаляр ψ), из которых четыре произвольны. Поэтому число тождеств должно быть равно $20 - (17 - 4) = 7$. Четыре соотношения известны, это тождества (57). Остается найти еще три, которые, как показывает Эйнштейн, действительно существуют. Физический или даже геометрический смысл этих тождеств не был ясен, и здесь он возлагал надежды на помощь математиков, прежде всего Картана, Вайценбега и Эйзенхарта [316, с. 300].

Только после этого сравнение с экспериментом станет возможным» [316, с. 306].

Вместе с тем нетривиальная геометрическая структура теории («оснащение» точечного многообразия множеством ортореперов, а также наличие абсолютного параллелизма и кручения) и возможность получения совместной системы уравнений единого поля, которая в первом приближении давала классические уравнения гравитации и электродинамики, позволяли надеяться на успех. Эйнштейну импонировала еще одна особенность теории: «Очарование изложенной здесь теории для меня заключается в ее единстве и *большой (но разрешенной) степени переопределенности переменных поля* (подчеркнуто нами.— В. В.)» [291, с. 320]. Можно вспомнить, что именно с переопределенностью полевых уравнений Эйнштейн связывал надежду на получение частицеподобных решений, обладающих квантовыми чертами.

В декабре Эйнштейн воспользовался предложением Картана, чтобы упростить доказательство совместности полевых уравнений (61), (62). С января 1930 г. Эйнштейну стал помогать математик В. Майер, с которым Эйнштейн написал ряд работ по ЕГТП. В феврале 1930 г. они получили в результате весьма сложных вычислений два строгих статических решения полевых уравнений (61)—(62), соответствующих полю электрически заряженного шара с ненулевой массой и полю произвольного числа покоящихся нейтральных материальных точек. Последнее не имеет аналога в ОТО. Ему, как замечает Эйнштейн, «в природе ничего не соответствует» [318, с. 340]. Это, однако, по его мнению, не могло служить аргументом против теории, так как в отличие от ОТО из полевых уравнений не следовал закон движения сингулярностей. Но найденные решения не были и доводом в пользу физической применимости теории. Таким доводом было бы отыскание несингулярных статических сферически-симметричных решений, которые можно было бы интерпретировать как электроны и протоны. При этом оставался нерешенным и вопрос об уравнениях движения. Безуспешные попытки решения полевых уравнений типа (61), (62), серьезные изъяны теории, отмеченные и самим Эйнштейном, и Вейлем, и Эддингтоном, порождали у Эйнштейна все большие сомнения в правильности и перспективности концепции абсолютного параллелизма. Не позже осени 1930 г. он начинает вместе с В. Майером разрабатывать новый вариант ЕГТП, связанный с пятимерием, не отказавшись окончательно от теории с абсолютным параллелизмом.

Первое сообщение об очередном возврате к пятимерию было опубликовано в журнале «Science» и было датировано 30 октября 1930 г. [319]. «Теория абсолютного параллелизма», на создание и разработку которой было затрачено столько усилий, теперь квалифицировалась как «неверный путь» [319, с. 347]. Правда, исследование математических аспектов теории с абсолютным параллелизмом продолжалось и во второй половине 1930 г., и даже в 1931 г. [320]. По-видимому, последней работой, относящейся к концепции абсолютного параллелизма, был академический доклад, па-

писанный совместно с Майером и представленный на заседании физико-математического отделения 23 апреля 1931 г. [321]. Авторы модифицировали систему уравнений поля так, чтобы она согласовывалась с некоторым дифференциальным тождеством типа соотношения (57), но значительно более громоздким. Это векторное тождество и система уравнений содержали члены, зависящие от $A_{\mu\nu}^{\alpha}$, $F_{\alpha;\mu}$ и их производных до второго порядка включительно с произвольными коэффициентами, которые определялись из условий совместности. В результате авторы получили четыре типа систем уравнений, совпавших частично с системами, исследованными в предыдущих работах.

Таким образом, объединение гравитации и электромагнетизма на основе геометрии с абсолютным параллелизмом столкнулось с рядом значительных трудностей: отсутствие физического оправдания для абсолютного параллелизма, неоднозначность системы полевых уравнений, неясности в вопросе об уравнениях движения, отсутствие точных решений, в частности частицеподобных, проблематичность построения разумной космологической схемы и т. д. Все более утонченные исследования проблемы совместности системы полевых уравнений, проводимые Эйнштейном и Майером, также не дали каких-либо ощутимых результатов, и Эйнштейн с конца 1930 г. постепенно теряет интерес к концепции абсолютного параллелизма.

Тем не менее разработка этого направления, как мы видели, не оказалась бесплодной. Это была одна из первых единых теорий поля, основанных на геометрии с ненулевым кручением. Теория Эйнштейна опиралась на тетрадный формализм, который ранее не использовался в ОТО и единых теориях поля. Этот формализм тогда же был применен Вейлем, а также Фоком и Иваненко для описания взаимодействия фермионов с гравитационным полем (распространение теории спиноров на риманову геометрию). Всплеск тетрадный формализм был взят на вооружение и при решении классических задач ОТО (например, проблемы энергии). В следующей главе мы увидим, как описанные работы Эйнштейна, Вейля, Фока и Иваненко и других оказались одним из важных этапов формирования калибровочной концепции поля.

Своеобразным злом единой теории поля с абсолютным параллелизмом явились работы Эйнштейна и Майера по теории спиноров, выполненные в 1932—1934 гг. [322—325]. Единая теория Эйнштейна существенно повлияла на теорию спиноров в римановом пространстве (Г. Вейль, В. А. Фок и Д. Д. Иваненко, Э. Шредингер, Б. Л. Ван дер Варден и Л. Ипфельд, В. Баргман и др.) [314] и тем самым на решение проблемы введения уравнения Дирака в ОТО, а эти работы, в свою очередь, стимулировали интерес Эйнштейна к спинорам, уравнению Дирака и, таким образом, к релятивистской квантовой механике. На этот раз, по-видимому, впервые Эйнштейн, оставаясь на позициях программы ЕГТП, заинтересовался ее выходами к квантовой теории. Начиная с теории Вейля (прежде всего с попыток связать ее с квантовой механикой, пред-

принятых Шредингером, Ф. Лондоном и др.) чуть ли не каждая ЕГТП рассматривалась как путь к преодолению пропасти между ОТО и квантовой механикой (и соответственно между квантово-теоретической и полевой геометрической программами). При этом разработка единых теорий поля нередко действительно оказывала стимулирующее, эвристическое воздействие на развитие квантовой теории, хотя иногда не сразу и косвенным образом.

Теория Вейля сыграла некоторую роль в генезисе волновой механики и формировании калибровочной концепции поля. В русле аффинных теорий поля впервые была сформулирована идея зарядовой симметрии, столь важная в квантовой теории поля. Пятимерие привело к установлению релятивистского волнового уравнения для бесспиновых частиц и было существенным этапом при разработке понятия калибровочной симметрии. Теория с абсолютным параллелизмом непосредственно повлияла и на развитие калибровочной концепции поля, и на решение проблемы введения уравнения Дирака в ОТО.

Эйнштейн, как правило, недооценивал эти естественным образом возникающие мостики между конкурирующими программами, хотя и не переставал думать о радикальном сведении квантовой механики к принципам полевой геометризованной программы, стремясь получить квантовые черты поведения частиц как соответствующие свойства несингулярных решений уравнений одного поля. В случае же с теорией дальнего параллелизма и сам Эйнштейн всерьез заинтересовался ее «квантовыми выходами». Результатом этого интереса явились четыре упомянутые работы по спинорам и полувекторам, опубликованные в 1932—1934 гг. вместе с Майером. Они в большой мере носили математический характер.

Впрочем, во второй работе из этой серии авторы набросали эскиз теории, лагранжиан которой наряду со скалярной кривизной и максвелловской частью включал дираковскую часть. Разумеется, это не было объединением в духе программы ЕГТП, хотя и означало возможность общерелятивистского рассмотрения частиц, описываемых уравнением Дирака. Авторы подчеркивали, несмотря на использование ими уравнения Дирака, классический, неквантовый характер этого объединения: «К такой теории поля нельзя применить борновскую вероятностную интерпретацию ψ -поля. Следовательно, вопрос о том, допускает ли вообще такая теория непротиворечивую интерпретацию атомистической структуры материи, остается пока открытым» [323, с. 590].

В последней работе «спинорного цикла», опубликованной в 1934 г., уже после переезда в Пристон, вновь появилась геометрия с абсолютным параллелизмом [325]. Эйнштейн и Майер отказались от реперного формализма при описании полувекторов (и спиноров) и показали, что при использовании лишь гауссовых систем координат полувекторы ведут себя как векторы, для которых ковариантное дифференцирование определяется не только римановой метрикой, но и величинами, характерными для геометрии с абсолютным параллелизмом.

Эйнштейновская теория 1928—1930 гг., как мы видели, брала за основу не кривизну, а кручение, характеризуемое тензором 3-го ранга. Обращение в нуль кривизны (в том числе и сегментарной кривизны, или кривизны гомотетии, которая отсутствует в римановой геометрии, но отлична от нуля в геометрии Вейля), дающее возможность ввести абсолютный параллелизм, является в этой теории важным ограничением, облегчающим поиски полевых уравнений. Геометрии аффинной связности с ненулевым кручением с начала 20-х годов рассматривались Картаном, Схоутоном, Вайценбеком. А незадолго до теории Эйнштейна пространства с кручением использовались для построения единых теорий поля французским математиком А. Эйро (H. Eyrard) (1926) [326] и будущим соавтором Эйнштейна Л. Инфельдом (1928) [327—329]. Но эти теории оказались недостаточно конструктивными, так как не содержали ограничительных условий типа абсолютного параллелизма, и тем самым произвол в выборе полевых уравнений был слишком велик.

Эйро использовал геометрию с ненулевыми кривизнами и кручением. В картановской классификации это соответствовало наиболее общему случаю: $\Omega_{\mu}^{\nu} \neq 0$, $\Omega \neq 0$, $\Omega^{\mu} \neq 0$. Инфельд предполагал, что при наличии римановой кривизны и кручения длина переносимых векторов не меняется ($\Omega = 0$), но и это условие не приводило к теории более реалистической, чем предшествовавшие единые теории [22]. Все же не следует забывать, что первые единые теории поля, основанные на геометрии аффинной связности с ненулевым кручением, были развиты до эйнштейновской теории с абсолютным параллелизмом. Это направление не получило большого развития (см., впрочем, серию работ итальянского теоретика П. Странео [22]).

НОВЫЙ ВАРИАНТ ПЯТИМЕРИЯ (ЭЙНШТЕЙН И МАЙЕР, 1931—1932 гг.)

В заключение коснемся пятимерной теории Эйнштейна — Майера, последней единой теории берлинского периода, на которую, впрочем, Эйнштейн не возлагал больших надежд. В лекции «Современное состояние теории относительности», читанной в Физическом институте Венского университета 14 октября 1931 г., Эйнштейн весьма пессимистически оценивал многолетние усилия по созданию единой теории поля: «Попытки найти единые законы материи, породить теорию поля и квантовую теорию не прекращались. Речь идет о том, чтобы найти структуру пространства, удовлетворяющую условиям, выдвигаемым обеими теориями. Результатом оказалось кладбище погребенных надежд» [330, с. 401]. Упомянув о неудаче с концепцией абсолютного параллелизма, Эйнштейн дал короткий набросок очередной модификации пятимерного подхода, «в которой находят свое место и электромагнитные явления, причем архитектурное единство не нарушается... Я и Майер, — продолжал он, — полагаем, что пятое измерение не должно появляться. Оно используется только математически для построения компонент, применение которых дает уравнения для электромагнитных явлений...»

[330, с. 401—402]. Но и эта теория как будто не приводила к успеху: «Однако надежда не сбылась. Я полагал, что если бы удалось найти этот закон (т. е. уравнения единого поля.— В. В.), то получилась бы теория, применимая к квантам и материи. Но это не так. Построенная теория, по-видимому, разбивается о проблему материи и квантов. Между обеими идеями все еще сохраняется пропасть» [330, с. 402].

С начала 30-х годов, еще до теории Эйнштейна — Майера, возникает новая волна исследований по пятимерным теориям, связанным с проективно-геометрической интерпретацией пространства-времени. С 1930 по 1933 г. появилось более десятка работ по «проективной теории относительности», иными словами, по проективной трактовке пятимерной теории Калуцы — Клейна. По-видимому, первой работой «проективного направления» была статья принстонских математиков О. Веблена и Б. Гоффмана, полученная редакцией «Phys. Rev.» в июне 1930 г. и опубликованная в сентябрьском номере этого журнала [332]. За ней последовали другие работы этих авторов, статьи Схоутена и Д. ван Данцига, Паули и др. Формализм однородных пятимерных координат позволял простым и математически элегантно образом сформулировать схему Калуцы — Клейна. Особенной прозрачностью в этом отношении отличалась работа Паули [333], впоследствии почти целиком воспроизведенная в первом издании «Теории поля» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица (§ 100)³⁵.

Вначале казалось, что проективная схема является более общей, чем схема Калуцы — Клейна, и что последовательная разработка этого направления сможет привести к решению проблемы единой теории поля. Однако в начале 40-х годов П. Бергман доказал эквивалентность обеих формулировок [12].

Эйнштейн и Майер изложили свою пятимерную теорию в двух работах, представленных на заседаниях Прусской академии наук 22 октября 1931 г. [335] и 14 апреля 1932 г. [336]. Они исходили из того, что реальное пространство-время является четырехмерным, но физические величины описываются векторами и тензорами, индексы которых принимают значения от 1 до 5, а компоненты являются функциями только четырех координат. Фактически они использовали реперный формализм, разработанный Эйнштейном в теории с абсолютным параллелизмом. Только в каждой точке четырехмерного риманова пространства они рассматривали не тетраду, а пятимерное линейное векторное пространство («пентаду»). Таким образом, был использован пятимерный тензорный анализ без введения пятимерного пространства. В результате воспроизводились

³⁵ Правда, Ландау и Лифшиц не считали проективно-пятимерный способ единой формулировки уравнений гравитации и электродинамики нетривиальной единой физической теорией поля. Они подчеркивали, что «речь идет... отнюдь не о каком-либо сведении электромагнитного поля к метрическим свойствам пространства-времени, как это имеет место для гравитационного поля», что «метрика реального пространства и времени... остается такой же, как и раньше» [334, с. 266].

все результаты теории Калуцы — Клейна и как будто обходились типичные для этой теории трудности, связанные с неплаблюдательностью пятимерного континуума, неоправданностью условия цилиндричности и отсутствием физического истолкования g_{55} -компоненты метрического тензора. В письме к Бессо от 30 октября 1931 г. Эйнштейн следующим образом характеризовал этот подход: «Вся хитрость — во введении 5-векторов a^σ в четырехмерном пространстве, связанных с пространством некоторым линейным механизмом. Пусть a^s — 4-вектор, соответствующий a^σ , тогда существует следующая зависимость:

$$a^s = \gamma_{\sigma}^s a^\sigma.$$

Следовательно, в нашей теории имеют смысл лишь такие уравнения, которые выполняются независимо от соотношений, вводимых с помощью γ_{σ} . Далее мы определяем бесконечно малый сдвиг 5-векторов a^σ в четырехмерном пространстве, а также соответствующую 5-кривизну и отсюда получаем уравнение поля» [227, с. 5—6].

Эйнштейн не питал особых надежд на новый вариант пятимерия. Об этом он говорил в цитированном выше венском докладе за неделю до заседания Прусской академии, на котором была представлена 1-я часть совместной работы Эйнштейна и Майера. При этом бесперспективность теории заключалась, по мнению Эйнштейна, в том, что она «разбивается о проблему материи и квантов». В том же письме к Бессо Эйнштейн вновь подчеркивал бессилие новой теории при решении задачи-максимум программы ЕГТП: «Едиственное, что удалось в нашем исследовании, — объединить гравитацию и электричество, причем уравнения последнего в точности совпадают с уравнениями Максвелла для пустого пространства... Никакого физического прогресса при этом не достигается, разве что становится ясно, что уравнения Максвелла — не только первое приближение, но и рационально обоснованы столь же хорошо, как и уравнения гравитации для пустого пространства. Ни плотности заряда, ни плотности массы не существует, и все великолепие рушится, мы имеем дело уже с квантовой проблемой, которую до сих пор еще никому не удавалось разрешить с позиций теории поля (так же, как никому не удавалось построить теории относительности, исходя из квантовой механики)» [227, с. 5]³⁶.

Через полгода, в середине апреля 1932 г. Эйнштейн с Майером представили вторую часть работы, в которой рассматривался «вопрос, не допускает ли рассмотренная... пространственная структура обобщения, приводящего к уравнениям электромагнитного поля с отличной от нуля плотностью электрического заряда» [336, с. 387]. Авторы, используя некоторые результаты первой части, показывают, «что имеется совершенно естественное обобщение такого рода,

³⁶ Столь же пессимистически заканчивалась статья Эйнштейна и Майера (часть 1): «Изложенная здесь теория приводит единым путем к уравнениям гравитационного и электромагнитного полей. Однако она ничего не дает для понимания природы корпускул, как и для понимания установленных в квантовой механике результатов» [335, с. 386].

которое позволяет получить совместную систему уравнений поля». Однако дальше обсуждения чисто математических аспектов, связанных с получением обобщенной системы уравнений поля и доказательством их совместности, дело не пошло. «Вопрос о пригодности этой системы уравнений к действительности здесь еще не рассматривается», — подчеркивали Эйнштейн и Майер в конце введения к работе [там же].

ЭСКИЗ ДАЛЬНЕЙШИХ УСИЛИЙ ЭЙНШТЕЙНА (ПРИНСТОН, 1933—1955 гг.)

Во втором полугодии 1932 г., названного В. Вайскопфом «фантастическим годом в физике» из-за фейерверка выдающихся открытий, сделанных в этом году в физике ядра и элементарных частиц [337, с. 22], Эйнштейн вместе с Майером разрабатывал теорию спиноров. В письме от 21 октября 1932 г. Эйнштейн сообщал Бессо: «Вместе с моим д-ром Майером я работал над теорией спиноров. Мы уже в состоянии объяснить математические зависимости. До понимания физической стороны дела еще далеко, гораздо дальше, чем сейчас думают. Как и прежде, я особенно убежден в том, что попытка создания существенно статистической теории обречена на провал» [227, с. 7]. Эйнштейн и Майер представили свою работу «Полувекторы и спиноры» в Прусскую академию 10 ноября 1932 г. [322]. Это была последняя работа Эйнштейна, доложенная на заседании Прусской академии наук.

После создания Дираком релятивистской квантовой теории электрона (1928) особую актуальность приобрел вопрос о математической природе и физическом смысле спинорных величин³⁷. Как раз в 1932—1933 гг. в «Докладах Прусской академии наук» были опубликованы важнейшие исследования по теории спиноров, выполненные Шредингером (февраль 1932 г.), В. Баргманом (июль 1932 г.), Л. Инфельдом и Ван дер Вардепом (январь 1933 г.) [338—340]. К программе ЕГТП это исследование Эйнштейна и Майера как будто не имело прямого отношения, хотя проблемы теории Дирака и спиноров и эйнштейновская единая теория с абсолютным параллелизмом, как мы видели, были тесно связаны между собой.

В следующей работе по теории спиноров (доложена на заседании Амстердамской академии наук 27 мая 1933 г.)³⁸ Эйнштейн и

³⁷ По свидетельству Б. Л. Ван дер Вардена, автора ряда первых исследований по спинорам, само это название было введено П. Эренфестом, который был также одним из главных инициаторов систематической разработки спинорного анализа [314, с. 273].

³⁸ В начале 1933 г. Эйнштейн вернулся из США в Европу. Закончив чтение лекций в Оксфорде и Кембридже, он поселился на бельгийском курорте Ле Кок-Сюр-Мер недалеко от Остенде. Еще в США Эйнштейн сделал заявление, опубликованное в газете «Нью Йорк Уорлд Телеграм» 11 марта 1933 г., в котором говорилось о его нежелании возвращаться в нацистскую Германию. За этим последовали его письма в Прусскую и Баварскую академии наук (5, 12, 21 апреля), в которых он заявлял о своем выходе из этих учреждений.

Майер затронули проблему вывода основных полевых уравнений из единого вариационного принципа. При этом, помимо гравитационной и электромагнитной частей лагранжиана, они вводили в рассмотрение «полувекторную» (или «спинорную») компоненту, которая должна была привести к уравнению Дирака. Авторам казалось, что при их подходе «впервые дается объяснение тому, что существуют две электрически заряженные элементарные частицы с разными массами и электрическими зарядами противоположного знака» [323, с. 590].

С начала октября 1933 г. Эйнштейн обосновывается в Принстоне. В 1933—1934 гг. он еще продолжает вместе с Майером разрабатывать спинорную тематику [325]. Затем возвращается к проблеме частиц и уравнений движения в ОТО: истолкование частиц как «мостов», соединяющих два различных «листа» пространства (1935—1936 гг., совместно с Н. Розеном) [341], классический вывод уравнений движения из уравнений поля (1938—1940 гг., совместно с Л. Инфельдом и Б. Гоффманом) [231] и т. д. И только в 1938 г. его взор снова обращается к единым геометризованным теориям поля и снова к пятимерному варианту ЕГТП, который он вместе с П. Баргманом, а затем еще и с В. Баргманом продолжал изучать до 1943 г. Доказательство несуществования регулярных стационарных решений пятимерной теории поля, проведенное В. Баргманом, а также Эйнштейном и Паули [343], подвело итог этому периоду эйнштейновских исследований по ЕГТП и послужило главным мотивом для отказа от дальнейшей работы в этом направлении.

Разочаровавшись в пятимерии, Эйнштейн последнее десятилетие своей жизни посвятил изучению различных возможностей четырехмерного обобщения метрического тензора g_{ik} : замена риманового g_{ik} бивекторным полем $g_{ik}^{\alpha\beta}$, зависящим от координат двух точек (1944 г., совместно с В. Баргманом) [344]; переход к комплексному эрмитово-симметричному обобщению g_{ik} ($g_{ik} = s_{ik} + ia_{ik}$) (1945—1948 гг., отчасти совместно с Э. Страусом); использование несимметричного g_{ik} (1950—1955 гг., отчасти совместно с Б. Кауфман). Первые два варианта довольно быстро были отвергнуты. Последний же вариант, «релятивистскую теорию несимметричного поля», Эйнштейн разрабатывал до своих последних дней.

Попытки согласовать эту теорию с «принципом неприводимости», введением требований « λ -инвариантности» и транспозиционной симметрии не привели к какому-либо физическому прогрессу.

Оставались в принципе неясными проблемы сингулярностей и граничных условий. Эйнштейн склонялся к мысли о необходимости исключения сингулярностей и постулирования граничных условий. На этих путях он все еще надеялся более тесно связать теорию с квантовой структурой и космологией. Правда, его все больше охватывали сомнения относительно возможности выхода программы ЕГТП на квантовые явления. В Приложении II к пятому изданию «Сущности теории относительности», последней опубликованной ра-

боте³⁹, Эйнштейн писал: «Можно убедительно доказать, что реальность вообще не может быть представлена непрерывным полем. Из квантовых явлений, по-видимому, следует, что конечная система с конечной энергией может полностью описываться конечным набором чисел (квантовых чисел). Это, кажется, нельзя совместить с теорией континуума и требует для описания реальности чисто алгебраической теории. Однако сейчас никто не знает, как найти основу для такой теории» [345, с. 873].

Но как раз в это время Янг и Миллис (их ставшая классической статья появилась в 1954 г. [346]) открыли новую возможность развития полевой программы, которая была реализована в течение последующих 20—25 лет усилиями многих десятков исследователей. Именно на этом пути возникла современная калибровочная трактовка взаимодействий элементарных частиц, включающая теорию электрослабых взаимодействий, квантовую хромодинамику, теорию супергравитации. Заметим при этом, что калибровочные теории допускают элегантную геометрическую формулировку на языке теории расслоенных пространств.

ВЫВОДЫ

Десятилетние усилия Эйнштейна на пути к полемому геометрическому синтезу физики, как, впрочем, и последующие его исследования в этом направлении (со времени его переезда в Принстон до самой смерти), так и не привели к решающему успеху. В 20-х годах, особенно до возникновения квантовой механики, большинство физиков с надеждой и интересом следили за работами по ЕГТП. Квантовая механика открыла новые богатые возможности перед теоретической физикой. На фоне быстро прогрессирующей квантово-теоретической программы ограниченные математические успехи ЕГТП-программы, так и не вышедшей на экспериментально-эмпирический уровень, все больше отходили на второй план. Начало 30-х годов (поворотный 1932 год и последующие годы) ознаменовалось блистательным прорывом в области фундаментальной физики, связанным, с одной стороны, с открытиями в ядерной физике и обнаружением новых элементарных частиц (нейтрон, позитрон и др.), а с другой — с разработкой квантово-полевой теории основных физических взаимодействий (квантовой электродинамики и первых вариантов теорий сильного и слабого взаимодействия). Исследование ЕГТП в начале 30-х годов привлекло внимание главным образом специалистов по дифференциальной геометрии. Даже Эйнштейн до конца 30-х годов прерывает свои занятия единичными теориями поля. Только в 1938 г. он возобновляет свою работу по ЕГТП. Ведущих же теоретиков волнуют проблемы квантовой теории поля и элементарных частиц, и программа ЕГТП в 40-х и

³⁹ Эта книга увидела свет в 1955 г., в год смерти Эйнштейна.

50-х годах выглядит в глазах большинства явным анахронизмом.

Возвращаясь к рассмотренному десятилетию, отметим основные этапы в развитии эйнштейновских исследований единых теорий поля: 1923—1925 гг.— аффинные теории поля и концепция переопределения полевых уравнений (выдвинутая в целях решения задачи-максимум программы ЕГТП); 1925—1926 гг.— аффинно-метрические теории и последующий кризис полевой геометрической программы на фоне триумфа квантово-теоретической программы; 1927 г.— возврат к пятимерной теории в духе теории Калуцы и разработка концепции выводимости уравнений движения из уравнений поля; 1928—1931 гг.— теории с телепараллелизмом; 1931—1932 гг.— новый вариант пятимерной теории (теория Эйнштейна — Майера). И все эти многочисленные изощренные дифференциально-геометрические схемы оказались физически неэффективными. «Кладбище погребенных надежд» — таков был итог десятилетнего развития ЕГТП, и прежде всего усилий самого Эйнштейна, по его собственной оценке.

Конечно, начиная с 1923 г. Эйнштейн был признанным лидером программы ЕГТП (он принял эстафету от Вейля), и указывая последовательность единых теорий в значительной мере отражает основную направленность в поисках решения проблемы полевого геометрического синтеза физики. Но, поскольку реального физического прогресса не было, а количество математических схем становилось все больше, и притом из-за слабой связи теоретических построений с опытом большинство этих схем нельзя было отвергнуть окончательно, многие варианты ЕГТП разрабатывались одновременно. Единые теории, забракованные Эйнштейном, продолжали разрабатываться другими. В начале 30-х годов в центре внимания находились теории с телепараллелизмом и пятимерные, в частности проективные, схемы, но продолжали разрабатываться и аффинные теории, и различные варианты теорий с кручением (теории Стравно, Инфельда и др.).

Освоение арсенала дифференциально-геометрических конструкций, открытого трудами Картана, Скоутена, Эйзенхарта и др., проходило не путем систематического перебора различных вариантов, а, как правило, на основе интуитивных соображений физического и геометрического характера. Кроме того, иногда выбор той или иной схемы оказывался связанным с исследованиями в русле квантово-теоретической программы. Так, всплеск интереса к пятимерным теориям в 1926—1927 гг. был вызван открытием квантовой механики и, в частности, интерпретацией квантового релятивистского скалярного волнового уравнения как уравнения Даламбера в пятимерном римановом пространстве.

«Математика хороша и прекрасна», как писал Эйнштейн в письме к Вейлю, имея в виду геометрические структуры единых теорий, но изобилие теоретических конструкций и трудности их приспособления к реальности делали проблему выбора подходящей схемы крайне сложной. Программных критериев для этого было недостаточно. Наряду с весьма расплывчатыми и субъективными соображе-

ниями простоты и эстетической привлекательности, Эйнштейн использовал в качестве одного из основных критериев жизнеспособности ЕГТП наличие неособых центрально-симметричных статических решений полевых уравнений. После доказательства существования таких решений для полного решения задачи-максимум программы ЕГТП можно было бы, согласно Эйнштейну, тем или иным способом (например, за счет переопределения системы полевых уравнений) получить описание квантовых свойств частиц и электромагнитного поля. Но почти во всех использованных Эйнштейном теоретических схемах неособые частицеподобные решения отсутствовали, и это было одной из главных причин отказа от этих схем.

Отметим еще несколько особенностей эйнштейновских исследований по проблеме ЕГТП. Если на рубеже и в начале 20-х годов Эйнштейн большое внимание уделял собственно физическим аспектам теории и поиску новых экспериментальных выходов (достаточно вспомнить его критику теории Вейля и его настойчивые поиски ключевого экспериментального факта при разработке аффинных теорий), то в дальнейшем экспериментально-эмпирические аспекты играли в его разработках все меньшую роль. Другой характерной чертой было четкое противопоставление полевой геометрической программы и программы квантово-теоретической. Он не считал возможным введение в единые полевые теории квантовых представлений и понятий в какой бы то ни было форме. «Все квантовое» должно было, по Эйнштейну, получиться автоматически, как премия за удачный выбор геометрической конструкции. Поэтому он не замечал или явно недооценивал некоторые весьма интересные работы, в которых обнаруживались разнообразные петривиальные связи единых теорий с понятиями и формализмами квантовой теории. Например, он не придавал никакого значения разнообразным квантово-теоретическим выходам пятимерных схем и теории с абсолютным параллелизмом. Еще одна особенность работ Эйнштейна по единым теориям поля — это чуть ли не периодические возвращения к некоторым, ранее забракованным вариантам (правда, как правило, с теми или иными модификациями). Так, пятимерие привлекало его внимание в 1921—1922 гг., 1927 г., 1931—1932 гг. и, выходя за пределы рассмотренного десятилетия, в 1938—1943 гг.

На примере эйнштейновских работ по ЕГТП мы обнаруживаем заметное влияние полевой геометрической программы на исследования в области как теории гравитации, так и квантовой теории, хотя, как мы отмечали, Эйнштейн часто не обращал особого внимания на эту сторону проблемы. Строгое доказательство зарядовой симметрии любой обшеквариантной теории поля (в рамках работ по аффинным и аффинно-метрическим теориям), разработка вариационного метода с независимым варьированием метрики и аффинной связности (метод Палагани — в аффинно-метрических теориях), развитие идеи переопределения полевых уравнений и вопроса о выводимости уравнений движения материи (частиц) из уравнений поля (в связи с обсуждением задачи-максимум программы ЕГТП), разработка тетрадного и

спинорного формализма в ОТО, введение уравнения Дирака в ОТО и использование пространств с кручением (в связи с теорией с абсолютным параллелизмом) — вот далеко не полный список результатов, полученных либо самим Эйнштейном в его работах по ЕГТП, либо отчасти и другими исследователями на основе этих работ и сыгравших определенную роль в развитии и самой релятивистской теории тяготения, и квантовой теории. В следующей главе будут более детально рассмотрены эвристические воздействия программы ЕГТП на возникновение и развитие квантовой теории (как квантовой механики, так и квантовой теории поля).

Глава шестая

Роль единых геометризованных теорий поля в генезисе и развитии квантовой теории

ВВЕДЕНИЕ

В главе 4 уже было подчеркнуто, что в начале 20-х годов, еще до возникновения квантовой механики, квантовая теория вышла на уровень глобальной исследовательской программы или по крайней мере прообраза такой программы. Несмотря на наличие двух направлений в разработке квантовой теории (теория излучения и теория атома) и известное их противостояние, к середине 20-х годов постепенно все больше выявляются характерные черты квантово-теоретической программы, резко контрастирующие с особенностями программы ЕГТП: дискретность, вероятностный характер причинности, «материальная» (негеометрическая!) природа фундаментальных сущностей и т. д. (см. гл. 4)¹. Как известно, квантовая механика возникла на пути развития именно квантово-теоретической программы, при этом оба направления оказались существенными в ее генезисе. В предыдущей главе мы видели, как программа ЕГТП после возникновения квантовой механики стала постепенно отходить на задний план. Создание же основ релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики и открытие ряда новых элементарных частиц и новых типов взаимодействия уже в начале 30-х годов еще больше обнажило трудности и затянувшуюся бесплодность геометрической полевой программы.

Тем не менее исследования по ЕГТП продолжались. Наиболее постоянным приверженцем и лидером программы продолжал оставаться Эйнштейн, хотя время от времени и другие крупные теоретики возвращались к полевым геометризованным концепциям (Э. Шредингер, Паули, П. Йордан, П. Бергман, О. Клейн и др.). Конечно, в сравнении со многими выдающимися достижениями квантово-теоретической программы, направление единых геометризованных теорий поля представляется оторванным от живого дерева физики и почти бесплодным. В начале же 20-х годов, особенно после недавнего

¹ Все же многие приверженцы первого направления квантово-теоретической программы не разделяли полностью этих установок. Они считали недопустимым отказ от принципов пространственно-временного континуального описания, причинности, законов сохранения; настаивали на использовании дифференциальных уравнений в качестве основного средства описания физических явлений и были уверены в реальности квантов света. Разрабатывая квантовую теорию излучения, некоторые из этих теоретиков на более глубоком уровне оставались в рамках полевой программы.

триумфа ОТО, это направление выглядело теоретически весьма глубоким и перспективным. К тому же немаловажное значение имел научный авторитет Эйнштейна, Гильберта, Вейля, Эддингтона. Многие физики в это время высоко оценивали программу геометризации и рассматривали ОТО или теорию Вейля как идеал фундаментальной физической теории. Поэтому, хотя единые теории сами по себе и не привели к существенному физическому прогрессу, они в 20-х годах могли повлиять на генезис и развитие квантовой теории.

В настоящей главе мы покажем, что такое влияние действительно имело место. ЕГТП, как мы увидим, сыграли заметную роль в генезисе квантовой механики и создании некоторых важных концепций квантовой теории. В предыдущих главах, впрочем, мы уже затрагивали эту проблему. Так, можно вспомнить, что открытие релятивистского скалярного волнового уравнения для бесспиновых частиц (уравнение Клейна — Фока) было связано с пятимерной теорией Калуцы — Клейна (см. гл. 5). Другой важный пример — это «эйнштейновское открытие антиматерии» [347, с. 9], точнее, зарядовой симметрии (см. гл. 5). Мы рассмотрим вопрос о значении теории Вейля в генезисе волновой механики Шредингера и историю формирования понятия калибровочной симметрии и калибровочной концепции электромагнитного поля, сыгравших ключевую роль в развитии современной квантовой теории поля, а также в нынешнем возрождении концепции единой теории поля. Тем самым широко распространенное в 40—70-х годах мнение о полной бесплодности и бесперспективности исследований по ЕГТП оказывается в общем неверным. Усилия Эйнштейна и других приверженцев полевой геометрической концепции не были совершенно напрасными. И дело не только в том, что ЕГТП стимулировали различные области современной дифференциальной геометрии или имели значение, подобное той роли, которую играют в науке отрицательные результаты.

Оказывается, несмотря на то что программа ЕГТП находилась в оппозиции к квантово-теоретической программе, она эвристически воздействовала на последнюю. Более того, при распространении квантово-теоретической программы на полевые процессы (прежде всего на электродинамику) выяснилась фундаментальная роль ряда понятий и концепций, возникших и развитых в русле программы ЕГТП. Некоторые из них стали мощным средством полевого синтеза физики на современном этапе, прежде всего калибровочная концепция поля.

ТЕОРИЯ ВЕЙЛЯ И ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА

В 1921 г. Шредингер стал профессором Цюрихского университета, где еще с 1913 г. работал Вейль [348]. Они стали большими друзьями. В Цюрихе, писал Шредингер, «я наслаждался обществом, дружбой и помощью Германа Вейля, Петера Дебая и других...» [349, с. 345]. Незадолго до приезда в Цюрих Шредингер выполнил несколько важных исследований по ОТО, одно из которых сыграло

существенную роль в разработке проблемы энергии в этой теории (1918 г.) [350]. В том же году им написаны рукописи «Тензорно-аналитическая механика» (118 с.) и «Механика Герца и эйнштейновская теория тяготения» (31 с.) [351]. Таким образом, ОТО, ее проблемы и методы были близки и понятны Шредингеру. С 1921 г. он начинает вместе с тем активно работать над проблемами квантовой теории, причем одновременно в двух упомянутых выше направлениях (квантово-статистическом и атомно-спектроскопическом). В этот период (до конца 1924 г.) в программном отношении он занимает в некотором смысле промежуточную позицию, не примыкая ни к одной из основных школ или программ. Именно к этому времени можно было бы отнести замечание, сделанное им самим о стиле своей научной деятельности: «В моих научных работах, как и вообще в жизни, я никогда не придерживался какой-либо генеральной линии, не следовал руководящей программе, рассчитанной на длительные сроки» [349, с. 345]. Именно эти обстоятельства обусловили появление исследования Шредингера, в котором он пытался переформулировать известные квантовые условия Бора на языке единой теории Вейля (1922) [352].

Связав вейлевский вектор φ , с электромагнитным потенциалом соотношениями (см. гл. 3 настоящей работы)

$$\varphi_0 = \gamma^{-1} eV, \varphi_1 = -\gamma^{-1} \frac{e}{c} A_x, \dots, \varphi_3 = -\gamma^{-1} \frac{e}{c} A_z, \quad (1)$$

где V — скалярный потенциал, (A_x, A_y, A_z) — векторный потенциал, γ — некоторый постоянный коэффициент пропорциональности, имеющий размерность действия, он представил вейлевский экспоненциальный множитель, фигурирующий в формуле (12) главы 3, следующим образом:

$$\exp \left\{ -\frac{e}{\gamma} \int \left(V dt - \frac{1}{c} A_x dx - \frac{1}{c} A_y dy - \frac{1}{c} A_z dz \right) \right\}. \quad (2)$$

Шредингер рассмотрел показатель степени этого выражения для простейших задач квантовой теории (невозмущенное кеплеровское движение, эффекты Зеемана и Штарка и т. д.) и пришел к следующей переформулировке квантовых условий (для пространственно-замкнутых периодических систем): «Показавшееся мне замечательным свойство квантовых траекторий состоит в том, что «истинные» квантовые условия, т. е. условия, которые приводят к определению энергии и тем самым ее спектра, заключаются в требовании целочисленности кратности показателя степени масштабного множителя (5) (т. е. (2) в нашей нумерации. — В. В.) величине $\gamma^{-1} h \dots$ для всех приближенных периодов системы» [352, с. 162].

Боровское квантовое условие для невозмущенного кеплеровского движения

$$2\pi\bar{T} = nh, \quad (3)$$

где τ — период орбитального движения, а \bar{T} — средняя по времени кинетическая энергия. Согласно теореме вириала

$$\bar{T} = 1/2 e\bar{V},$$

где V — электрический потенциал ядра. Следовательно, оказывается, что

$$e\bar{V}\tau = e \int_0^{\tau} V dt = nh.$$

Так как поле ядра в данном случае только электростатическое, $A_x = A_y = A_z = 0$ и показатель экспоненциального множителя оказывается равным

$$- \frac{e}{\gamma} \int_0^{\tau} V dt,$$

откуда получается соотношение

$$- \frac{e}{\gamma} \int_0^{\tau} V dt = n\gamma^{-1}h, \quad (4)$$

совпадающее с квантовым условием Шредингера.

Аналогичные результаты получаются и для других задач атомной спектроскопии (эффекты Зеемана и Штарка, релятивистская прецессия и т. д.). Обсуждая возможный физический смысл полученного результата, Шредингер отмечает, что «если бы электрон на своей орбите был связан с некоторым „отрезком“ („масштабом“), который при движении переносился бы параллельно самому себе, то при отсчете от некоторой произвольной точки орбиты мера этого отрезка казалась бы всегда кратной некоторой почти целочисленной степени экспоненты $e^{-\frac{h}{\gamma}}$ всякий раз, когда электрон возвращается с весьма большим приближением в исходное положение и одновременно в начальное состояние движения... Трудно поверить, — продолжает он далее, — что этот результат — лишь случайное математическое следствие квантовых условий и не имеет более глубокого физического смысла» [352, с. 170]. Шредингер также допускал, что установленное им «замечательное свойство» орбитального электрона свидетельствует об определенной «настройке» его в электромагнитном поле (подобно тому как «настроена» в магнитном поле магнитная стрелка). В заключение он обсуждает возможное физическое значение постоянной γ , имеющей размерность действия. Одна из возможностей заключается в том, чтобы положить $\gamma \simeq h$. Это ведет к мысли «о том, нельзя ли представить себе γ как чисто мнимую величину $\gamma = \frac{h}{2\pi\sqrt{-1}}$, тогда универсальный множитель (22) (т. е. $\exp(h\gamma^{-1})$. — В. В.) был бы равен 1 и мера сопутствующего отрезка воспроизводилась бы после каждого квазипериода» [352, с. 171]. Выражение

для «меры сопутствующего отрезка» при этом выглядело бы так:

$$l = l_0 \exp \left\{ -\frac{2\pi i}{h} \int \left(V dt - \frac{1}{c} A_x dx - \frac{1}{c} A_y dy - \frac{1}{c} A_z dz \right) \right\}, \quad (5)$$

весьма напоминая при этом выражение для волновой функции, введенной Шредингером более чем через три года².

В «Автобиографии», написанной Шредингером после вручения Нобелевской премии, перечисляя свои важнейшие работы, он отметил эту статью 1922 г. и подчеркнул, что «установление того... что масштабный множитель Вейля для замкнутых квантовых орбит является целочисленной степенью некоторой универсальной постоянной, которая, возможно, равна единице, представляется важным как предвосхищение, разумеется бессознательное... теории Л. де Бройля...» [349, с. 345]. Действительно, сведение квантовых условий к некоторому резонансному свойству вейлевской меры, родственной по своему строению фазовой волне де Бройля, может рассматриваться как несомненное предвосхищение резонансной дебройлевской интерпретации квантовых условий Бора—Зоммерфельда. Правда, в серии знаменитых статей Шредингера, опубликованных в «Annalen der Physik» за 1926 г. (четыре сообщения «Квантования как задачи о собственных значениях») [353], мы не находим упоминания о том, что статья 1922 г. оказала какое-либо заметное влияние на генезис идей Шредингера, на нее нет даже ссылки. Нет никаких указаний и на то, что она повлияла на Л. де Бройля, на работы которого опирался Шредингер.

Первым, кто обратил внимание на статью Шредингера «О замечательном свойстве...» и оценил ее как прообраз и аналог волновой концепции микрочастиц, был Ф. Лондон, известный впоследствии своими фундаментальными работами по физике низких температур. 10 декабря 1926 г. он, познакомившись с этой статьей, написал восторженное письмо Шредингеру, краткие выдержки из которого мы приводим: «Вы показали, что на действительных дискретных траекториях калибровочный масштаб (Eicheinheit) (при $\gamma = 2\pi i/h$) воспроизводится после каждого оборота и при этом, как Вы заметили, единица длины на n -й траектории n раз возрастает и уменьшается в точности, как в случае стоячей волны, которая описывает распределение заряда в атоме... Вы держали в руках резонансный характер квантового постулата задолго до де Бройля» [354, с. 303].

Через неделю Лондон на заседании Бюргембергского отделения Немецкого физического общества в Штутгарте выступил с докладом, в котором он пытался отождествить вейлевскую меру с волновой функцией на этой основе спять известные возражения Эйнштейна против теории Вейля. Доклад был затем опубликован в «Naturwis-

² К аналогичному результату за два года до этого (в частности, к введению мнимых значений потенциалов для невозмущенного кеплеровского движения) пришел также А. Д. Фоккер, который не опубликовал его, ограничившись сообщением этого результата Вейлю. Вейль после ознакомления со статьей Шредингера написал ему об этом в Арозу, где, кстати говоря, и Фоккер получил свой результат [352, с. 162].

senschaften (краткое сообщение) [275] и «Zeitschrift f. Physik» (в феврале 1927 г.) [355]. Лондон, как и в цитированном письме, давал высокую оценку шредингеровской статье 1922 г., повторяя и развивая основные мысли своего письма: «Квантовая теория допускает лишь дискретную последовательность состояний движения. Можно предположить, что эти выделенные движения обеспечивают лишь такой перенос масштаба, что в результате его возврата в первоначальную точку фазы (волновой функции.— В. В.) претерпевает целое число циклов... Это напоминает, по существу, резонансное свойство дебройлевских волн, а именно то свойство, с помощью которого де Бройль впервые так плодотворно переформулировал старые квантовые условия Зоммерфельда—Эпштейна... Если, таким образом (к системе постулатов теории Вейля.— В. В.), добавить требование однозначности длины, как общепризнанный опытный факт, то это с необходимостью приведет к системе дискретных состояний движения „классической“ квантовой теории и их дебройлевским волнам. Я не хотел бы лишиться приятной возможности указать, что это резонансное свойство вейлевской меры, которое мы встречаем здесь как характерную теорему волновой механики, было выдвинуто Шредингером уже в 1922 г. как „замечательное свойство квантовых траекторий“ и продемонстрировано на ряде примеров, хотя физический смысл этого тогда еще не был вполне осознан... Таким образом, Шредингер уже тогда имел в руках характерные волномеханические периодичности, с которыми он позднее снова встретился на совершенно другой основе» [355, с. 380—381].

Очевидно, Шредингер согласился с оценкой его статьи 1922 г. Лондоном, так как он не возражал ему ни в письмах, ни в печати (после опубликования штутгартского доклада). Лондон в этом докладе также не изменил своей позиции по сравнению с письмом от 10 декабря. Наконец, в «Автобиографии» (1933) Шредингер сам оценил свою статью 1922 г. как «предвосхищение, разумеется бессознательное... теории Л. де Бройля» [349, с. 345].

Каково же действительное значение этого «предвосхищения» в генезисе волновой механики Шредингера? Наряду с еще несколькими фактами (отсутствие предубеждения Шредингера против идей де Бройля в отличие от физиков геттингенской, копенгагенской и мюнхенской школ; приверженность Шредингера и де Бройля к сходным программным установкам — признание реальности световых квантов, необходимость пространственно-временного континуального и причинного описания микромира, использование для этой цели дифференциальных уравнений и т. д.; совпадение интересов Шредингера и де Бройля — квантовая статистика и атомная спектроскопия, оптико-механическая аналогия и вариационный подход, использование релятивистского подхода к задачам атомной физики и т. д.) упомянутое «предвосхищение» определило, по-видимому, то обстоятельство, почему именно Шредингер развил волновую концепцию де Бройля [354]. Статья 1922 г., по-видимому, была своеобразным мостом, соединяющим резонансную интерпретацию квантовых условий де Бройля с подходом Шредингера. Действительно, как замечает

Шредингер, «основным исходным толчком, приведшим к появлению приведенных здесь рассуждений, была диссертация де Бройля, содержащая много глубоких идей, а также размышлений о пространственном распределении „фазовых волн“, которым всякий раз соответствует периодическое или квазипериодическое движение электронов, если только эти волны укладываются на траектории целое число раз» [353, с. 18]. Центральной проблемой, попытки решения которой привели Шредингера к волновой механике, была проблема волновой переформулировки квантовых условий для атома водорода. Об этом свидетельствует письмо Шредингера к А. Ланде (от 16 ноября 1925 г.), где он, в частности, подчеркивал, что «глубоко погрузился в остроумную диссертацию де Бройля... и тщетно пытался представить себе картину фазовых волн электрона на эллиптической орбите...» [354, с. 312]. Эти попытки свидетельствуют о том, что Шредингер на языке дебройлевских волн стремился получить наглядную (как в его работе 1922 г.) и физически осмысленную волновую формулировку квантовых условий. Статья 1922 г., таким образом, а вместе с ней и единая теория Вейля, послужив своеобразным исходным пунктом развития Шредингером волновых идей де Бройля, сыграли весьма важную роль в генезисе волновой механики Шредингера.

По-видимому, отмеченная особенность является довольно общей чертой развития научного знания в условиях существования конкурирующих исследовательских программ. Программы, которые как будто регрессируют, оказываются тупиковыми, преждевременными, могут в процессе конкуренции с программой, одерживающей в конечном счете верх, существенно влиять на развитие последней.

КАЛИБРОВОЧНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОЛЯ И ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ (ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ)

Основные достижения квантовой теории поля и взаимодействий элементарных частиц за последние 10—15 лет были в значительной мере связаны с калибровочной концепцией поля, начало развитию которой положила работа Ч. Янга и Р. Миллса (1954) [346]. «Калибровочные поля, — говорится в предисловии к книге А. А. Славнова и Л. Д. Фаддеева по квантовой теории калибровочных полей, — участвуют в большинстве современных моделей как сильных, так и слабых и электромагнитных взаимодействий. При этом возникает чрезвычайно привлекательная перспектива объединения всех взаимодействий в одно универсальное» [356, с. 5]. Гравитационное поле также имеет калибровочную структуру. Тем самым в последнее десятилетие реальные черты обрела идея единой полевой теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий («великое объединение») и появились подходы к учету и гравитации («супергравитация») — и все это на основе калибровочной концепции. Заветная эйнштейновская мысль о полевом геометрическом синтезе

физики возродилась на новом уровне, и решающую роль в этом возрождении играет калибровочная концепция.

Правда, геометризация в калибровочных теориях понимается несколько иначе, чем в классических теориях программы ЕГТП, но тем не менее геометрия расслоенных пространств позволяет включить калибровочные поля в единую геометрическую структуру [7]. Дело в том, что калибровочное поле можно рассматривать как связность в главном расслоенном пространстве, базу которого образует четырехмерное пространство-время, а слой — группа внутренней симметрии.

Как уже говорилось, начало калибровочной идеологии, приведшей к столь заметным успехам, положила работа 1954 г., написанная Янгом и Миллсом. Кстати говоря, не менее популярно другое название калибровочных полей — «поля Янга—Миллса». Исходя из требования локальной изотопической инвариантности, они ввели новое поле, ответственное за взаимодействие нуклонов. В соответствии с теоремой Нетер закон сохранения изоспина связан с инвариантностью теории относительно вращений в изотопическом пространстве. Физически это означает неразличимость протона и нейтрона при игнорировании электромагнитных взаимодействий. «Однако, — заметили Янг и Миллс, — как обычно подразумевают, этот произвол (т. е. эта неразличимость.—В. В.) ограничен следующим условием: как только сделан выбор, что назвать протоном, а что нейтроном в одной точке пространства-времени, свобода выбора в других пространственно-временных точках пропадает» [346, с. 29]. Иначе говоря, обычно внутренняя симметрия характеризуется преобразованиями, которые действуют одинаковым образом во всех точках пространства-времени, т. е. является глобальной. «Такое положение, — подчеркнули они, — несовместимо с концепцией локализованного поля, лежащей в основе обычных физических теорий». Последовательное проведение этой концепции, являющейся своеобразным сочетанием принципов симметрии и близкодействия, приводит в рассматриваемом случае к требованию, «чтобы все взаимодействия были инвариантными относительно независимых вращений изотопического спина во всех точках пространства-времени, так что относительная ориентация изотопического спина в двух соседних точках пространства-времени теряет смысл» [там же]. Для обеспечения этого условия приходится ввести новое векторное поле, удовлетворяющее вполне определенным уравнениям. Аналогичным образом Дж. Сакурай в 1960 г. вводил векторные поля, связанные с законами сохранения барионного числа и гиперзаряда. Именно на этом пути возникли затем основные идеи современной калибровочной теории элементарных частиц [358].

В дискуссии на секции «Эйнштейн и физика будущего», работавшей в рамках юбилейного симпозиума, посвященного столетию со дня рождения Эйнштейна и состоявшегося в 1979 г. в Принстоне, Ю. Неeman и А. Пайс вспомнили о Камерлинг-Оппенсовской конференции 1953 г., на которой В. Паули выдвинул идею применения принципа локальной калибровочной инвариантности к понятию изо-

спина [359, p. 505—506]. Эту мысль он высказал в связи с обсуждением доклада А. Пайса, в котором рассматривались вопросы, последующее решение которых привело к концепции «странности». Пайс отметил также, что вслед за этим Паули разработал соответствующий формализм, который вначале казался ему отличным от метода Янга и Миллса, но затем был признан эквивалентным ему, о чем в письме к Пайсу писал Паули. Таким образом, хотя Паули и не опубликовал ничего об этом, отмеченные документальные свидетельства (дискуссия по докладу Пайса на упомянутой конференции и вопрос Паули, в котором была выдвинута идея локализации группы изоспина, были затем опубликованы в журнале «Physica») говорят о том, насколько был он близок к разработке обобщенной калибровочной концепции³. Формальное развитие выдвинутой им идеи было осуществлено им же, но, по-видимому, уже после появления статьи Янга и Миллса. Ниже будет показано, что Паули был одной из главных фигур в истории формирования идей калибровочной симметрии в электродинамике и калибровочной концепции электромагнитного поля. Поэтому в некотором роде предвосхищение им концепции Янга—Миллса представляется не так уж неожиданным.

К калибровочной концепции, по-видимому, был близок и Е. Вигнер в конце 40-х — начале 50-х годов, когда он думал, что ядерные силы могут оказаться связанными с локализацией калибровочной симметрии, отвечающей закону сохранения барионного заряда. При этом вся ситуация сравнивалась им с законом сохранения электрического заряда, соответствующей локальной калибровочной симметрией и электромагнитным взаимодействием. Дж. Сакураи писал в 1960 г., что калибровочные концепции «возникли под влиянием идей многих авторов — Вигнера, Янга и Миллса, Ли и Янга, Швингера, Гелл-Манна, Фуджи и ряда других. Все эти авторы, так же как и я, занимались вопросом о возможной связи между законами сохранения таких внутренних качеств, как изоспин и барионное число, с одной стороны, и динамикой взаимодействия элементарных частиц — с другой» [360, с. 105]. Первым в этом ряду назван Е. Вигнер (имеется, в частности, его работа 1949 г. [361]). Янг и Миллс идут как раз вслед за ним.

Вернемся к работе Янга и Миллса. Как же у них возникла идея локальной инвариантности и мысль о том, что локализация некоторой глобальной симметрии с необходимостью ведет к некоторому векторному полю? На этот вопрос нетрудно ответить: перед их глазами стоял пример электромагнитного поля. Вот как они сами писали тогда об этом: «Весьма сходная ситуация имеет место в отношении обычной калибровочной инвариантности заряженного поля, которое описывается обычной волновой функцией ψ . Изменение калибровки... означает изменение фазового множителя $\psi \rightarrow \psi'$, $\psi' = e^{i\alpha}\psi$, т. е. изменение, не приводящее к каким-либо физическим следствиям. Так как ψ может зависеть от x, y, z, t , то относительный фазовый

³ На этот материал обратил мое внимание И. Ю. Кобзарев, которому я весьма благодарен за это.

множитель ψ в двух различных пространственно-временных точках совершенно произволен. Иными словами, произвол в выборе фазового множителя имеет локальный характер» [346, с. 30]. Переход от α к $\alpha(x, y, z, t)$ нарушает инвариантность теории, и, как известно, «в электродинамике для компенсации изменения α с изменением x, y, z, t возникает необходимость вводить электромагнитное поле A_μ , которое преобразуется при калибровочном преобразовании по закону

$$A'_\mu = A_\mu + \frac{1}{e} \frac{\partial \alpha}{\partial x_\mu} \quad \text{[там же].}$$

О связи локальной калибровочной инвариантности с электромагнитным полем авторы пишут как о вещи достаточно хорошо известной и ссылаются при этом на знаменитый обзор В. Паули 1941 г. [362].

Таким образом, уже в 30-40-х годах связь электромагнитного поля с локальной калибровочной симметрией была достаточно хорошо известна. Локальные калибровочные преобразования

$$\begin{cases} \psi' = e^{i\alpha(x)} \psi, \\ A'_\mu = A_\mu + \frac{1}{e} \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x_\mu} \end{cases} \quad (6)$$

могли быть открыты только после создания квантовой механики. Поэтому и калибровочная трактовка электромагнитного поля могла появиться лишь в конце 20-х — начале 30-х годов.

Изучение же истории открытия калибровочной симметрии, как мы увидим, возвращает нас к единым геометризованным теориям поля и попыткам связать их с квантовой механикой. С другой стороны, понятие калибровочной симметрии восходит к проблеме соотношения потенциалов и напряженностей в электродинамике. Поэтому, прежде чем обратиться непосредственно к генезису калибровочной концепции поля в контексте ЕГТП, сделаем некоторый экскурс в историю упомянутой проблемы, связанную с именами Фарадея и Максвелла.

ПОТЕНЦИАЛЫ И НАПРЯЖЕННОСТИ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

В классической электродинамике основной физической характеристикой электромагнитного поля издавна считались напряженности электрического и магнитного полей, потенциалы же рассматривались как величины вспомогательные. Эта точка зрения проводится во всех хорошо известных курсах электродинамики, от классических — Г. А. Лоренца, М. Абрагама до современных — Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, Дж. Джексона и др. Но обратимся к истокам. Оказывается, и Максвелл, и в известном смысле Фарадей не считали потенциал величиной только вспомогательной, вторичной. Иногда они рассматривали его даже как величину более фундаментальную, чем напряженность поля. Правда, электростатический (скалярный)

потенциал и векторный потенциал имели тогда различный статус. Если скалярный потенциал был величиной хорошо известной и теория его была развита не только в электро- и магнитостатике, но и в небесной механике, то понятие векторного потенциала прошло нелегкий путь развития.

Прообразом векторного потенциала оказалось понятие электротонического состояния, появившееся впервые в трудах Фарадея. Кратко и выразительно эволюция этого понятия у Фарадея изложена Максвеллом в 3-й главе 4-й части «Трактата об электричестве и магнетизме» (1873): «Концепция существования такой величины, от изменения которой, а не от ее абсолютной величины, зависит ток индукции, встречается у Фарадея в первой серии его „Исследований“ (Exp. Res., сер. 1 (60)). Он наблюдал, что вторичная цепь, находясь в покое в электромагнитном поле неизменного напряжения, не показывает наличия какого-нибудь электрического эффекта, в то время как, если то же самое состояние поля было бы достигнуто внезапно, возникает ток...

По этой причине он приписал вторичной цепи, находящейся в электромагнитном поле, „особое электрическое состояние материи“, которому он дал название *электротонического состояния*. Затем он нашел, что может расстаться с этой идеей при помощи соображений, основанных на линиях магнитной силы (Exp. Res., сер. 2 (242)), но даже в его последних исследованиях (там же (3269)) он говорит: „Неоднократно в моем уме настойчиво возникла идея *электротонического состояния*“ (там же (60, 1114, 1661, 1729, 1733)). «Вся история в уме Фарадея — продолжил Максвелл, — как она показала в опубликованных им „Исследованиях“, заслуживает изучения. В результате целого ряда опытов, которые были основаны на тщательном размышлении, но без помощи математических вычислений, он пришел к идее, что существует нечто, что нам ныне известно как математическая величина и что может быть названо *основной величиной* в теории электромагнетизма. Но так как он пришел к этой концепции чисто экспериментальным путем, он приписывал ей физическое существование и предположил, что это — особое состояние материи, хотя был готов отбросить эту теорию, как только он смог бы объяснить явления в любой более привычной нам форме.

Другие исследователи значительно позже Фарадея пришли к той же самой идее чисто математическим путем, но, насколько я знаю, ни один из них не узнал в утонченной математической идее потенциал двух контуров фарадееву смелую гипотезу электротонического состояния... Научное значение фарадеевой концепции электротонического состояния, — заключал Максвелл, — состоит в том, что она направила мысль на признание существования некоторой величины, от изменения которой зависят наблюдаемые явления». Заметим, кстати говоря, что Максвелл здесь выступает как настоящий историк науки. В этом отрывке набросан блестящий эскиз «всей истории развития этой идеи (т. е. идеи электротонического состояния. — В. В.) в уме Фарадея» [363, с. 398].

Таким образом, представление о том, что электротоническое состояние является фундаментальной характеристикой электромагнитного поля, было введено Фарадеем не позже 1831 г. и впервые опубликовано в первой серии «Экспериментальных исследований» (датовано ноябрём 1831 г.). 24 ноября Фарадей читал первую серию в Королевском обществе [364]. Весь третий раздел первой серии посвящён электротоническому состоянию. Фарадей подчеркивает ненаблюдаемость этого состояния: «Покуда длится это особое состояние, оно не производит ни одного из известных электрических действий...» [364, с. 31]. Он отмечает и то обстоятельство, что наблюдаемые явления возникают лишь при изменении этого состояния: «Это особое состояние является, по-видимому, состоянием напряжения, и его можно считать *эквивалентным* току электричества... который производится при появлении или исчезновении этого состояния...» [364, с. 35]. Интересно, что не только современники Фарадея и Максвелла плохо понимали концепцию электротонического состояния, но и более поздние исследователи — как физики, так и историки науки. Например, Т. П. Кравец, крупный физик и историк электродинамики, обсуждая содержание первой серии «Исследований» Фарадея, писал в 1947 г.: «Далее следует неудачный раздел об особом „электротоническом состоянии“, в которое якобы приходит вещество, когда через него протекает ток (60—80); этим состоянием Фарадей пробует объяснить все наблюдаемые им явления. Мы не будем останавливаться на этой гипотезе, так как Фарадей сам решительно отказывается от нее уже во второй серии своих исследований (231). Это единственный раздел в учении об электромагнитной индукции, который не стал классическим, не вошел во все учебники» [365, с. 747]. Впрочем, Кравец указывает в примечании: «Эта гипотеза очень пленила Фарадея, и расстался он с ней только скрепя сердце (242). Она вновь овладевает им позже (1661, 1729, 1733, может быть, также 1114)»⁴. Трудно представить себе, что Кравец не усмотрел в электротоническом состоянии понятие векторного потенциала. Это, как мы увидим, отчетливо проявляется при просмотре основных работ Максвелла, который, как мы уже заметили, напротив, очень высоко оценил эту концепцию Фарадея. Просто для Кравца, как и для подавляющего большинства физиков XX в., глубокий физический смысл имели напряженности поля, а не потенциалы. Действительно, Фарадей, как замечал еще Максвелл, испытывал определенные сомнения относительно понятия электротонического состояния. Исследования второй серии привели его к выводу, что основной характеристикой поля должны быть силовые линии (напряженности). Поэтому в примечании к цитированному выше 3-му разделу первой серии (при ее опубликовании) он заметил: «Более поздние исследования... законов управляющих этими явлениями, заставляют меня думать, что последние могут быть полностью объяснены без допущения электротонического состояния» [364, с. 31].

⁴ Здесь указанные числа означают номера пунктов соответствующих разделов «Исследований» Фарадея.

Однако вскоре, как отмечали и Максвелл и Кравец, Фарадей вернулся к дорогой его сердцу концепции электротонического состояния. Так, в восьмой серии (апрель 1834 г.) он пытается применить ее для объяснения электролитических явлений (955), в тринадцатой серии (февраль 1838 г.) — к анализу электрических явлений в непроводниках (1658—1661, а также 1729—1733). Он все время пытался найти способ экспериментального обнаружения электротонического состояния, пытался обобщить его, вводя в своих поздних исследованиях понятие «магнитотонического состояния» (1845 г.). И в своих последних исследованиях, опубликованных в 3-м томе (январь — февраль 1855 г.), он возвращается к мысли об электротоническом состоянии как ключевом теоретическом понятии электродинамики: «Вновь и вновь возникает во мне мысль об электротоническом состоянии (60, 1114, 1661, 1729, 1733): такое состояние совпадало бы и могло бы быть отождествлено с тем, чем представлялись бы тогда физические линии магнитной силы» [366, с. 584]. Фарадею так и не удалось ни обнаружить электротоническое состояние экспериментальным путем, ни разработать достаточно четкие теоретические представления на основе этого понятия (концепция линий напряженностей поля оказалась в то время более жизнеспособной), но интуитивно он чувствовал ее глубину и плодотворность и постоянно возвращался к ней.

Для Максвелла же фарадеевское понятие электротонического состояния в значительной мере оказалось исходным в разработке теории электромагнитного поля. Первое упоминание об этом понятии, свидетельствующее о его ключевой роли в генезисе максвелловских идей, мы находим в письме Максвелла к В. Томсону от 13 сентября 1855 г.: «Я намереваюсь к этим фактам (речь идет о фактах, относящихся к силовым линиям.— В. В.) применить фарадеевское понятие электротонического состояния. Я извлек немало математического материала из этой жилы и полагаю, что нашел несколько важных истин относительно электротонического состояния. Удалось, например, свести к одному принципу не только притяжение и индукцию токов, но и притяжение зарядов без каких-либо дополнительных предположений» [367, с. 215].

В своей первой статье по теории поля «О фарадеевских силовых линиях» (1885—1886) Максвелл действительно опирается на понятие электротонического состояния, оказавшееся тем самым ключевым при создании математического оформления идей Фарадея. Комментируя приводимые им пророческие высказывания о значении этого понятия, Максвелл замечает: «Такая догадка ученого, столь глубоко освоившегося с природой, может иногда иметь большее значение, чем наилучшим образом обоснованный экспериментальный закон, и хотя существование рассматриваемого состояния мы не можем принимать за точно установленную физическую истину, тем не менее мы должны высоко оценить значение этой новой идеи Фарадея, способной иллюстрировать наши математические понятия» [368, с. 58]. Интересно, что Максвелл в дальнейшем надеялся дать «механический образ» этого состояния. Вторая часть статьи так и назы-

вается «О фарадеевом „электротоническом состоянии“». Максвелл показывает здесь, что можно ввести такую тройку величин, т. е. вектор в современной терминологии $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, которые он называет составляющими электротонической напряженности, что с ее помощью удастся в той же точке пространства, где задана эта тройка, определить значения напряженностей электрического и магнитного полей:

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\alpha_0}{dt}, & \beta_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\beta_0}{dt}, & \gamma_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\gamma_0}{dt}, \\ \alpha_1 = \frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} + \frac{dV}{dx}, & \beta_1 = \frac{d\gamma_0}{dx} - \frac{d\alpha_0}{dz} + \frac{dV}{dy}, & \gamma_1 = \frac{d\alpha_0}{dy} - \frac{d\beta_0}{dx} + \frac{dV}{dz}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ — напряженность магнитного поля; $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ — напряженность электрического поля; V — скалярный магнитный потенциал. В современных векторных обозначениях (если A — векторный потенциал, V — скалярный магнитный потенциал, E и H — напряженности полей) соотношения (7) выглядят следующим образом:

$$E = -\frac{1}{4\pi} \frac{dA}{dt}, \quad H = \text{rot } A + \text{grad } V. \quad (7a)$$

В рассуждениях Максвелла при этом существенную роль играли известные ныне теоремы и формулы векторного анализа, связанные с именами Гаусса, Грина, Остроградского, Стокса, В. Томсона. Максвелл непосредственно ссылается на их работы, особенно на фундаментальную работу В. Томсона по математической теории магнетизма (1851), где, по существу, содержалась максвелловская теорема 5, согласно которой если $\text{div } H = 0$, то существует такой вектор A , что $H = \text{rot } A$. Заметим при этом, что Томсон ни в коей мере не связывал вектор A с электротоническим состоянием Фарадея. Таким образом, одним из важнейших исходных пунктов максвелловской теории и ее математической формулировки стала фарадеевская концепция электротонического состояния.

В следующей работе «О физических силовых линиях», датированной 1861—1862 гг., Максвелл попытался дать обещанный «механический образ» электротонического состояния, подчеркнув, что он использует «механические образы для того, чтобы помочь воображению, но отнюдь не относя их к причинам явлений» [26, с. 109]. Не будем приводить здесь хорошо известный рис. 8 из этой статьи, изображающий своеобразный механизм, назначение которого — дать механическую интерпретацию формулам (7) вместе с калибровочным условием

$$\frac{d\alpha_0}{dx} + \frac{d\beta_0}{dy} + \frac{d\gamma_0}{dz} = 0, \quad (8)$$

а также заодно и понятию электротонического состояния. В результате Максвелл приходит к выводу, что «механическим образом» электротонического состояния является «импульс (т. е. количество»

движения.— В. В.), который действовал бы на ось колеса машины, если бы ведущему колесу покоящейся машины была внезапно сообщена его действительная скорость» [369, с. 146]. В этой же статье Максвелл рассматривает и гидродинамическую аналогию.

Это позволило ему в работе «Динамическая теория электромагнитного поля» (1865) назвать электротоническое состояние «электромагнитным количеством движения». «То, что я назвал электромагнитным количеством движения, является той же самой величиной, которую Фарадей обозначил как электротоническое состояние тока, любое изменение которого порождает действие электродвижущей силы, подобно тому как изменение механического количества движения влечет за собой действие механической силы» [370, с. 273].

Заметим, что в числе 20 основных величин, характеризующих электромагнитные процессы и фигурирующих в 20 основных уравнениях электродинамики, входят и три компонента электротонического состояния (оно же — «электротоническая напряженность», «электромагнитное количество движения» и будущий векторный потенциал). При этом по отношению к свободному полю «электромагнитное количество движения» выступает как более фундаментальная величина, так как именно через нее и через скалярный «электрический потенциал» выражаются напряженности полей. То обстоятельство, что «электромагнитное количество движения» определено лишь с точностью до градиента от произвольной функции пространственных координат, Максвеллу было известно со времени его первой работы по электродинамике. Но и эта калибровочная неоднозначность электротонического состояния, и ясное понимание, что сама эта величина ненаблюдаема, а наблюдаемые явления зависят лишь от ее изменения, не помешали Максвеллу признать фундаментальный физический характер этого состояния.

Впрочем, через три года, в 1868 г., Максвелл систематизирует основные уравнения своей теории, не прибегая к потенциалам [371]. На это обратил внимание А. Борк, который также заметил, что из текста этой статьи неясно, какую цель преследовал автор, отказавшись от использования потенциалов. Некоторые из писем Максвелла к Тэту, прежде всего письмо от 23 января 1871 г., показывают, что по крайней мере в 1870 г. его мысли снова обратились к потенциалам [367]. Можно предположить, что временный отказ от них был связан с названными двумя недостатками этих величин (ненаблюдаемость и неоднозначность), с сомнениями в целесообразности механических моделей и желанием дать наиболее экономную феноменологическую схему электродинамики. Но слишком велика была привязанность Максвелла к потенциалам, слишком большую роль они сыграли в разработке основ теории, слишком хорошо они вписывались в качестве основных величин в концептуальную структуру теории, выявляя также ее глубинную связь со структурой классической механики, чтобы отказ от них стал окончательным. Наконец, появилось еще одно обстоятельство, которое могло стимулировать возврат к потенциалам, в полной мере сказавшийся в «Трактате об электричестве и магнетизме». Это — возможность примене-

ния нового математического метода, векторного и кватернионного формализма, которое особенно эффектно выглядело при использовании потенциалов. В упомянутом письме к Тэту, вероятно, впервые встречается кватернионное представление потенциалов, причем в своеобразной «четырёхмерной» форме:

$$T = P + iL + jM + kN, \quad (9)$$

где P — скалярный магнитный потенциал, а (L, M, N) — электротоническое состояние, названное здесь Максвеллом впервые векторным потенциалом.

Мы уже приводили высказывание Максвелла из 4-й части «Трактата», касающейся фарадеевской концепции электротонического состояния, которую он оценивал очень высоко, называя эту характеристику «основной величиной в теории электромагнетизма» [363. с. 397]. Он впервые называет ее векторным потенциалом в пункте 405, озаглавленном «Векторный потенциал магнитной индукции». Как замечает Борк, эта величина была названа так по аналогии со скалярным потенциалом, производные которого по пространственным координатам совпадали с компонентами электрического поля, поскольку линейные комбинации производных от компонент векторного потенциала по пространственным координатам давали компоненты напряженности магнитного поля. В «Трактате» среди «основных векторов» теории на первом месте у Максвелла оказывается векторный потенциал, а среди скаляров — электрический потенциал. Заметим также, что в главе, посвященной электромагнитной теории света. Максвелл использует потенциалы, чтобы с их помощью записать новые уравнения [там же].

В начале XX в. во всех монографиях и учебниках по электродинамике, содержащих максвелловскую теорию поля, мы встречаемся с системой уравнений Максвелла в форме Герца — Хевисайда, в которых фигурируют лишь напряженности полей, а потенциалы отсутствуют. Действительно, именно Г. Герц и О. Хевисайд в первую очередь поставили под сомнение в середине 80-х — начале 90-х годов фундаментальность потенциалов и показали, что систему основных уравнений электродинамики можно записать в терминах одних только напряженностей полей, не прибегая к потенциалам. Можно предположить, что исключение потенциалов из основных уравнений электромагнитного поля именно Герцем и Хевисайдом было связано с их экспериментальными (у первого) и инженерными (у второго) интересами, поскольку потенциалы не были в отличие от напряженностей непосредственно измеряемыми величинами [372. с. 221—223]. Хевисайд подчеркивал, что знания потенциала в общем случае недостаточно, чтобы однозначно определить состояние поля. Он называл их «в высшей степени искусственными величинами», имеющими вспомогательный характер, и считал, что только напряженности «действительно определяют физическое состояние среды» [373. с. 226].

Хотя Герц, как и Хевисайд, старался исключить потенциалы из физических рассуждений и использовать их только как вычисли-

тельное средство, он не был, подобно Хевисайду (а также Дж. Фиджеральду, который тоже избегал применения потенциалов, и Дж. Лармору, который считал, что они «не представляют собой действительные физические величины» [374]), столь же категоричен в их оценке как величин, лишенных какого-либо физического смысла. Правда, он считал, что потенциалы физический смысл могут иметь только при рассмотрении электромагнитных процессов в среде («а не в пустоте») [373, с. 227—230].

В конце 90-х годов XIX в. и начале XX в. эта точка зрения становится почти стандартной. В распространенном курсе электродинамики А. Грея (1898) можно прочесть: «Использование векторного потенциала иногда удобно в качестве математического приема. Но он не является физической величиной, которая могла бы наблюдаться экспериментально...» [367, с. 222]. Аналогичные замечания о потенциалах имеются и в «Теории электронов» Г. А. Лоренца (1909), который подчеркивал, что именно Герц и Хевисайд дали современную формулировку максвелловской теории в ее «ясном и концентрированном виде» [375, с. 21]. «Так как, однако, вторые члены этих формул,— писал он в этой книге, имея в виду волновые уравнения, записанные в терминах напряженностей \mathbf{d} и \mathbf{h} ,—отличаются некоторой сложностью, мы предпочитаем не определять непосредственно \mathbf{d} и \mathbf{h} , а вычислить в первую очередь некоторые вспомогательные функции, которые называются потенциалами и через которые можно будет выражать электрические и магнитные силы» [375, с. 42—43]. Примерно в таком же контексте упоминаются потенциалы и в знаменитом курсе электродинамики М. Абрагама (первое издание 1904 г.) [376]. Так потенциалы утратили характер фундаментальных физических величин и приобрели статус вспомогательных характеристик поля, используемых лишь для упрощения математических вычислений при решении прикладных уравнений. Е. Вигнер в середине 60-х годов, выражая общепринятую точку зрения, восходящую к Герцу и Хевисайду, сравнивал потенциалы с призраками, «духами»: «Потенциалы нельзя измерить, и действительно измеримыми оказываются лишь величины, инвариантные относительно преобразований, произвольно зависящих от потенциалов (именно калибровочных преобразований 2-го рода.—В.В.). Разумеется, такая инвариантность носит искусственный характер. Нечто аналогичное можно было бы получить, введя в наши уравнения координаты какого-нибудь „духа“: уравнения должны были бы быть инвариантными относительно изменения координат „духа“, но в действительности никакой пользы от введения такой величины мы бы не получили» [377, с. 28].

Все же отношение к потенциалам не было однозначным. В начале второго десятилетия Г. Ми придумал нелинейную электродинамику, призванную объяснить существование заряженных частиц на основе понятия поля. В теории Ми реальный смысл имели не только напряженности, но и потенциалы, и теория оказывалась калибровочно инвариантной. Это приводило, как отметил впоследствии Нау-

ли, к «расплываю» заряженных частиц в постоянном внешнем потенциальном поле [63, с. 267]. Несмотря на эту трудность, теория Ми привлекла внимание теоретиков. Д. Гильберт в 1915 г., включив концепцию Ми в рамки общей теории относительности, набросал эскиз первой единой физической теории, основанной на общей теории относительности (см. гл. 2 настоящей работы).

В 1959 г. появилась статья Ааронова и Бом, вызвавшая заметное оживление среди физиков. Авторы статьи совершенно педантичным образом подчеркнули, что в рамках квантовой теории, т. е. при учете квантовых закономерностей движения заряженных частиц во внешнем электромагнитном поле, потенциалы и напряженности вновь меняются местами. Они предложили простой интерференционный опыт с электронами, который позволил бы выявить прямое влияние потенциала поля на картину интерференции. Ааронов и Бом показали, что «в квантовой теории некоторый электрон... испытывает воздействие потенциалов, находясь в области, где напряженность поля равна нулю» [378, с. 485]. Хотя эффекты такого рода, как заметили авторы статьи, зависят от калибровочно-инвариантной интегральной характеристики, концепция локализованного поля требует признания влияния на электрон именно потенциалов.

В 1960—1962 гг. Р. Чэмберс, Г. Мелленштедт и В. Бай и другие зарегистрировали эффект Ааронова — Бом экспериментально. Отсылая читателя к «Фейнмановским лекциям по физике», где опыт Ааронова — Бом и вытекающие из него следствия проанализированы с большой глубиной и ясностью, приведем только заключительные слова соответствующего параграфа: «Векторный потенциал A (наряду с сопровождающим его скалярным потенциалом ϕ), по-видимому, приводит к более прямому описанию физических процессов. Чем глубже мы проникаем в квантовую теорию, тем ясней и прозрачней нам это становится. В общей теории — квантовой электродинамике — в системе уравнений, заменяющих собой уравнения Максвелла, векторные и скалярные потенциалы уже считаются фундаментальными величинами. Векторы E и B постепенно исчезают из современной записи физических законов: их вытесняют A и ϕ » [379; с. 26]. «Материализация духов» в квантовой теории объясняется тем, что понятие силы там теряет свое значение, а понятия энергии и импульса выходят на передний план⁵. Фазы волновых функций, определяющих движение частиц, зависят от длин волн и частот, непосредственно связанных с энергиями и импульсами. Изменение же фазы при прохождении по некоторому пути l в магнитном поле с потенциалом A определяется соотношением

$$\frac{e}{\hbar} \int A ds. \quad (10)$$

При расчете фазового сдвига в опыте Ааронова — Бом появляется аналог этого интеграла, берущийся по замкнутому контуру и сво-

⁵ Более детальное обсуждение физической стороны этого эффекта и анализ соответствующих экспериментов содержатся, например, в работах Е. Л. Фейнберга [380] и Х. Эрлихсона [381].

дящийся по теореме Стокса к потоку напряженности магнитного поля через поверхность, ограниченную контуром⁶. Результат, таким образом, оказывается все-таки калибровочно-инвариантным.

Вывод о фундаментальной роли потенциалов в квантовой теории напрашивался с самого возникновения квантовой механики, поскольку они явным образом входят в уравнение Шредингера для частицы, движущейся в поле. Правда, и гамильтонова формулировка классической электронной теории приводила к выражениям для импульса и гамильтониана, содержащим потенциал

$$P_k = p_k + \frac{e}{c} A_k, \quad H = \sum_k \frac{1}{2m} \left(p_k - \frac{e}{c} A_k \right)^2 + e\varphi. \quad (11)$$

Но там она была одной из возможных формулировок, а в квантовой механике при операторном обобщении этих выражений потенциалы приобретали фундаментальный характер. Кстати говоря, уравнение Шредингера с указанным выражением для оператора Гамильтона было получено уже в первых классических статьях самого Шредингера по волновой механике. Несмотря на это, классическое понимание потенциалов и калибровочной инвариантности 2-го рода преобладало, как мы видели, вплоть до начала 60-х годов.

Переоценка роли потенциалов, происшедшая в 60—70-х годах, была связана не только с опытами типа Ааронова — Бомы, но и с утверждением калибровочной концепции поля, в которой в полной мере выявились связностная природа калибровочных полей и тем самым фундаментальный физический характер потенциалов [7, 356, 358]. Но истолкование электромагнитного потенциала как связности впервые появилось в рамках первых единых геометризованных теорий поля, именно в теории Вейля, в которой также впервые появился прообраз локальных калибровочных преобразований.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ

Первоначально Вейль использовал для преобразований (см. формулу (7) гл. 3 настоящей работы)

$$\begin{cases} g'_{ik} = \lambda(x) g_{ik}, \\ \varphi'_i = \varphi_i - \frac{1}{\lambda(x)} \frac{\partial \lambda(x)}{\partial x_i}, \end{cases} \quad (12)$$

лежащих вместе с произвольными непрерывными преобразованиями ОТО в основе теории Вейля, название «масштабных», а для соответствующей инвариантности — название «масштабной» («Maßstab-Invarianz»). Если же ввести обозначение $e^{\alpha(x)} = \lambda(x)$, то становится очевидным, что потенциалы удовлетворяют как раз калибровочным

⁶ В более общей ситуации аналогичную роль играет интеграл по четырехмерному пути

$$\frac{e}{h} \int A_\mu dx_\mu.$$

преобразованиям 2-го рода, приобретшим в теории Вейля, таким образом, определенный геометрический смысл, поскольку произвол в выборе потенциала связан с произволом в выборе масштаба для измерения длины. Квадрат длины некоторого отрезка при калибровочном преобразовании должен умножаться на масштабный коэффициент $e^{\alpha(x)}$.

Кстати говоря, в одной из статей 1919 г. Вейль заметил термин «масштабная инвариантность» термином «калибровочная инвариантность» («Eich-Invarianz») [164]. В английском переводе (именно в переводе 4-го издания книги «Пространство. Время. Материя» в 1921 г., переводчик Г. Л. Броуз) использовался термин «calibration» [128]. Утвердившийся сейчас в англоязычной литературе термин «gauge» впервые, по-видимому, появился в статье Вейля 1929 г., переведенной на английский язык Г. П. Робертсоном [311]. До Вейля специального названия не имели и калибровочные преобразования 2-го рода⁷. Калибровочные преобразования теории Вейля (12), записанные в форме

$$g'_{ik} = e^{\alpha(x)} g_{ik}, \quad \varphi'_i = \varphi_i + \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x_i}, \quad (13)$$

напоминают локальные калибровочные преобразования волновых функций и потенциалов (6). Разница заключается в том, что роль волновой функции в теории Вейля выполняет метрический тензор g_{ik} и показатель степени в экспоненте является действительной функцией, а не мнимой. Соответствующую геометрию Вейль, как мы видели, считал лучше согласующейся с концепцией близкодействия. При построении этой геометрии на первый план выдвигалась идея параллельного переноса, а также связностная природа гравитационного и электромагнитного полей.

В теории Вейля впервые фактически была признана фундаментальность калибровочных преобразований и намечена калибровочная концепция электромагнитного поля, хотя и в некорректной форме. Пробраз калибровочной концепции гравитационного поля был развит уже в общей теории относительности. Именно в ней был впервые реализован принцип локальной инвариантности, приводящий к необходимости введения гравитационного поля. Переход от глобальной пространственно-временной симметрии (группа Лоренца) к соответствующей локальной симметрии приводил к искривленному пространству-времени, интерпретируемому через посредство связности как гравитационное поле. Эйнштейн, правда, делал акцент на метрических, а не на связностных аспектах геометрии и гравитации. Только после работ Т. Леви-Чивиты, Г. Вейля, А. Эддингтона стал выясняться фундаментальный характер понятия связности (см. гл. 3—5).

Более выпукло связностная природа поля, именно электромагнитного поля, обозначилась в теории Вейля. Локализация преобразования подобия и изменение длины векторов в соответствии с этим⁸

⁷ Об истории введения термина «gauge» см. также [8, 332].

преобразованиями при параллельном переносе векторов оказывались непосредственно связанными с 4-вектором, обладающим свойствами электромагнитного потенциала. Спустя 10 лет, как мы увидим, выяснилось, что электромагнитное поле действительно связано с локальной калибровочной симметрией и имеет калибровочную природу, но роль экспоненциального преобразования метрики выполняет соответствующее преобразование волновых функций электрона, и притом с мнимым показателем. Подтвердился и связанный характер электромагнитного поля, относящийся, однако, не к параллельному переносу отрезков, а к параллельному переносу волновых функций электрона, являющихся спинорами, в римановом пространстве. Используя язык расслоенных пространств, Ю. И. Манин в этой связи заметил: «Что электромагнитное поле является связностью, впервые предположил Герман Вейль, но в доквантовой физике он не смог указать, на каком расслоении эта связность определяет параллельные переносы, решив, что поле меняет длины отрезков, прошедших по разным путям в пространстве-времени» [383, с. 26].

ЛОКАЛЬНЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Локальные калибровочные преобразования волновых функций и их связь с калибровочными преобразованиями потенциалов, а также инвариантность волновых уравнений квантовой механики с учетом электромагнитного взаимодействия относительно сочетания этих преобразований были установлены сразу же после возникновения квантовой механики, в 1926 г. И на этот раз не обошлось без помощи некоторого варианта единой геометризованной теории поля, именно пятимерной теории Калуцы — Клейна (см. гл. 4 и 5).

Познакомившись с идеей пятимерия по рукописи статьи Г. А. Мандела [271], В. А. Фок нашел возможность истолковать скалярное волновое уравнение в пятимерном римановом пространстве как релятивистское обобщение уравнения Шредингера [270]. Впоследствии стало ясно, что электроп обладает спином и поэтому уравнение Фока описывает не электрон, а бесспиновую частицу. Примерно тогда же это уравнение было получено О. Клейном (тоже на основе пятимерного подхода), В. Гордоном, Э. Шредингером и др. (уравнение Клейна — Фока). Фок также показал, что траектория заряженной частицы может рассматриваться как геодезическая линия в пятимерном римановом пространстве.

Именно в этой работе Фока, поступившей в редакцию «Zeitschr. f. Phys.» 30 июля 1926 г., и появились впервые локальные калибровочные преобразования. Заметив, что пятимерное волновое уравнение должно быть инвариантным относительно обобщенных калибровочных преобразований

$$A'_\mu = A_\mu + \frac{\partial f}{\partial x_\mu}, \quad u' = u - f, \quad (14)$$

где f — произвольная функция пространственно-временных координат, а u — пятая координата, Фок указал, что для соответствующего четырехмерного волнового уравнения инвариантность относительно локальных калибровочных преобразований остается в силе только в том случае, если волновую функцию умножить на экспоненциальный множитель $e^{\frac{2\pi i}{hc} f}$. «Функции ψ_1 и $\bar{\psi}_1$, связанные с потенциалами \bar{A} и $A = A - \text{grad } f$, отличались бы друг от друга лишь множителем $e^{\frac{2\pi i}{hc} f}$, равным по абсолютной величине 1...» — писал Фок (здесь ψ_1 — квантовомеханическая волновая функция) [270, с. 228]. Естественно, что эти выводы распространяются и на релятивистское уравнение Шредингера, хотя Фок думал, что физическое значение пятого измерения имеет непосредственную связь с калибровкой потенциалов⁸.

Аналогичная работа О. Клейна, который исходя из теории Калуцы получил результаты, близкие к результатам Фока, хотя и появилась несколько раньше, не содержала результатов, относящихся к калибровочной инвариантности [258]. И Клейн и Фок вводили условие периодической зависимости волновой функции от пятой координаты. При введении этого условия Фок ссылался на рассмотренную выше статью Шредингера 1922 г. [352]. Фок считал, что цикличность «вейлевской меры» длины на квантовых орбитах, имеющая прямое отношение к свойствам электромагнитного потенциала, связана с условием периодичности волновой функции по пятой координате. Опираясь на эту статью Шредингера, Ф. Лондон в конце 1926 — начале 1927 г. показал, что если в выражении для вейлевской меры длины

$$l = l_0 e^{\alpha \int \psi_1 dx_5}$$

ввести в качестве α вслед за Шредингером значение $\frac{2\pi i}{h} \frac{e}{c}$, то эта величина по своим свойствам окажется совпадающей с дебройлевской волновой функцией (в ее пятимерном обобщении) [355]. То же самое он показывает, в сущности, и для волновой функции, фигурирующей в квантовой механике в формулировке Шредингера. Это автоматически перенесло трансформационные свойства симметрии теории Вейля на квантовую механику, другими словами, вело к переходу локальных калибровочных преобразований теории Вейля в квантовомеханические локальные калибровочные преобразования уже установленные Фоком.

Заметим, что Лондон знал о статье Фока: он ссылался на нее в своей короткой заметке, опубликованной в «Naturwissenschaften», но лишь в связи с пятимерным релятивистским обобщением урав-

⁸ «Значение дополнительного координатного параметра (т. е. пятого измерения. — В. В.), — писал Фок, — по-видимому, заключается как раз в том, что он обуславливает инвариантность уравнений относительно добавления произвольного градиента к четырехпотенциалу» [270, с. 228].

нения Шредингера [275]. И он и Фок своими основными результатами считали не установление калибровочной симметрии, а обнаружение связи квантовой теории с едиными геометризованными теориями поля.

Таким образом, в 1926 г. Фок и Лондон установили локальную калибровочную инвариантность электромагнитного взаимодействия. Общими особенностями их работ были: 1) стремление связать квантовую механику с едиными геометризованными теориями поля; 2) побочный характер вывода о калибровочной симметрии. Не менее интересны и различия. Фок отдавал предпочтение пятимерной единой теории поля, Лондон — теории Вейля. Фок чисто формально отметил необходимость дополнения калибровочных преобразований потенциалов локальными калибровочными преобразованиями волновых функций, т. е. констатировал комбинированную калибровочную инвариантность уравнений квантовой механики с электромагнитным взаимодействием как математическое свойство этих уравнений. Лондону казалось, что ему удалось понять физический смысл волновой функции, которую он интерпретировал как вейлевскую меру длины. Калибровочная симметрия волновых функций при этом приобретала тот же геометрический смысл, что и калибровочная симметрия в теории Вейля. Путь Лондона, можно сказать, был в большей мере физическим, чем путь Фока, но и более спекулятивным.

Лондон считал, впрочем, что после его работы возражения Эйнштейна и Паули против геометрии Вейля и его теории теряют свою силу, по крайней мере в тех случаях, когда принимаются во внимание лишь состояния движения, допустимые квантовыми постулатами: «Возражения Эйнштейна, таким образом, теряют силу, когда принимаются во внимание лишь состояния движения, возможные с квантово-теоретической точки зрения, а также связанные с ними резонансные свойства» [275, с. 187]. Ввиду же признанной сейчас ошибочности теории Вейля, по крайней мере в ее обычной интерпретации, основное построение Лондона утратило свое значение, хотя именно на этом пути он пришел к волновым функциям. Выводы же Фока и схема его рассуждений, относящихся к калибровочной симметрии, сохранили свое значение и при отвлечении от вопроса о связи квантовой механики с едиными теориями поля.

ОТ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИММЕТРИИ К КАЛИБРОВОЧНЫМ ПОЛЯМ

После возникновения квантовой механики интересы Г. Вейля переключились именно в эту область. Его выдающиеся исследования по теории представлений групп и их применению в квантовой механике были суммированы в книге «Теория групп и квантовая механика», первое издание которой увидело свет в 1928 г. [384]. Идея калибровочной симметрии в этой книге была сформулирована вслед за работами Лондона и Фока со всей отчетливостью. При этом Вейль не

пытался, подобно Лондону, реабилитировать свою единую теорию 1918—1923 гг. и вместе с тем шел несколько дальше Фока в физическом осмыслении этой симметрии. Во-первых, он подчеркивал, что требование калибровочной инвариантности связано с ненаблюдаемостью волновых функций и с тем, что непосредственный физический смысл имеют их квадраты, т. е. величины $\psi^*\psi$. Во-вторых, он полагал, что новый «принцип калибровочной инвариантности» в противовес его геометризованной теории поля «объединяет не электричество и гравитацию, а скорее электричество и материю». Под материей понимались заряженные микрочастицы, движение которых описывалось уравнениями Шредингера или уравнениями Дирака. Вейлевская формулировка «принципа калибровочной инвариантности» гласила: «Полевые уравнения для потенциалов ψ и φ (волновую функцию ψ он также называет потенциалом ввиду ее ненаблюдаемости.— В. В.) инвариантны относительно одновременной замены

$$\psi \text{ на } e^{i\lambda}\psi \text{ и } \varphi_\alpha \text{ на } \varphi_\alpha - \frac{\hbar}{e} \frac{\partial \lambda}{\partial x_\alpha},$$

где λ — произвольная функция пространственно-временных координат» [384, с. 88]. Сравнивая эти преобразования с калибровочными преобразованиями своей единой теории, Вейль отмечал солидную экспериментальную обоснованность первых, отнесение экспоненциального множителя к волновым функциям, а не к метрике (как в теории 1918 г.), естественность введения атомных единиц для потенциала, а также то замечательное обстоятельство, что показатель экспоненты является чисто мнимым, а не действительным (как в теории 1918 г.). «Уже в то время, когда я выдвинул свою старую теорию,— говорил Вейль в 1930 г.,— у меня было чувство, что калибровочный множитель должен иметь форму $e^{i\lambda}$. Естественно, однако, что я тогда не смог найти для этого никакого геометрического обоснования. Работы Шредингера и Лондона поддержали эту идею на пути все более отчетливого осознания связи проблемы с квантовой теорией» [17, с. 57].

Переход от калибровочной симметрии 1918 г. к калибровочной симметрии 1926—1928 гг. непосредственно приводил к выводу о калибровочной природе электромагнитного поля, контуры которой, как мы видели, были намечены уже в 1918 г. Этот вывод в полной мере был сделан самим Вейлем в его знаменитой работе 1929 г. [313]. Первый сокращенный вариант этой работы появился на английском языке (поступил в редакцию в феврале—марте 1929 г.) [311]. Хотя Вейль и отказался от своей единой теории поля и вообще от геометрического направления, проблема синтеза гравитации, электромагнетизма и квантовой механики по-прежнему привлекала его.

В 1928 г. Дирак построил релятивистскую квантовую механику, в которой электрон описывался 4-компонентной волновой функцией, получившей впоследствии название спинора. Теория Дирака автоматически учитывала спиновые свойства электрона и давала правиль-

ные результаты для атома водорода. Трудность теории заключалась в том, что она допускала состояния с отрицательной энергией, которым не удавалось придать ясный физический смысл. Вейль полагал, что если перейти к двухкомпонентному варианту теории, то «лишние» уровни, которые он уже тогда интерпретировал как уровни энергии «положительного электрона», удастся исключить. Теория при этом должна была утратить зарядовую симметрию и симметрию относительно пространственных отражений. Но это можно было сделать при вычеркивании из уравнения Дирака члена с массой покоя. Вейль считал, поскольку масса неразрывно связана с гравитацией, то корректный учет массы можно будет произвести на следующей стадии, т. е. при согласовании теории с общей теорией относительности. Обращение к общей теории относительности Вейль считал неизбежным и потому, что столь близкая его сердцу калибровочная симметрия имела, по его же словам, общерелятивистский характер: «Так как калибровочная инвариантность включает в себя произвольную функцию λ , то она имеет характер „общей относительности“ и, естественно, может быть понята только в рамках общей теории относительности» [313, с. 245].

Здесь пути развития калибровочной концепции вновь пересекаются с едиными теориями поля. На этот раз с эйнштейновской теорией с абсолютным параллелизмом (см. гл. 5). Хотя и эта теория, как мы помним, не привела к реальным сдвигам в решении проблемы объединения гравитации и электромагнетизма, она сыграла важную роль в развитии «тетрадного формализма», который оказался весьма подходящим для обобщения уравнения Дирака на римановы пространства, т. е. для корректного учета гравитации в теории Дирака. Этот формализм и был использован Вейлем, а также независимо от него Фоком и Д. Д. Иваненко, о работах которых мы скажем несколько позже. В этом замысле Вейля и гравитационное и электромагнитное поля оказались органически связанными с требованиями локальной симметрии, совершенно в духе калибровочной концепции. Исходными предлагалось считать двухкомпонентные спинорные уравнения дираковского типа для электронов и протонов. Требования локальной справедливости специальной теории относительности и общей ковариантности должны были ввести гравитацию, что, в свою очередь, позволило бы решить вопрос о массах частиц. Требование локальной калибровочной инвариантности, согласованной с градиентной симметрией электромагнитных потенциалов, должно было ввести электромагнитное поле, определяемое этими потенциалами. «По моему мнению, происхождение и необходимость (*die Ursprung und Notwendigkeit*) электромагнитного поля определяются следующим. Компоненты (волновой функции. — *V. B.*) ψ_1 и ψ_2 в действительности фиксируются не однозначно выбором системы координат, а лишь в такой степени, что они еще могут быть умножены на некоторый произвольный „калибровочный множитель“ $e^{i\lambda}$ с абсолютным значением 1. ... В специальной теории относительности этот калибровочный множитель следует считать постоянным, потому что в этом случае мы имеем единственную, не связанную

с какой-либо точкой систему координат. Иначе обстоит дело в общей теории относительности: каждая точка имеет свою собственную систему координат, а потому также свой собственный произвольный калибровочный множитель; вследствие того что в этой теории жесткая связь между системами координат в различных точках утрачена, калибровочный множитель с необходимостью становится произвольной функцией положения» [313, с. 245].

Таким образом, локальную калибровочную инвариантность Вейль в духе своей единой теории поля 1918 г. связывал с необходимостью введения в каждой точке пространства-времени локальной лоренцевой системы координат. Это означало переход к произвольному искривленному риманову пространству-времени. И «лишь благодаря такому „размягчению“ (“Lockerung”) пространства,— писал Вейль,— может быть понята существующая в действительности такая калибровочная инвариантность» [313, с. 246]. Именно в этом пункте имеется расхождение между Вейлем и Янгом — Миллсом в обосновании локальных калибровочных преобразований. Вейль связывал ее с переходом к риманову пространству и общей теории относительности, а Янг и Миллс — с «концепцией локализованного поля, лежащей в основе обычных физических теорий» [346, с. 30]. Механизм «порождения» электромагнитного поля у Вейля в точности соответствует схеме введения калибровочного поля: переход к локальной калибровочной инвариантности приводит к нарушению инвариантности исходного лагранжиана (или вариационного принципа) для свободного спинорного поля, и тогда для восстановления инвариантности вводится некоторое векторное поле, которое можно интерпретировать как электромагнитное поле. Электромагнитное поле в изложенной схеме Вейля не считается заданным, речь, как мы видели, идет о «происхождении и необходимости» этого поля в результате локализации калибровочной симметрии.

В этой же работе Вейля был решен вопрос о форме уравнения Дирака в римановом пространстве. Эта проблема была исследована в этом же 1929 г. и в серии работ В. А. Фока и Д. Д. Иваненко [264, 385—388]. Вейль связывал переход к римановой геометрии с построением некоторого обобщения теории Дирака на систему электрон плюс протон. Фок же (вначале совместно с Иваненко) стремился дать корректную формулировку теории Дирака в рамках общей теории относительности. Не вдаваясь в детали, отметим, что для Вейля и для советских физиков исходным был тетрадный формализм, разработанный годом раньше Эйнштейном в рамках его единой теории поля с абсолютным параллелизмом. Используя понятие параллельного переноса спинора, они нашли выражение для ковариантной производной спинора, которая при переходе к плоскому пространству превращалась не просто в обычную производную, а в выражение

$$\frac{\partial}{\partial x_\mu} - ieA_\mu, \quad (15)$$

с самого начала фигурирующее в квантовой теории и учитывающее

наличие электромагнитного поля. Таким образом, оказывалось, что электромагнитные потенциалы проявляют себя как связность при параллельном переносе спинора. В этом результате весьма отчетливо проявился связностный характер электромагнитного поля. Кроме того, был найден и геометрически обоснован простой рецепт восстановления инвариантности лагранжиана свободного спинорного поля при локализации калибровочных преобразований с постоянной фазой: замена обычных производных от волновых функций так называемыми компенсирующими производными, т. е. замена

$$\frac{\partial}{\partial x_\mu} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x_\mu} - ieA_\mu.$$

Кстати говоря, термин «компенсация» в рассматриваемом случае был использован и в статье Янга и Миллса («Что касается способа обеспечения инвариантности, то следует заметить, что в электродинамике для компенсации изменения α с изменением x, y, z, t возникает необходимость вводить электромагнитное поле A_μ ...» [346, с. 30]).

Когда Фок познакомился с вейлевскими работами 1929 г., он подчеркнул их тождество со своими работами (написанными отчасти совместно с Иваненко) в отношении понятия параллельного переноса спинора и введения «компенсирующей производной», но подверг критике физическую сторону замысла Вейля. Все же следует напомнить, что признанные сейчас ошибочными физические соображения Вейля привели его к волновым уравнениям для двухкомпонентных спиноров, не инвариантных относительно пространственных отражений и описывающих движение безмассовых фермионов. Эти уравнения в 1956—1957 гг. были использованы тем же Янгом и Т. Д. Ли для описания процессов, в которых фигурировали нейтрино и не сохранялась четность, а затем в четырехфермионной теории слабого взаимодействия Р. Фейнмана и М. Гелл-Манна. Паули в своем знаменитом обзоре по квантовой механике, написанном в 1932 г., не прошел мимо нетривиальных двухкомпонентных уравнений Вейля, но, указав на их неинвариантность относительно пространственного отражения, заметил, что они «вследствие этого неприменимы к физическим объектам» [389, с. 254].

В мае 1930 г. Вейль прочитал в Кембридже лекцию «Геометрия и физика», которая затем была напечатана в «Naturwissenschaften» [17]. Он очень резко высказался против программы единых геометризованных теорий поля, не учитывающей квантовую теорию, хотя именно в русле этой программы, как мы видели, в значительной мере были открыты и развиты различные стороны калибровочной симметрии и концепции калибровочных полей: «По-моему, вся ситуация за последние четыре или пять лет полностью изменилась благодаря открытию материального поля (т. е. квантовой механики микрочастиц, описываемых волновыми функциями ψ —*V. V.*). Все эти геометрические прыжки (Lüftsprünge) были преждевременными, и мы возвращаемся на твердую почву физических фактов»

[17, с. 58]. Не следовало теперь, после выяснения калибровочной природы электромагнитного поля, искать объединенное геометрическое описание гравитации и электромагнетизма: «Электромагнитное поле идет в кильватере корабля материи, а не гравитации... Если уж говорить о геометризации,— продолжал Вейль,— то... следует исходить из геометризации материального поля; если ее удастся провести, то электромагнитное поле будет получено как премия» [там же]. Для Вейля, таким образом, новый принцип калибровочной инвариантности в противовес калибровочной симметрии его старой теории оказывался сильнейшим аргументом против единых геометризованных теорий поля и, наоборот, важным доводом в пользу фундаментальности квантово-теоретического подхода.

Вейль также понимал, что калибровочный характер электромагнитного поля связан с двойным толкованием электрического заряда как сохраняющейся величины и как источника поля. Еще в своей единой теории 1918 г. он показал, что закон сохранения заряда вытекает из калибровочной симметрии. Этот вывод был сделан им и для новой калибровочной симметрии, зависящей от произвольной функции пространства-времени. Но с точки зрения теорем Нетер об инвариантных вариационных задачах законы сохранения ассоциируются с конечно-параметрическими непрерывными группами. В частности, закон сохранения заряда оказывается следствием инвариантности действия относительно калибровочного преобразования волновых функций с постоянной фазой. Это было четко сформулировано в статье Гейзенберга и Паули «К квантовой теории волновых полей», опубликованной в 1930 г. [390]. В этой же статье была показана важная эвристическая роль локальной калибровочной симметрии при построении корректной квантовой теории поля. В ряде мест в этой статье мы находим утверждения такого типа: «Все же представляется обоснованным предположение о том, что физический смысл имеют лишь те величины, которые инвариантны относительно (13) (т. е. локального калибровочного преобразования.— *В. В.*)», или: «Поскольку непосредственно измеряемые физические величины всегда градиентно-инвариантны (т. е., что то же самое, калибровочно-инвариантны.— *В. В.*) и т. д.» [390, с. 94—95]. Поэтому Вейль в своей кембриджской лекции имел полное основание говорить, что «для дальнейшего развития квантовой теории эта новая калибровочная инвариантность... имеет, по-видимому, еще большее значение, как это было показано в работе Гейзенберга и Паули по квантованию уравнений поля» [17, с. 58]. Дальнейшее развитие квантовой теории поля подтвердило эту раннюю оценку важности калибровочных преобразований.

Уже в конце 70-х годов Янг говорил о трех аргументах в пользу калибровочной концепции [8]. О двух из них (в рамках электродинамики) мы уже говорили. Это — требование локального характера калибровочных преобразований и связанная с ним двойная интерпретация заряда как сохраняющейся величины и как источника поля. Третий аргумент опирается на понятие «неоднозначности фазы волновых функций», или «неинтегрируемости фазы волновых

функций». Смысл его заключается в том, что при наличии электромагнитного поля калибровочный множитель, связывающий волновые функции в некоторых точках A и B ,

$$\exp \left[-i (e/hc) \int_A^B A_\mu dx_\mu \right]$$

оказывается зависящим от пути интегрирования, иначе говоря, полное изменение фазы при обходе по замкнутой кривой оказывается не равным 0. Эти соображения впервые были развиты Дираком в его классической статье о монополе (1931) [391]. Как уже было известно из работ Вейля, а также Фока и Фока — Иваненко, подчеркивал Дирак, «волновая функция Ψ всегда должна удовлетворять одному и тому же волновому уравнению, независимо от того, существует поле или нет, а весь эффект поля, когда оно существует, состоит в том, что фаза становится неинтегрируемой». «Это проясняет физический смысл неинтегрируемости фазы» и связывает ее с калибровочной концепцией. «Связь между неинтегрируемостью фазы и электромагнитным полем,— заметил далее Дирак,— ...не нова; по существу она выражает вейлевский принцип градиентной инвариантности в его современной форме (и здесь он ссылается на рассмотренную выше статью Вейля, опубликованную в 1929 г. в «Zeitschr. f. Phys.» — В. В.). Она содержится также,— продолжал Дирак,— в работе Иваненко и Фока... которые рассмотрели неинтегрируемость более общего типа, основанную на общей теории параллельного переноса полувекторов (т. е. спиноров.— В. В.)» [391, с. 48]. С помощью удивительно простого рассуждения, использующего этот аспект локальной калибровочной инвариантности, Дирак пришел к представлениям о монополе. В середине 70-х годов Янг и Т. Т. Ву писали, что «электромагнетизм является калибровочно-инвариантным проявлением фазового множителя» [8, с. 95].

Таким образом, к началу 30-х годов принцип локальной калибровочной инвариантности и связанная с ним калибровочная концепция электромагнитного поля органически вошли в арсенал теоретических средств квантовой теории, и об их «незаконном» происхождении на почве программы ЕГТП вскоре стали забывать. Однако вклад этой программы (и прежде всего единых теорий Вейля, Калуды — Клейна, эйнштейновской теории с абсолютным параллелизмом) в разработку калибровочных идей, как мы видели, был определяющим.

НА ПУТИ К ТЕОРИИ ЯНГА — МИЛЛСА

Принцип локальной калибровочной симметрии и в известной мере калибровочная концепция электромагнитного поля, как мы видели, оказались на рубеже 20-х и 30-х годов в центре внимания теоретиков (Вейль, 1928—1931; Фок, Фок и Иваненко, 1929; Гейзенберг и Паули, 1929—1930; Дирак, 1931, и т. д.). Первой монографией, где

был четко сформулирован принцип локальной калибровочной инвариантности, было первое издание книги Вейля «Теория групп и квантовая механика» (1928) [384]. Во втором издании, опубликованном в 1931 г. на немецком и английском языках, уже были учтены рассмотренные выше работы Вейля и Фока 1929 г. [392]. В 1933 г. появился в 24-м томе «Handbuch der Physik» знаменитый обзор Паули по квантовой механике, включающий релятивистскую теорию и основы квантовой электродинамики [389]. В этом замечательном монографическом обзоре, сохранившем научное значение до настоящего времени, Паули в ряде мест (см. с. 52—53, 264—266, 317—318 и др. русского издания 1947 г.) обращается к принципу локальной калибровочной инвариантности. Кстати говоря, он даст даже сжатый исторический обзор этого принципа, называя при этом рассмотренные выше работы Фока, Лондона, Вейля. Вместе с тем специально на калибровочной концепции электромагнитного поля Паули не сосредоточивал внимания, хотя в неявной форме она, безусловно, содержалась в его работе.

С этого времени развитие калибровочных идей происходило почти целиком в рамках квантовой электродинамики и квантовой полевой теории элементарных частиц. 1932 год, в котором был написан упомянутый обзор Паули, был переломным в развитии физики. Именно в этом году, можно сказать, появилась физика элементарных частиц как физика трех основных взаимодействий: электромагнитного, слабого и сильного. Теоретические работы Э. Ферми, П. Дирака, В. А. Фока, открытие позитрона К. Андерсоном завершили создание квантовой электродинамики. Открытие нейтрона Дж. Чэдвиком и последовавшее за ним введение изоспина Гейзенбергом создали фундамент для построения теории сильных взаимодействий. Ферми разработал первую теорию слабых взаимодействий.

После квантовой механики это было вторым и решающим ударом по программе ЕГТП, ориентированной в первую очередь на геометрическое объединение только электромагнитного и гравитационного полей. Определенный итог первому периоду развития физики элементарных частиц и их взаимодействий, связанному также с последующими работами В. Гейзенберга, Е. Вигнера, Х. Юкавы, В. Паули, П. Дирака, Э. Ферми, И. Е. Тамма, В. Вайскопфа, А. Прокка, Н. Кеммера, Л. Д. Ландау и др., был подведен в другом обзоре Паули, опубликованном в «Reviews of modern phys.» в 1941 г. и также ставшем классическим [362]. В этой работе, где на первый план был выдвинут единый подход к теоретическому описанию элементарных частиц, основанный на квантово-полевой концепции, вариационном принципе, принципах инвариантности и законах сохранения, калибровочной инвариантности было уделено достаточно внимания. Именно здесь Паули ввел понятия калибровочных преобразований 1-го и 2-го родов, еще раз четко показал связь закона сохранения заряда с глобальными калибровочными преобразованиями 1-го рода, подчеркнул возможность существования других зарядовых законов сохранения и связанных с ними калибровочных симметрий. В обзоре также было ясно подчеркнуто в духе калибровоч-

ной концепции электромагнитного поля, что это поле можно ввести переходом к «компенсирующей» производной

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_k} - ie\varphi_k,$$

и отмечено, что это равносильно требованию локальной калибровочной инвариантности. Этот тридцатистраничный обзор Паули, как и предыдущий его обзор по квантовой механике, стал исходным пунктом для всех тех, кто в конце 40-х — середине 50-х годов начал разрабатывать обобщенную концепцию калибровочных полей (Ч. Н. Янг, Р. Миллс, Т. Д. Ли, Р. Утияма, Дж. Сакураи, Ю. Швингер и др.).

В 1943 г. появился первый учебник по квантовой теории элементарных частиц и квантовой теории поля — книга Г. Вентцеля [393]. В отношении калибровочной симметрии учебник Вентцеля содержал не более, чем предшествующий обзор Паули; основное внимание уделялось формальным аспектам требования калибровочной симметрии; собственно калибровочная природа электромагнитного поля оставалась в тени.

В конце 40-х — начале 50-х годов требование калибровочной инвариантности часто применялось как важный формальный прием в ряде работ по квантовой электродинамике, в том числе в работах Р. Фейнмана, С. Томонаги, Ю. Швингера, удостоенных впоследствии Нобелевской премии. Все же в монографиях и учебниках начала 50-х годов калибровочная концепция электромагнитного поля не выдвигалась на первый план и не была обрисована достаточно ясно, хотя рассмотренные выше обзоры Паули считались настоящими книгами всех теоретиков, работающих в области физики элементарных частиц и квантовой теории поля. За год до статьи Янга и Миллса о калибровочной природе электромагнитного поля как о трактовке общеизвестной писал Ю. Швингер во второй статье из серии под названием «Теория квантованных полей» (1953) [394]. Имя Швингера в эти годы было уже хорошо известно всем занимающимся проблемами квантовой теории поля и элементарных частиц. В 1956 г. эти статьи были переведены на русский язык и изданы в виде отдельной книги. «Постулат общей калибровочной инвариантности (т. е. локальной калибровочной инвариантности.— В. В.), — писал Швингер, — позволяет ввести электромагнитное поле. Если все поля и источники подвергаются общему калибровочному преобразованию

$$\chi = \exp(-i\lambda(x)e)\chi,$$

то рассматриваемая функция Лагранжа изменяется следующим образом:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L} + j_\mu \partial_\mu \lambda.$$

Добавление лагранжевой функции электромагнитного поля... дает компенсирующую (таким образом, характерный термин «компенсация» в рассматриваемом контексте появляется впервые не у Янга

и Миллса, а у Швингера.— В. В.) величину при помощи сопутствующего калибровочного преобразования $A_\mu = A_\mu - \partial_\mu \lambda$ [394, с. 45—46).

Весьма примечательно, что в качестве наиболее близкой к излагаемой им трактовке электромагнитного поля Швингер называет подход Паули, содержащийся в его обзоре 1933 г. Думается, что не случайно именно Швингер одним из первых включился в разработку теории калибровочных полей и внес важный вклад в решение вопроса о массивных калибровочных полях. В связи с этим заслуживает внимания одно место из первой статьи Сакураи по теории калибровочных полей. Имея в виду обобщенную калибровочную концепцию, он пишет: «Эта идея чрезвычайно глубокая, возможно, самая глубокая в теоретической физике со времени создания теории Дирака. Ее основное следствие состоит в том, что при наличии закона сохранения некоторого внутреннего свойства должно с необходимостью существовать соответствующее ему взаимодействие векторного типа, иначе этот закон сохранения противоречил бы понятию локализованного поля» [357, с. 52]. Далее Сакураи добавляет: «Как говорит Швингер, внутренние свойства должны „проявлять себя дипамически“» (последние кавычки относятся, по-видимому, к словам Швингера.— В. В.). Последнюю мысль Швингера, совпадающую, в сущности, с главной идеей статьи Янга и Миллса, Сакураи формулирует еще и в таком виде: «Внутренняя симметрия — ergo дипамика»⁹.

Основные законы электродинамики как классической, так и квантовой, были сформулированы, по существу, без использования калибровочной концепции электромагнитного поля. Во всяком случае, «фотоп, конечно, не был открыт из требования локальной калибровочной инвариантности. Наоборот, калибровочные преобразования были найдены как полезные свойства максвелловских уравнений», — писали в своем обзоре калибровочных теорий Е. С. Аберс и Б. В. Ли [395, с. 253]. Правда, калибровочная трактовка электромагнитного поля, развитая в 20—30-х годах Вейлем и Фоком и поддержанная затем Паули и Дираком, позволила значительно углубить связи с другими полями и элементарными частицами. Но основное значение этой трактовки, как выяснилось в середине 50-х и начале 60-х годов, проявилось в возможности ее обобщения на различные внутренние симметрии элементарных частиц. На этот раз калибровочная концепция сработала, и на ее основе были развиты и единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий Вайнберга-Салама, и квантовая хромодинамика, являющаяся современной теорией сильных взаимодействий.

Таким образом, произошло своеобразное «обращение» ситуации: будучи построенной на основе калибровочной трактовки уже существующей теории электромагнитного поля, в которой эта трактовка не играла большой роли, обобщенная концепция калибровочных по-

⁹ Другим пионером этой концепции на рубеже 40—50-х годов был, как подчеркивал Сакураи, Е. Вигнер.

лей оказалась на редкость плодотворной. Такого рода «обращение» — весьма характерная особенность развития научного знания. Поэтому, в частности, полезно и важно искать различные эквивалентные переформулировки фундаментальных теорий.

Почему обобщенная калибровочная концепция возникает с таким запозданием, т. е. через 25—30 лет после ее формулировки в электродинамике? Причина этого, по-видимому, заключается в том прежде всего, что именно к началу 50-х годов накопился достаточно обширный эмпирический материал по взаимодействиям элементарных частиц, который частично удавалось систематизировать в терминах законов сохранения и связанных с ними внутренних симметрий¹⁰. К тому же в 30-х и 40-х годах, несмотря на успехи принципов инвариантности и теоретико-групповых методов, многие проблемы только что возникшей мезодинамики пытались вначале решить чисто динамически. Негативную роль могло сыграть возникновение в начале и середине 50-х годов скептического отношения к лагранжевому формализму в квантовой теории поля.

Интересно, что с открытием калибровочной симметрии и калибровочной природы электромагнитного поля, поначалу казавшихся формальными и физически не столь существенными аспектами электродинамики, оказались связанными так или иначе многие фундаментальные физические теории и концепции: общая теория относительности, единые геометризованные теории поля (теория Вейля, пятимерие, теория с «абсолютным параллелизмом и др.), квантовая механика как перерелятивистская, так и релятивистская, квантовая теория поля, теоремы Нетер, связывающие законы сохранения с принципами инвариантности, а также важные методологические идеи и принципы физики — принципы наблюдаемости, близкодествия, симметрии т. д. В калибровочной концепции, как в фокусе, сошлись многие казавшиеся не связанными друг с другом теоретические линии. И спустя четверть века обобщенная соответствующим образом эта концепция выдвигается постепенно на передний план развития фундаментальной физики и в 60—80-х годах становится основой для построения единой квантовой теории взаимодействия элементарных частиц. Таким образом, возникнув на пересечении основных линий развития физики, калибровочная концепция возвращает свой долг физике и становится основным орудием дальнейшего синтеза физического знания.

Адекватным математическим аппаратом теории калибровочных полей является к тому же одна из наиболее красивых и мощных математических теорий — теория расслоенных пространств [7]. Поля, характеризующие частицы — источники (например, электроны), описываются сечениями расслоенного пространства. Калибро-

¹⁰ Сам Янг писал в 1977 г.: «С открытием множества частиц после второй мировой войны исследовали различные взаимодействия между элементарными частицами...; желание найти некоторый принцип выбора среди многих возможностей (теоретического описания возникшей ситуации.— В. В.) было одним из главных мотивов... для обобщения вейлевского калибровочного принципа, относящегося к электромагнетизму» [8, с. 86].

вочные же поля (фотоны, например) описываются связностью расслоенного пространства. Внутренняя симметрия, локализация которой «порождает» калибровочное поле (например, калибровочная симметрия 1-го рода), является группой симметрии слоя. Базой расслоенного пространства является четырехмерное пространство-время. «Компенсирующая» производная, с помощью которой в лагранжиане поля и в полевых уравнениях учитывается переход к локальной симметрии и взаимодействие исходного поля с калибровочным, отождествляется с ковариантной производной в расслоенном пространстве. Частным случаем расслоенных пространств являются пространства со связностями (например, пространство аффинной, евклидовой, конформной, проективной и других связностей), разработка геометрии которых была стимулирована разработкой общей теории относительности и единых геометризованных теорий поля. Решающий вклад в развитие этих геометрий в 20—30-х годах внесли Г. Вейль, Э. Картан, Я. Схоутен и др. Весьма любопытно, что понятие расслоенного пространства, эквивалентное конструкциям с полями Янга—Миллса, было развито в начале 50-х годов математиком Ш. Эресманом, буквально за несколько лет до появления работы Янга и Миллса.

ВЫВОДЫ

Затянувшийся регресс программы ЕГТП на фоне блестящих успехов квантово-теоретической программы, обнаруживший себя уже в 1926 г. (создание основ квантовой механики) и ставший вполне очевидным с начала 30-х годов (возникновение физики ядра и элементарных частиц), породил весьма распространенное впоследствии мнение о бесперспективности, бесполезности, тупиковости всего направления ЕГТП, и в частности более чем 30-летних усилий самого Эйнштейна на этом пути.

Программные установки двух конкурирующих глобальных стратегий фундаментальной физики 20—30-х годов выглядели полярными, хотя квантово-теоретическая программа, несколько туманная до 1925—1926 гг., только после построения квантовой механики обрела достаточно четкие контуры. Несомненно, что наличие конкурирующих программ должно положительно влиять на каждую из них: в условиях конкуренции каждая программа максимально мобилизует свои ресурсы. И с этой точки зрения уже само существование программы ЕГТП было важным фактором в развитии квантовой теории.

Но были и другие, более конструктивные стороны взаимодействия этих программ, в частности воздействия полевой геометризованной программы на исследования в области квантовой физики. В русле программы ЕГТП весьма обстоятельное развитие, хотя и несколько оторванное от живого древа экспериментальной физики, получали абстрактные теоретические и математические аспекты концепции поля (на классическом уровне), пространства-времени, относитель-

ности, инвариантности и пр. И квантово-теоретическая программа, особенно когда ее основная направленность стала смещаться в сторону теории квантовых полей, не отказывалась от использования (порой неявного) идей и методов, получивших развитие в русле программы ЕГТП.

В результате выигрывала, как правило, прогрессирующая программа (в нашем случае квантово-теоретическая). Попытки Шредингера истолковать квантовые условия на языке теории Вейля привели его к прообразу волновой функции уже в 1922 г., что, по всей вероятности, не могло не сказаться на генезисе волновой механики в работах Шредингера 1926 г. Хотя и не видно следов воздействия шредингеровских идей 1922 г. на исследования де Бройля, есть все основания считать, что успешное восприятие и дальнейшее развитие работ последнего Шредингером во многом были связаны с его работой 1922 г. Таким образом, программа ЕГТП оказала эвристическое воздействие на формирование квантовой механики. Конечно, эффект этого воздействия был бы более впечатляющим, если бы работа Шредингера явным образом повлияла на де Бройля или если бы сам Шредингер уже в 1922—1923 гг., опираясь на установленное им «резонансное свойство» квантовых орбит, открыл волны де Бройля и на их основе волновую механику.

Открытие скалярного релятивистского волнового уравнения для бесспиновых частиц (уравнения Клейна — Гордона, или Клейна — Фока) на пути изучения важной связи квантовой механики с пятимерной теорией Калуцы — Клейна; доказательство зарядовой инвариантности любой полевой теории элементарных частиц при разработке аффинного варианта единой теории поля; разработка представлений о калибровочной симметрии, а также о калибровочной природе физических полей (в прямой связи с исследованиями по единым теориям Вейля, Калуцы-Клейна, Эйнштейна и т. д.) — все это яркие свидетельства плодотворного влияния программы ЕГТП на развитие квантовой теории.

Последний пример выходит за рамки иллюстрации и имеет самостоятельное значение. Дело в том, что современный период развития квантовой теории поля и одновременно современный подход к объединению четырех фундаментальных физических взаимодействий, т. е. к эйнштейновской проблеме единой теории поля, являются существенно «калибровочными». И понятие калибровочной симметрии, и калибровочная концепция поля (на примере гравитационного и особенно электромагнитного полей) сформировались, как мы видели, в значительной мере в русле программы ЕГТП и на пути установления связи единых теорий поля с квантовой механикой. Начиная же с середины 50-х годов калибровочная концепция поля стала играть все большую роль в теории элементарных частиц, оказавшись вскоре основным теоретическим средством объединения фундаментальных физических взаимодействий.

Просмотрев выводы, сделанные в каждой главе, и сопоставив их с тем, что написано во введении, читатель сам в состоянии понять, в какой мере автор справился со своей задачей. Едва ли имеет смысл суммировать упомянутые выводы полностью. Все же, подводя общий итог, мы сделаем несколько заключительных замечаний.

Несомненна преемственность единых геометризованных теорий поля с едиными электромагнитными полевыми теориями. «Полевой идеал единства» сформировался именно в русле электромагнитно-полевой программы. ОТО, восприняв этот идеал, добавила к нему идею геометризации физического взаимодействия (поля). Стремясь реализовать «полевой идеал единства» физики, Гильберт попытался объединить концепцию электромагнитно-полевой структуры материи (Ми) с идеей геометризации поля (Эйнштейн). Но этот способ объединения, развитый в рамках аксиоматического замысла и основанный на 2-й теореме Нетер об инвариантных вариационных задачах, оказался крайне формальным и физически некорректным.

Теорию, которая легла в основу всех последующих попыток реализации полевого геометрического синтеза физики, создал воспитанник Геттингена и ученик Гильберта Г. Вейль (1918). Это было действительно объединение гравитационного и электромагнитного полей на единой геометрической основе, совершенно в духе ОТО, главный создатель которой в течение ряда лет был наиболее серьезным оппонентом геттингенских теорий. Несмотря на существенные трудности физического характера, вставшие перед теорией Вейля, она на рубеже 20-х годов рассматривалась как чрезвычайно смелое и перспективное направление.

Программный характер теории Вейля в полной мере проявился лишь в 1921 г., когда возник целый пучок единых теорий, устроенных наподобие вейлевской. Авторы этих теорий — Эддингтон, Калуца, Эйнштейн — непосредственно опирались на конструкцию Вейля, которая была для них образцовой. С этого времени и Эйнштейн включается в русле новой программы, именно программы ЕГТП. Этой весьма теоретичной и высоко математизированной программе, нацеленной не только на объединенное описание гравитации и электромагнетизма (задача-минимум), но и на получение из полевых уравнений частицеподобных решений, обладающих квантовыми свойствами (задача-максимум), противостояла квантово-теоретическая программа, теоретически менее ясная и развитая, во всяком случае на рубеже 20-х годов, но зато значительно более тесно связанная с обширным экспериментальным материалом атомной, электронной и квантовой физики. Эта последняя программа существенно опиралась на квантовые представления Планка, Бора, Эйнштейна; она ставила под сомнение непрерывность первичных физических структур, классическую причинность, идею геометризации основных

физических сущностей. Между этими программами существовали сложные взаимоотношения, далеко не всегда сводящиеся к кооперентной борьбе.

С 1923 г. лидером программы ЕГТП становится Эйнштейн, который в отличие от Вейля, Паули, Эддингтона, постепенно отошедших от нее или активно разрабатывавших более конкретные проблемы физики, все больше сосредоточивает свои усилия на исследовании ЕГТП. Поэтому последующую историю ЕГТП мы связываем в первую очередь с работами Эйнштейна. В результате, стремясь ухватить основную направленность в развитии полевой геометрической программы, мы сознательно отказались от исчерпывающего обзора единых теорий поля, которые в 20-х и 30-х годах выдвигались в огромном числе. Следуя за Эйнштейном, мы чувствовали пульс этой программы, ее взлеты и падения на протяжении всего героического десятилетия. За это время, в течение которого возникла и утвердилась квантовая механика (после чего квантово-теоретическая программа приобрела ясные очертания), были заложены основы квантовой электродинамики и появились первые серьезные ростки физики сильных и слабых взаимодействий, Эйнштейн и другие отвергли одну за другой не менее десятка единых полевых теорий: различные варианты аффинных, аффинно-метрических, пятимерных теорий, теорий с кручением и абсолютным параллелизмом и т. д. Если задача-минимум с существенными оговорками как-то решалась в некоторых из этих схем, то к задаче-максимум, в сущности, так и не удалось приблизиться. Для этого, по крайней мере, как считал Эйнштейн, требовалось, чтобы полевые уравнения теории содержали несингулярные сферически-симметричные статические решения, которые бы можно было отождествить с частицами, например с электроном. Отсутствие таких решений было всегда главной причиной отказа от той или иной теории, во всяком случае для Эйнштейна, который неуклонно стремился к решению задачи-максимум. Первый кризис программа ЕГТП испытала вскоре после создания квантовой механики. Начало физики сильных и слабых взаимодействий (1932) было одновременно связано с началом новой стадии устойчивого регресса эйнштейновской программы. С этого времени исследования по ЕГТП становятся весьма периферийными.

Это привело к широко распространенной точке зрения как о полной бесплодности программы ЕГТП, так и, в частности, о бесплодности более чем тридцатилетних усилий Эйнштейна на пути ее реализации. Эта точка зрения нуждается в существенных коррективах. Уже само существование конкурирующих программ по отношению к прогрессирующей, скажем квантово-теоретической, программе является ценным стимулирующим ее фактором. Но дело не только в этом. Как мы видели, в рамках единых полевых теорий оттачивались, хотя и на классическом уровне, многие важные теоретические аспекты и математические методы ключевых концепций современной физической теории: поля, пространства-времени, относительности, симметрии. Поэтому, когда вслед за квантовой механикой первостепенное значение стали приобретать релятивистская

теория элементарных частиц и квантовая теория поля, методы, структуры и понятия, созданные в единых теориях поля, по крайней мере некоторые из них, были взяты на вооружение квантово-теоретической программой. Недостаточно оформившаяся и теоретически более гибкая, квантовая программа, как правило, выигрывала от контактов с программой ЕГТП. В этом отношении весьма эвристическими оказались попытки связать квантовую теорию с едиными геометризованными теориями поля. Вспомним о роли теории Вейля в генезисе волновой механики Шредингера, об установлении скалярного волнового релятивистского уравнения в связи с пятимерными теориями.

Эйнштейновское доказательство зарядовой симметрии любой единой теории электромагнитного и гравитационного полей (в рамках работ по аффинным и аффинно-метрическим теориям), разработка проблемы вывода уравнений движения из уравнений поля, развитие более гибкого формализма варьирования (метод Палатини) и т. д. — типичные примеры плодотворного эвристического воздействия программы ЕГТП на релятивистскую теорию тяготения и квантовую теорию поля.

Оказалось, что существует весьма органическая связь современных единых теорий поля, основанных на калибровочной концепции, с развитием единых геометризованных теорий поля 20-х и 30-х годов. Дело не столько в общем замысле, сколько в том, что идеи калибровочной симметрии и сама калибровочная концепция поля были развиты первоначально в значительной мере в русле исследований по единым геометризованным теориям поля. Думается, что опыт изучения нелинейных общеквариантных уравнений поля с помощью изощренных геометрических методов и калибровочной идеологии, накопленной исследователями ЕГТП, может оказаться полезным и в дальнейшем.

Теперь ясно, что первоначальный замысел программы ЕГТП сведения реальности к одной из обобщенных геометрий пространства-времени не мог привести к успеху, потому что он не учитывал квантовой структуры этой реальности. Вместе с тем геометрический полевой подход одновременно с идеей объединения четырех основных взаимодействий берет реванш в нынешней калибровочной концепции квантовой теории поля. Как образно заметил Ю. И. Манин, и сейчас «геометрия служит некоторым консервантом для скоропортящейся физики» и «геометрические идеи Римана, Эйнштейна, Германа Вейля и Эли Картана по-прежнему работают в фундаментальной физике» [396, с. 15—16].

Наша работа далеко не исчерпывает проблему изучения истории единых теорий поля. Ее целесообразно продолжить в следующих направлениях: более полный охват теорий 20—30-х годов (особенно массив теорий с ненулевым кручением), изучение (хотя бы в порядке исторического обзора) теорий 30—50-х годов, более полный анализ научно-коммуникативных аспектов, а также воздействия исследований по единым теориям на развитие дифференциальной геометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салам А. Калибровочное объединение фундаментальных сил.— В кн.: На пути к единой теории поля. М.: Знание, 1980, с. 5—35.
2. Паули В. Единая теория поля.— В кн.: Теоретическая физика XX века/Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Изд-во иностр. лит., 1962, с. 419—431.
3. Петров А. З. Некоторые соображения о «единых теориях» поля.— В кн.: Гравитация и теория относительности. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1965, вып. 2, с. 3—8.
4. Нелинейная квантовая теория поля/Под ред. Д. Д. Иващенко. М.: Изд-во иностр. лит., 1959, 464 с.
5. Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц. М.: Мир, 1968, 240 с.
6. Гейзенберг В. Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля.— В кн.: Эйнштейн и развитие физико-математической мысли/Отв. ред. А. Т. Григорьян. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 63—68.
7. Коноплева Н. П., Попов В. Н. Калибровочные поля. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Атомиздат, 1980, 239 с.
8. Yang C. N. Magnetic monopoles, fiber bundles and gauge fields.— Ann. N. Y. Acad. Sci., 1977, vol. 294, p. 86—97.
9. Зельдович Я. Б. Альберт Эйнштейн, его время и творчество.— Природа, 1979, № 3, с. 5—7.
10. Паули В. Теория относительности. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1947, 300 с.
11. Эддингтон А. С. Теория относительности. М.; Л.: ОНТИ, 1934, 508 с.
12. Бергман П. Введение в теорию относительности. М.: Изд-во иностр. лит., 1947, 380 с.
13. Румер Ю. В. Исследования по 5-оптике. М.: Гостехтеориздат, 1956, 152 с.
14. Петров А. З. Геометрия и физическое пространство-время.— В кн.: Алгебра. Топология. Геометрия. 1966. М.: ВИНТИ, 1968, с. 221—265. (Серия «Итоги науки».)
15. Beck G. Allgemeine Relativitätstheorie.— In: Handbuch der Physik. B.: Springer, 1929, Bd. 4, S. 381—408.
16. Lande A. Optik, Mechanik und Wellenmechanik.— In: Handbuch der Physik. B.' Springer, Bd. 20, S. 418—425.
17. Weyl H. Geometrie und Physik.— Naturwissenschaften, 1931, Bd. 19, S. 49—58.
18. Weyl H. 50. Jahre Relativitätstheorie.— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. B. etc.: Springer, 1968, Bd. 4, S. 421—431.
19. Schrödinger E. Space-time structure. Cambridge: Univ. press, 1950, 119 p.
20. Jordan P. Schwerkraft und Weltall. Braunschweig: Vieweg, 1955.
21. Lichnerowicz A. Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme. P.: Masson et Cie, 1955.
22. Tonnelat M. A. Les théories unitaires de l'électromagnétisme et de la gravitation. P.: Gauthier-Villars, 1959, 522 p.
23. Schmutzer E. Relativistische Physik. Leipzig: Teubner, 1968, 974 S.
24. См., например: Pyenson L. History of physics.— In: Encyclopedia of physics/Ed. R. G. Lerner, G. L. Trigg. L. etc.: Addison-Wesley, 1981, p. 404—414.
25. Лакатос И. История науки и ее рациональные реконструкции.— В кн.: Структура и развитие науки/Под ред. Б. С. Грязнова, В. Н. Садовского. М.: Прогресс, 1978, с. 203—269.
26. Грязнов В. С., Садовский В. Н. Проблемы структуры и развития науки в «Бостонских исследованиях по философии науки».— В кн.: Структура и развитие науки. М.: Прогресс, 1978, с. 5—39.
27. Гайденко П. П. Эволюция понятия науки. Становление и развитие первых научных программ. М.: Наука, 1980, 568 с.

28. *Родный Н. И.* Очерки по истории и методологии естествознания. М.: Наука, 1975. 424 с.
29. *Алексеев И. С.* Единство физической картины мира как методологический принцип.— В кн.: Методологические принципы физики. История и современность/Отв. ред. Б. М. Кедров, Н. Ф. Овчинников. М.: Наука, 1975, с. 128—203.
30. *Степин В. С.* Становление научной теории. Минск: БГУ, 1976. 320 с.
31. *Klein M. J.* Mechanical explanation at the end of the nineteenth century.— *Centaurus*, 1972, vol. 17, p. 58—82.
32. *Goldberg S.* Max Planck's philosophy of nature and his elaboration of special theory of relativity.— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1976, v. 7, p. 125—160.
33. *Hirose T.* The ether problem, the mechanistic world view and the origins of the theory of relativity.— In: *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1976, vol. 7, p. 3—82.
34. *McCormack R. H. A.* Lorentz and the electromagnetic view of nature.— *Isis*, 1970, vol. 61, p. 459—497.
35. *Doran B. G.* Origins and consolidation of field theory in 19th century Britain: From the mechanical to the electromagnetic view of nature.— In: *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1975, vol. 6, p. 133—260.
36. Методологические принципы физики. История и современность. М.: Наука, 1975. 512 с.
37. *Вызгин В. П.* Методологические принципы и научно-исследовательские программы.— В кн.: Методологические проблемы историко-научных исследований/Отв. ред. И. С. Тимофеев. М.: Наука, 1982, с. 172—197.
38. *Вызгин В. П.* Релятивистская теория тяготения: истоки и формирование, 1900—1915 гг. М.: Наука, 1981. 352 с.
39. *Hirose T.* Electrodynamics before the theory of relativity, 1890—1905.— *Jap. Stud. Hist. Sci.*, 1966, N 5, p. 1—49.
40. *Illy J.* Revolutions in a revolution.— *Stud. Hist. and Philos. Sci.*, 1981, vol. 12, p. 175—210.
41. *Джеммер М.* Понятие массы. М.: Прогресс, 1967. 256 с.
42. *Кудрявцев П. С.* История физики. М.: Учпедгиз, 1956. Т. 2. 488 с.
43. *Лоренц Г. А.* Электронная теория. СПб.: Образование, 1910. 71 с.
44. *Лодж О.* Электроны. СПб.: Изд. О. Н. Поповой, 1904. 124 с.
45. *Планк М.* Теоретическая физика. Восемь лекций. СПб.: Образование, 1911. 158 с.
46. *Кемпбелл Н.* Эфир.— В кн.: Новые идеи в физике: Эфир и материя. СПб.: 1913, вып. 2, с. 107—124.
47. *Гольдгаммер Д. А.* Новые идеи в современной физике.— Физическое обозрение, 1971, т. 12, с. 1—35.
48. *Ми Г.* Молекулы, атомы, мировой эфир. СПб.: Изд. П. П. Сойкина, 1913. 195 с.
49. Цит. по статье: *Кобзарев И. Ю.* Эйнштейн, М. Планк и атомная теория.— *Природа*, 1979, № 3, с. 8—26.
50. *Эйнштейн А.* К теории возникновения и поглощения света.— *Собр. науч. тр. М.: Наука*, 1966, т. 3, с. 128—133.
51. *McCormack R.* Einstein, Lorentz and the electron theory.— In: *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1970, vol. 2, p. 41—87.
52. *Эйнштейн А.* К современному состоянию проблемы излучения.— *Собр. науч. трудов. М.: Наука*, 1966, т. 3, с. 164—179.
53. *Солитоны в действии/Под ред. К. Лонгрена, Э. Скотта. М.: Мир*, 1981. 312 с.
54. *Солитоны/Под ред. Р. Буллафа, Ф. Кодри. М.: Мир*, 1983. 408 с.
55. *Эйнштейн А.* О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения.— *Собр. науч. тр. М.: Наука*, 1966, т. 3, с. 181—195.
56. *Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо.*— В кн.: *Эйнштейновский сборник*, 1974. М.: Наука, 1976, с. 5—112.
57. *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн. М.: Атомиздат, 1964. 206 с.
58. *Ми Г.* Курс электричества и магнетизма. Одесса: Математик, 1914. Ч. 2. 474 с.
59. *Mie G.* Die Grundlagen einer Theorie der Materie.— *Ann. Phys.*, 1912, Bd. 37, S. 511—534.
60. *Mie G.* Die Grundlagen einer Theorie der Materie.— *Ann. Phys.*, 1913, Bd. 40, S. 1—66.

81. *Mie G.* Die Grundlagen einer Theorie der Materie.— *Ann. Phys.*, 1912, Bd. 39, S. 1—40. Bd. 40, S. 1—66.
82. *Weyl H.* *Raum. Zeit. Materie.* В.: Springer, 1918. 227 S.
83. *Паули В.* Теория относительности. 2-е изд., доп. и испр. М.; Л.: Наука, 1983.
84. *Weyl H.* *Raum. Zeit. Materie.* 5. Aufl. В.: Springer, 1923. 338 S.
85. *Иваненко Д. Д., Соколов А. А.* Классическая теория поля: новые проблемы. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1949. 432 с.
86. *Соколов А. А., Иваненко Д. Д.* Квантовая теория поля (избранные вопросы). М.; Л.: Гостехтеориздат, 1952. 780 с.
87. *Зоммерфельд А.* Электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1958, 501 с.
88. Из переписки Зоммерфельда с Эйнштейном.— В кн.: Зоммерфельд А. Пути познания в физике. М.: Наука, 1973, с. 191—246.
89. *Puenson L.* The Göttingen reception of Einstein's general theory of relativity: Ph. D. Diss./John Hopkins Univ. Baltimore, 1974. 424 p.
90. *Ishiwara J.* Zur Theorie der Gravitation.— *Phys. Ztschr.*, 1912, Bd. 13, S. 1189—1193.
91. *Ishiwara J.* Die Grundlagen einer relativistischen und elektromagnetischen Gravitationstheorie.— *Phys. Ztschr.*, 1914, Bd. 15, S. 294—298, 506—510.
92. *Nordström G.* Ueber die Möglichkeit das elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld zu vereinigen.— *Phys. Ztschr.*, 1914, Bd. 15, S. 504—506.
93. *Холтон Дж.* Тематический анализ науки. М.: Прогресс, 1981. 384 с.
94. *Эйнштейн А.* Уравнения гравитационного поля.— *Собр. науч. тр. М.: Наука*, 1965, т. 1, с. 448—451.
95. *Эйнштейн А.* К общей теории относительности: (Дополнение).— *Собр. науч. тр. т. 1, с. 435—438.*
96. *Эйнштейн А.* Основы общей теории относительности.— *Собр. науч. тр. т. 1, с. 452—504.*
97. *Эйнштейн А.* Приближенное интегрирование уравнений гравитационного поля.— *Собр. науч. тр., т. 1, с. 514—523.*
98. *Визгин В. П.* Развитие взаимосвязи принципов симметрии с законами сохранения в классической физике. М.: Наука, 1972. 240 с.
99. *Гильберт Д.* Основания физики.— В кн.: Вариационные принципы механики/Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959, с. 589—598.
100. *Гильберт Д.* Математические проблемы.— В кн.: Проблемы Гильберта/Под ред. П. С. Александрова. М.: Наука, 1969, с. 11—64.
101. *Puenson L.* Physics in the shadow of mathematics: The Göttingen electron-theory seminar of 1905.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1979, vol. 21, p. 55—89.
102. *Нетер Э.* Инвариантные вариационные задачи.— В кн.: Вариационные принципы механики/Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959, с. 611—630.
103. *Траутман А.* Законы сохранения в общей теории относительности.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1968. М.: Наука, 1967, с. 308—344.
104. *Earman J., Glymour C.* Einstein and Hilbert: Two months in the history of general relativity.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1978, vol. 19, p. 291—308.
105. *Вейль Г.* Давид Гильберт и его математические труды.— В кн.: Рид К. берт. М.: Наука, 1977, с. 308—360.
106. *Вейль Г.* Гравитация и электричество.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 513—527.
107. *Hilbert D.* Die Grundlagen der Physik. Göttingen Nachr., 1917, 2. Mitt., S. 53—76.
108. *Klein F., Hilbert D.* Zur Hilberts Note über die Grundlagen der Physik.— In: *Klein F. Gesammelte mathematische Abhandlungen.* В.: Springer, 1921, Bd. 1, Abh. XXXI.
109. Переписка А. Эйнштейна и М. Борна.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 7—54.
110. *Hilbert D.* Die Grundlagen der Physik (1924).— In: *Hilbert D. Gesammelte Abhandlungen.* В.: Springer, 1935, Bd. 3, S. 259—291.
111. *Mehra J.* Einstein, Hilbert and the theory of gravitation. Dordrecht etc., 1974. 88 p.

92. *Hilbert D.* Referat über die geometrischen Schriften und Abhandlungen H. Weyl's, erstattet der Physiko-Mathematischen Gesellschaft an der Universität Kasan.— Изв. физ.-мат. о-ва при Казан. ун-те, 1927, т. 11, сер. 3, с. 66—70.
93. *Эйнштейн А.* Игруют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи?— Собр. науч. тр., т. 1, с. 664—671.
94. *Гильберт Д.* Основания геометрии. М.; Л.: Гостехгеориздат, 1948. 492 с.
95. *Weyl H.* Erkenntnis und Besinnung (Ein Lebensrückblick).— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. B. etc., 1968, Bd. 4, S. 631—649.
96. *Weyl H.* Zur Gravitationstheorie.— Ann. Phys., 1919, Bd. 54, S. 117—145.
97. *Puenson L.* La réception de la relativité généralisée: Disciplinary et institutionalisation en physique.— Rev. hist. sci., 1975, vol. 28, p. 61—73.
98. *Puenson L.* Mathematics, education and the Göttingen approach to physical reality, 1890—1914.— Europ. J. Interdiscipl. Stud., 1979, vol. 2, p. 91—127.
99. *Weyl H.* Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft. München etc.: Oldenbourg-Verl., 1927. 162 S.
100. *Ньюмен М. Г. А. Герман Вейль.*— Успехи мат. наук, 1976, т. 31, вып. 4, с. 239—250.
101. *Пуанкаре А.* Наука и гипотеза. СПб.: Слово, 1906. 238 с.
102. *Ланге Ф. А.* История материализма и критика его значения в настоящее время. СПб., 1881—1883. Т. 1—2; 2-е изд., 1899. 747 с.
103. Цит. по кн.: *Мотрошилова Н. В.* Принципы и противоречия феноменологической философии. М.: Высш. шк., 1968. 128 с.
104. *Weyl H.* Ueber die Grundlagenkrise der Mathematik (1921).— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. B. etc.: Springer, 1968, Bd. 2, S. 143—180.
105. *Вейль Г.* О философии математики. М.; Л.: Гостехгеориздат, 1934. 128 с.
106. *Рид К.* Гильберт. М.: Наука, 1977. 368 с.
107. *Гайденко П. П.* Философия Фихте и современность. М.: Мысль, 1979. 288 с.
108. *Бабушкин В. У.* Трансцендентально-феноменологическое обоснование философии и его итоги: (Обзор западноевропейской литературы 60—70-х годов).— В кн.: Природа философского знания. М.: ИНИОН АН СССР, 1977, т. 1, ч. 2, с. 16—53.
109. *Гайденко П. П.* Гуссерль.— В кн.: Философский энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983, с. 132—133.
110. *Тростников В. Н.* Конструктивные процессы в математике. М.: Наука. 1975. 256 с.
111. *Reichenbacher E.* Grundzüge zu einer Theorie der Elektrizität und der Gravitation.— Ann. Phys. 1917, Bd. 52, S. 134—178.
112. *Reichenbacher E.* Ueber die Nichtintegrität der Streckenübertragung und die Weltfunktion in der Weylschen verallgemeinerten Relativitätstheorie.— Ann. Phys., 1920, Bd. 63, S. 93—114.
113. *Abraham M.* Neuere Gravitationstheorien.— Jb. Radioaktiv. und Elektron., 1914, Bd. 11, S. 470—520.
114. *Mie G.* Die Grundlagen einer Theorie der Materie.— Ann. Phys., 1912, Bd. 37, S. 511—534; Bd. 39, S. 1—40; 1913, Bd. 40, S. 1—66.
115. *Ishiwara J.* Die Grundlagen einer relativistischen und elektromagnetischen Gravitationstheorie.— Phys. Ztschr., 1914, Bd. 15, S. 294—298, 506—510.
116. *Nordström G.* Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätssprinzips.— Ann. Phys., 1913, Bd. 42, S. 533—554.
117. *Nordström G.* Ueber die Möglichkeit das elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld zu vereinigen.— Phys. Ztschr., 1914, Bd. 15, S. 504—506.
118. *Wiechert E.* Die Gravitation als elektromagnetische Erscheinung.— Ann. Phys., 1920, Bd. 63, S. 301—381.
119. *Levi-Civita T.* Nozione di parallelismo in uno varietà qualunque e conseguente specificazione geometrica della curvatura Rimaniana.— Rend. Circ. mat. Palermo, 1917, vol. 42, p. 173—205.
120. *Ricci G., Levi-Civita T.* Méthodes du calcul différentiel absolu et leurs applications.— Math. Ann., 1901, Bd. 54, S. 125—201.
121. *Hessenberg G.* Vektorielle Begründung der Differentialgeometrie.— Math. Ann., 1917, Bd. 78, S. 187—217.

122. *Schouten J.* Die direkte Analysis zur neueren Relativitätstheorie.— Verh. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1918, Bd. 12, N 6, S. 3—98.
123. *Schouten J. Ricci* — Kalkül. В.: Springer, 1924.
124. *Schouten J.* Erlanger Programm und Uebertragungslehre: Neue Gesichtspunkte zur Grundlegung der Geometrie.— Rend. Circ. mat. Palermo, 1926, vol. 50, p. 142—169.
125. *Weyl H.* Raum. Zeit. Materie. 4. Aufl. В.: Springer, 1921. 300 S.
126. *Каган В. Ф.* Геометрические идеи Римана и их дальнейшее развитие.— В кн.: В. Ф. Каган. Очерки по геометрии. М.: Изд-во МГУ, 1963, с. 437—516.
127. *Weyl H.* Gravitation und Elektrizität (1918).— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. В. etc.: Springer, 1968, Bd. 2, S. 29—42.
128. *Weyl H.* Space, Time, Matter. N. Y.: Dover Publ., 1952. 330 p.
129. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977. Т. 2. 527 с.
130. *Weyl H.* Reine Infinitesimalgeometrie (1918).— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. В. etc.: Springer, 1968, Bd. 2, S. 1—28.
131. *Hönl H.* Intensitäts- und Quantitätsgrößen.— Phys. Bl., 1968, Bd. 24, S. 498—502.
132. *Эйнштейн А.* Добавление: (к статье Г. Вейля, «Гравитация и электричество»).— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 525—526.
133. *Вейль Г.* Ответ автора (на замечание Эйнштейна к статье Г. Вейля «Гравитация и электричество»).— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 526—527.
134. *Weyl H.* Gravitation und Elektrizität. Nachtrag Juni 1955.— In: Selecta Hermann Weyl. Basel etc.: Birkhäuser, 1956.
135. *Визгин В. И.* Эйнштейн и проблема построения научной теории: (На материале общей теории относительности).— Вopr. философии, 1979, № 10, с. 56—64.
136. *Richter St. Wolfgang Pauli.* Die Jahre 1918—1930. Skizzen zu einer wissenschaftlichen Biographie. Aarau etc.: Verl. Sauerländer, 1979. 112 S.
137. *Pauli W.* Ueber die Energiekomponenten des Gravitationsfeldes.— Phys. Ztschr., 1919, Bd. 20, S. 25—27.
138. *Pauli W.* Zur Theorie der Gravitation und der Elektrizität von Hermann Weyl.— Phys. Ztschr., 1919, Bd. 20, S. 457—467.
139. *Pauli W.* Mercurperihelbewegung und Strahlenablenkung in Weyls Gravitationstheorie.— Verh. Dt. phys. Ges., 1919, Bd. 21, S. 742—750.
140. *Трифонов Д. Н., Кривомазов А. Н., Лисневский Ю. И.* Учение о периодичности и учение о радиоактивности. М.: Атомиздат, 1974. 248 с.
141. *Pauli W.* Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a. ский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 374—378.
142. *Weyl H.* Die Relativitätstheorie auf der Naturforscherversammlung (1922).— In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. В. etc.: Springer, 1968, Bd. 2, S. 315—327.
143. Общая дискуссия о теории относительности на 86-м собрании немецких естествоиспытателей в Науегейме в сентябре 1920 г.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 374—378.
144. Дискуссия по докладу Г. Вейля «Электричество и гравитация» на 86-м собрании немецких естествоиспытателей в Науегейме в сентябре 1920 г.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 374—378.
145. *Бор Н.* Введение.— В кн.: Теоретическая физика 20 века. М.: Изд-во иностр. лит., 1962, с. 11—14.
146. *Гейзенберг В.* Развитие квантовой теории, 1918—1928.— Природа, 1977, № 9, с. 113—123.
147. *Хунд Ф.* История квантовой теории/Пер. под ред. М. А. Ельяшевича. Киев: Наук. думка, 1980. 244 с.
148. *Зоммерфельд А.* Строение атомов и спектры. М.: Гостехиздат, 1956. Т. 1—2. 1287 с.
149. *Heisenberg W.* Der Teil und das Ganze. München, 1969. 288 S.
150. *Гейзенберг В.* Часть и целое.— В кн.: Проблема объекта в современной науке. М.: ИНИОН АН СССР, 1980, с. 46—143.

151. Борн М. Лекции по атомной механике. Киев; Харьков: ГНТИУ, 1934. Т. 1. 312 с.
152. Клейн М. Д. Первая фаза диалога Бора и Эйнштейна.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1974. М.: Наука, 1976, с. 115—155.
153. Вавилов С. И. Добавления переводчика.— В кн.: Бор Н. Три статьи о спектрах и строении атомов/Пер. С. И. Вавилова. М.; Пг.: ГИЗ, 1923, с. 148—155.
154. Эйнштейн А. Об одном эксперименте, касающемся элементарного процесса испускания света.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 430—431.
155. Крамерс Г. А., Гольст Х. Строение атома и спектры/Пер. С. И. Вавилова. М.; Л.: ГИЗ, 1923. 156 с.
156. Планк М. Атом теории Бора.— В кн.: Новые идеи в физике. Сб. № 10. Строение атома и спектры. Пг.: Образование, 1924, с. 42—46.
157. Бор Н. Три статьи о спектрах и строении атомов. М.; Пг.: ГИЗ, 1923, с. 9—10.
158. Зоммерфельд А. Основы квантовой теории и модели атома Бора.— В кн.: Зоммерфельд А. Пути познания в физике. М.: Наука, 1973, с. 8—14.
159. Гааз А. Физическая картина мира по данным новой физики/Пер. под ред. Н. Н. Андреева. М.; Пг.: Изд. Л. Д. Френкель, 1924. 109 с.
160. Бор Н. Строение атомов в связи с физическими и химическими свойствами элементов.— Избр. науч. тр. М.: Наука, 1970, т. 1, с. 318—375.
161. Ельяшевич М. А. От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики.— УФН, 1977, т. 122, с. 673—717.
162. Fortan P. Weimar culture, causality and quantum theory, 1918—1927: Adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment.— Hist. Stud. Phys. Sci., 1971, vol. 3, p. 1—115.
163. Вавилов С. И. Предисловие переводчика.— В кн.: Бор. Н. Три статьи о спектрах и строении атомов. М.; Пг.: ГИЗ, 1923, с. 5—6.
164. Weyl H. Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie.— Ann. Phys., 1919, Bd. 59, S. 101—133.
165. Weyl H. Ueber die physikalischen Sinn der erweiterten Relativitätstheorie.— Phys. Ztschr., 1924, Bd. 22, S. 473—480.
166. Эйнштейн А. Эфир и теория относительности.— Собр. науч. тр., т. 1, с. 682—689.
167. Weyl H. Feld und Materie (1921). In: Weyl H. Gesammelte Abhandlungen, Bd. 2. B. etc.: Springer, 1968, S. 237—259.
168. Kahn C., Kahn F. Letters from Einstein to de Sitter on the nature of the Universe.— Nature, 1975, vol. 257, p. 451—454.
169. Douglas A. V. The life of Arthur Stanley Eddington. Edinburgh: Nelson, 1957. 207 p.
170. Ситтер В. де. О теории тяготения Эйнштейна и ее следствиях для астрономии. Статья III.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 299—319.
171. Eddington A. S. Report on the relativity theory of gravitation. L.: Fleetmay press, 1918. 90 p.
172. Дэйсон Ф., Эддингтон А., Дэвидсон К. Определение отклонения луча света в гравитационном поле Солнца по данным наблюдений, проведенных во время полного солнечного затмения 23 мая 1919 г.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 564—570.
173. Эддингтон А. С. Пространство, время и тяготение. Одесса: Матезис, 1923. 216 с.
174. Eddington A. S. A generalisation of Weyl's of the electromagnetic and gravitational field.— Proc. Roy. Soc. London A, 1921, vol. 99, p. 104—122.
175. Эйнштейн А. Основные идеи и проблемы теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 120—129.
176. Эйнштейн А. К общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 134—141.
177. Raman V. V. Kaluza Theodor Franz Eduard.— In: Dictionary of the scientific biography/Ed. Ch. C. Gillispie. N. Y.: Ch. Scribner's sons, 1973, vol. 7, p. 211—212.
178. Kaluza T. Zur Relativitätstheorie.— Phys. Ztschr., 1910, Bd. 11, S. 977.

179. *Калуца Т.* К проблеме единства физики.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитация. М.: Мир, 1979, с. 529—534.
180. *Kaluza T.* Zum Unitätsproblem der Physik.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1921, S. 966—972.
181. *Thirring H.* Ueber die formale Analogie zwischen den elektromagnetischen Grundgleichungen und den Einsteinschen Gravitationsgleichungen erster Näherung.— Phys. Ztschr., 1918, Bd. 19, S. 204—205.
182. *Онищенко А. А., Лескович А. Д.* Якоб Громмер — ассистент А. Эйнштейна (Я. П. Громмер в Белоруссии) (рукопись неопубликованной статьи).— Вопр. истории естествознания и техники, 1985 (в печати).
183. *Эйнштейн А., Громмер Я.* Доказательство несуществования всюду регулярного центрально-симметричного поля в теории поля Т. Калуцы.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 130—133.
184. *Эйнштейн А.* Приближенное интегрирование уравнений гравитационного поля.— Собр. науч. тр., т. 1, с. 514—523.
185. *Эйнштейн А.* Рецензия на книгу Германа Вейля «Пространство, время, материя».— Собр. науч. тр., т. 4, с. 42—43.
186. *Эйнштейн А.* Мотивы научного исследования. Собр. науч. тр., т. 5, с. 40—44.
187. *Einstein A.* Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1919, S. 349—356.
188. *Гернек Ф.* Альберт Эйнштейн. М.: Прогресс, 1966. 243 с.
189. *Эйнштейн А.* Геометрия и опыт.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 83—94.
190. *Einstein A.* Geometrie und Erfahrung.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1921, S. 123—130.
191. *Эйнштейн А.* Краткий очерк развития теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 104.
192. *Эйнштейн А.* Об одном естественном дополнении основ общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 105.
193. *Einstein A.* Ueber naheliegende Ergänzung des Fundamentes der allgemeinen Relativitätstheorie.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1921, S. 261—264.
194. *Карган Э.* Пространства аффинной, проективной и конформной связности/Пер. под ред. П. А. Широкова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1962. 212 с.
195. *Vach R.* Zur Weylschen Relativitätstheorie und der Weylschen Erweiterung des Krümmungstensorbegriffes.— Math. Ztschr., 1921, Bd. 9, S. 110—135.
196. *Эйнштейн А.* Сущность теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 5—82.
197. *Эйнштейн А.* К теории распространения света в диспергирующих средах.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 437—441.
198. *Эйнштейн А., Бергман П.* Обобщение теории электричества Калуцы.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 492—513.
199. *Румер Ю. Б.* Единая теория поля.— В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1962, т. 2, с. 5—6.
200. *Вебстер А. Г.* Механика материальных точек, твердых, упругих и жидких тел/Пер. под ред. К. В. Меликова. Л.; М.: Гостехтеорнат, 1933. 635 с.
201. *Тоннела М.-Л.* Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 483 с.
202. *Schouten J. A.* Ueber die verschiedenen Arten der Uebertragung, die einer Differentialgeometrie zu Grunde gelegt werden können.— Math. Ztschr., 1922, Bd. 13, S. 56—81.
203. *Схоутен И. А., Стройк Д. Дж.* Введение в новые методы дифференциальной геометрии. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. Т. 1. 183 с.
204. *Родичев В. И.* Методологические аспекты единой теории поля.— В кн.: Эйнштейн и философские проблемы физики XX века/Отв. ред. Э. М. Чудинов. М.: Наука, 1979, с. 408—440.
205. *Каган В. Ф.* Геометрические идеи Римана и их дальнейшее развитие.— В кн.: Каган В. Ф. Очерки по геометрии. М.: Изд-во МГУ, 1963, с. 437—516.
206. *Эйнштейн А.* Предисловие к собранию трудов, выпускаемому издательством Кайцоша.— Собр. науч. тр., т. 4, с. 53—54.

207. *Эйнштейн А.* О современном кризисе теоретической физики.— Собр. науч. тр., т. 4, с. 55—60.
208. *Einstein A.* Zur allgemeinen Relativitätstheorie.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1923, S. 32—38.
209. *Эйнштейн А.* Замечание к моей работе «К общей теории относительности».— Собр. науч. тр., т. 2, с. 142—144.
210. *Эйнштейн А.* К аффинной теории поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 145—148.
211. *Эренфест П.—Иоффе А. Ф.* Научная переписка (1907—1933). Л.: Наука, 1973. 310 с.
212. *Эйнштейн А.* Теория аффинного поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 149—153.
213. *Эйнштейн А.* К работе А. Фрийдмана «О кривизне пространства».— Собр. науч. тр., т. 2, с. 119.
214. *Эйнштейн А.* Основные идеи и проблемы теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 120—129.
215. *Gerlach W.* Erinnerungen an Albert Einstein, 1908—1930.— Phys. Bl., 1979, Bd. 35, S. 93—102.
216. *Treder H.-J.* Albert Einstein an der Berliner Akademie der Wissenschaften.— In: Albert Einstein in Berlin, 1913—1933: Darstellung und Dokumente. B.: Akad.-Verl., 1979, S. 7—78.
217. *Эйнштейн А.* Об эфире.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 154—160.
218. *Френкель В. Я., Явлов Б. Е.* Эйнштейн — изобретатель. М.: Наука, 1981. 161 с.
219. *Эйнштейн А., Гааз В. де.* Экспериментальное доказательство существования молекулярных токов Ампера.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 363—379.
220. *Блэкер П. М.* Магнитное поле вращающихся массивных тел.— УФН, 1947, т. 38, с. 52—76.
221. *Идлис Г. М.* Космические силовые поля и некоторые вопросы структуры и эволюции галактической материи.— Изв. Астрофиз. ин-та, 1957, т. 4, с. 3—159.
222. *Бенькова Н. П.* Земной магнетизм.— В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1962, т. 2, с. 74—75.
223. *Stachel J.* Einstein and the rigidly rotating disk.— In: General relativity and gravitation/Ed. A. Held. N. Y.: Plenum press, 1980, vol. 1, p. 1—15.
224. *Марков М. А.* Gaudeamus igitur juvenes dum sumus... — В кн.: Сергей Иванович Вавилов: очерки и воспоминания. М.: Наука, 1981, с. 230—237.
225. *Эйнштейн А.* Предлагает ли теория поля возможности для решения квантовой проблемы?— Собр. науч. тр., т. 3, с. 456—462.
226. *Einstein A.* Bietet die Feldtheorie Möglichkeiten für die Lösung des Quantenproblems?— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1923, S. 359—364.
227. Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 5—42.
228. *Эйнштейн А., Громмер Я.* Общая теория относительности и закон движения.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 198—210.
229. *Эйнштейн А.* Общая теория относительности и закон движения.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 211—222.
230. *Эйнштейн А., Розен Н.* Проблема частиц в общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 424—433.
231. *Эйнштейн А., Инфельд Л., Гоффман Б.* Гравитационные уравнения и проблема движения.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 450—491.
232. *Эйнштейн А.* Об обобщенной теории тяготения.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 719—731.
233. *Гейзенберг В.* О квантово-теоретическом истолковании кинематических и механических соотношений.— УФН, 1977, т. 122, с. 574—585.
234. *Pais A.* Einstein and the quantum theory.— Revs Mod. Phys., 1979, vol. 51, p. 863—914.
235. *Ельяшевич М. А.* От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики.— УФН, 1977, т. 122, с. 673—718.
236. *Эйнштейн А.* Квантовая теория одноатомного идеального газа. Второе сообщение.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 489—502.

237. Из переписки (переписка Э. Шредингера с М. Планком, А. Эйнштейном и Г. Лоренцем).— В кн.: Шредингер Э. Избр. тр. по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с. 301—338.
238. *Эйнштейн А.* Теория Эддингтона и принцип Гамильтона.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 161—166.
239. *Эддингтон А. С.* Новая теория Эйнштейна.— В кн.: Эддингтон А. С. Теория относительности. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1934, с. 448—456.
240. *Эйнштейн А.* Единая полевая теория тяготения и электричества.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 171—177.
241. *Ferraris M., Francaviglia M., Reina C.* Variational formulation of general relativity from 1915 to 1925: «Palatini's method» discovered by Einstein in 1925.— Gen. Rel. and Grav., 1982, vol. 14, N 1, p. 1—12.
242. *Palatini A.* Deduzione invariante delle equazioni gravitazionali dal principio di Hamilton.— Rend. Circ. mat. Palermo, 1919, vol. 43, p. 203—212.
243. *Эйнштейн А.* Электрон и общая теория относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 167—170.
244. *Treder H.-J.* Antimatter and the particle problem in Einstein's cosmology and field theory of elementary particles: (An historical essay on Einstein's work at the Akademie der Wissenschaften zu Berlin).— Astron. Nachr., 1975, Bd. 296, S. 149—161.
245. *Treder H.-J.* Grosse Physiker ihre Probleme: Studien zur Geschichte der Physik. В.: Akad.-Verl., 1983, S. 209—213.
246. *Эйнштейн А.* О формальном отношении римановского тензора кривизны к уравнениям гравитационного поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 183—187.
247. Переписка А. Эйнштейна и М. Борна.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1972. М.: Наука, 1974, с. 7—103.
248. *Важанов В. А.* Проблема полноты квантовой теории: поиск новых подходов (философский аспект). Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1983. 104 с.
249. *Иоффе А. Ф.* Альберт Эйнштейн.— В кн.: Иоффе А. Ф. О физике и физиках. Л.: Наука, 1977, с. 224—229.
250. *Эйнштейн А.* Предложение опыта, касающегося природы элементарного процесса излучения.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 514—516.
251. *Эйнштейн А.* Об интерференционных свойствах света, испускаемого канальными лучами.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 517—524.
252. *Эйнштейн А.* Теоретические и экспериментальные соображения к вопросу о возникновении света.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 525—527.
253. *Мандельштам Л. Л.* Лекции по избранным вопросам оптики (1932—1933).— В кн.: Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972, лекции № 1, 8, 9.
254. *Albert Einstein, Hedwig and Max Born.* Briefwechsel, 1916—1955. München: Nymphenburger Verl., 1969. 330 S.
255. *Эйнштейн А.* Новая форма уравнений поля в общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 835—848.
256. *Эйнштейн А.* Релятивистская теория несимметричного поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 849—873.
257. *Jamner M.* The conceptual development of quantum mechanics. N. Y.: McGraw-Hill, 1966.
258. *Klein O.* Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie.— Ztschr. Phys., 1926, Bd. 37, S. 895—906.
259. *Эйнштейн А.* К теории связи гравитации и электричества Калуцы, II.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 193—197.
260. *Эйнштейн А.* К теории связи гравитации и электричества Калуцы.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 190—192.
261. *Эйнштейн А.* Общая теория относительности и закон движения.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 211—222.
262. *Инфельд Л., Лабаньский Е.* Движение и релятивизм. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 204 с.
263. Gravitation/Ed. L. Witten. N. Y.: J. Wiley, 1962. 481 p.
264. *Фок В. А.* Некоторые применения идей неевклидовой геометрии Лобачевского к физике.— В кн.: Когельников А. П., Фок В. А. Некоторые приме-

- нения идей Лобачевского в механике и физике. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1950, с. 48—87.
265. Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Гостехиздат, 1955. 504 с.
266. Фок В. А. О движении конечных масс в общей теории относительности.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 232—284.
267. Эйнштейн А. Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики.— Собр. науч. тр., т. 4, с. 82—88.
268. Эйнштейн А. Замечание о квантовой теории.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 528—530.
269. Эйнштейн А., Громмер Я. Доказательство несуществования всюду регулярного центрально-симметричного поля в теории поля Калуцы.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 130—133.
270. Fock V. Ueber die invariante Form der Wellen- and der Bewegungsgleichungen für einen geladenen Massenpunkt.— Ztschr. Phys., 1926, Bd. 39, S. 226—232.
271. Mandel H. Zur Herleitung der Feldgleichungen in der allgemeinen Relativitätstheorie.— Ztschr. Phys., 1926, Bd. 39, S. 136—145.
272. Фредерикс В. К., Фридман А. А. Основы теории относительности. Л.: Academia, 1924. Вып. 1. 167 с.
273. Фредерикс В. К. Теория Шредингера и общая теория относительности.— В кн.: Основания новой квантовой механики/Под ред. А. Ф. Иоффе. М.; Л.: ГИЗ, 1927, с. 83—98.
274. Klein O. The atomicity of electricity as a quantum theoretical law.— Nature, 1926, vol. 118, p. 516.
275. London F. Die Theorie von Weyl und die Quantenmechanik— Naturwissenschaften, 1927, Bd. 15, S. 187.
276. Воронов И. А., Козан Я. И. Спонтанная компактификация в моделях Калуцы—Клейпа и эффект Казимира.— Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 262—265.
277. Эйнштейн А. Геометрия Римана с сохранением понятия «абсолютного» параллелизма.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 223—228.
278. Эйнштейн А. Новая возможность единой теории поля тяготения и электричества.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 229—233.
279. Иваненко Д. Д. Комментарий к письму Эйнштейна от 11 июля 1929 г. к И. В. Обремову (публикация «Неопубликованное письмо А. Эйнштейна».— Вопр. истории естествознания и техники, 1980, вып. 67/68, с. 70—71.
280. Карган Э. Риманова геометрия в ортогональном репере. М.: Изд-во МГУ, 1960. 308 с.
281. Weitzenböck R. Neuere Arbeiten der algebraischen Invariantentheorie; Differentialinvarianten.— In: Encykl. math. Wiss., 1922, Bd. 3 (3), H. 6.
282. Эйзенхарт Л. П. Риманова геометрия. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 316 с.
283. Eisenhart L. P. Non-riemannian geometry. N. Y.: Amer. Math. Soc. Colloq. Publ., 1927. Vol. 8.
284. Родичев В. И. Теория тяготения в ортогональном репере. М.: Наука, 1974. 184 с.
285. Einstein A. Riemann-Geometrie mit Aufrechterhaltung des Begriffes des Fernparallelismus.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1928. S. 217—221.
286. Cartan E. Sur la structure des groupes infinis de transformation.— Ann. sci. Ecole norm. supér., 1904, vol. 21, p. 153—206; 1905, vol. 22, p. 219—308.
287. Cartan E., Schouten J. A. On the geometry of the group manifold of simple and semi-simple groups.— Proc. Akad. Amsterdam, 1926, vol. 29, p. 803—815.
288. Cartan E. La géométrie des groupes de transformations.— J. math. pures et appl. Ser. 3, 1927, vol. 6, p. 1—119.
289. Карган Э. Геометрия групп Ли и симметрические пространства: Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 384 с.
290. Cartan E. Notice historique sur la notion de parallelisme absolu.— Math. Ann., 1930, Bd. 102, S. 698—706.
291. Эйнштейн А. Единая теория поля, основанная на метрике Римана и абсолютном параллелизме.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 307—320.

- 291a. Elie Cartan — Albert Einstein: Letters on absolute parallelism 1929—1932/Ed. R. Debever. Princeton: Princeton University Press, 1979. 233 p.
292. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 1967. 664 с.
293. Эйнштейн А. К единой теории поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 252—259.
294. Weltzenböck R. Differentialinvarianten in der Einsteinschen Theorie des Fernparallelismus.— S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., 1928, S. 466.
295. Nature, 1929, vol. 123, p. 174—175.
296. Эйнштейн А. Новая теория поля. I, II.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 260—264, 265—269.
297. Eddington A. S. Einstein's field theory.— Nature, 1929, vol. 123, p. 280—281.
298. Эйнштейн А. Единая теория поля и принцип Гамильтона.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 270—274.
299. Эйнштейн А. О современном состоянии теории поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 244—251.
300. Levi-Civita T. A proposed modification of Einstein's field theory.— Nature, 1929, vol. 123, p. 678—679.
301. Картан Э. Метод подвижного репера, теория непрерывных групп и обобщенные пространства (лекции, читанные в Н.-л. ин-те математики и механики, Москва, 16—20 июня 1930). М.; Л.: Гостехтеориздат, 1933. 72 с.
302. Lanczos C. Die neue Feldtheorie Einsteins.— *Ergeb. exakt. Naturwiss.*, 1931, Bd. 10, S. 97.
303. McVittie G. C. Solution with axial symmetry of Einstein's equations of teleparallelism.— *Proc. Edinburgh Math. Soc.*, 1931, vol. 2, p. 140.
304. Piaggio H. Einstein's and other unitary field theories: An explanation for the general reader.— Nature, 1929, vol. 123, p. 839—841, 877—879.
305. Wiener N., Vallarta M. S. Unified field theory of electricity and gravitation.— Nature, 1929, vol. 123, p. 317.
306. Wiener N. Dirac equations and Einstein theory.— Nature, 1929, vol. 123, p. 950.
307. Тамм И. Е. О связи эйнштейновской единой теории поля с квантовой теорией.— Собр. науч. тр. М.: Наука, 1975, т. 2, с. 184—187.
308. Тамм И. Е., Леонтович М. А. Замечания к эйнштейновской единой теории поля.— В кн.: Тамм И. Е. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1975, с. 191—201.
309. Рытов С. М. Из давних времен.— В кн.: Воспоминания о И. Е. Тамме. М.: Наука, 1981, с. 185—188.
310. Fock V., Ivanenko D. Quantum geometry.— Nature, 1929, vol. 123, p. 838.
311. Weyl H. Gravitation and electron (1929).— In: Weyl H. *Gesammelte Abhandlungen*, Bd. 3. B. etc.: Springer, 1968, S. 217—228.
312. Weyl H. Gravitation and electron (1929).— In: Weyl H. *Gesammelte Abhandlungen*, Bd. 3. B. etc.: Springer, 1968, S. 229—244.
313. Weyl H. Elcctron und Gravitation (1929).— In: Weyl H. *Gesammelte Abhandlungen*, Bd. 3. B. etc.: Springer, 1968, S. 245—267.
314. Ван дер Варден В. Принцип запрета и спин.— В кн.: Теоретическая физика XX века. М.: Изд-во иностр. лит., 1962, с. 231—284.
315. Владжиоров Ю. С. Системы отсчета в теории гравитации. М.: Энергоиздат, 1982. 256 с.
316. Эйнштейн А. Единая теория физического поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 286—306.
317. Письма к Морису Соловину.— Эйнштейн А. Собр. науч. тр., т. 4, с. 545—575.
318. Эйнштейн А. Два строгих статических решения уравнений единой теории поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 329—341.
319. Эйнштейн А. Гравитационное и электромагнитное поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 347—348.
320. Эйнштейн А. К теории пространств с римановой метрикой и абсолютным параллелизмом.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 342—343.
321. Эйнштейн А., Майер В. Систематическое исследование совместных уравнений поля, возможных в римановом пространстве с абсолютным параллелизмом.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 353—365.
322. Эйнштейн А., Майер В. Полу векторы и спиноры.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 535—567.

323. *Эйнштейн А., Майер В.* Уравнения Дирака для полувекторов.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 568—590.
324. *Эйнштейн А., Майер В.* Расщепление наиболее естественных уравнений поля для полувекторов на симпорные уравнения дираковского типа.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 591—596.
325. *Эйнштейн А., Майер В.* Представление полувекторов как обычных векторов с особым характером дифференцирования.— Собр. науч. тр., т. 3, с. 596—603.
326. *Eyraud H.* Les équations de la dynamique de l'éther. P.: Blanchard, 1926.
327. *Infeld L.* Zum Problem einer einheitlichen Feldtheorie von Elektrizität und Gravitation.— *Zschr. Phys.*, 1928, Bd. 50, S. 137.
328. *Infeld L.* Zur Feldtheorie von Elektrizität und Gravitation.— *Phys. Ztschr.*, 1928, Bd. 29, S. 145.
329. *Infeld L.* Les équations de Maxwell dans la théorie commune a la gravitation et a électricité.— *C. r. Acad. sci.*, 1928, t. 186, p. 1280.
330. *Эйнштейн А.* Современное состояние теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 399—402.
331. *Ludwig G.* Fortschritte der projektiven Relativitätstheorie.— Braunschweig: Vieweg, 1951.
332. *Veblen O., Hoffman B.* Projective relativity.— *Phys. Rev.*, 1930, vol. 36, p. 810—822.
333. *Pauli W.* Ueber die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten.— *Ann. Phys.*, 1933, Bd. 18, S. 305—312.
334. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1941. 283 с.
335. *Эйнштейн А., Майер В.* Единая теория гравитации и электричества.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 366—386.
336. *Эйнштейн А., Майер В.* Единая теория гравитации и электричества. II.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 387—395.
337. *Вайскопф В.* Физика в двадцатом столетии. М.: Атомиздат, 1977. 270 с.
338. *Schrödinger E.* Diracsches Elektron im Schwerefeld. 1.— *S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss.*, 1932, S. 105.
339. *Bargmann V.* Bemerkungen zur allgemein-relativistischen Fassung der Quantentheorie.— *S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss.*, 1932, S. 346.
340. *Infeld L., van der Warden B. L.* Die Wellengleichung des Elektrons in der allgemeinen Relativitätstheorie.— *S.-Ber. Preuss. Akad. Wiss.*, 1933, S. 380, 474.
341. *Эйнштейн А., Розен Н.* Проблема частиц в общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 424—433.
342. *Эйнштейн А., Розен Н.* Проблема двух тел в общей теории относительности.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 434—435.
343. *Эйнштейн А., Паули В.* Несуществование регулярных стационарных решений релятивистских уравнений поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 560—567.
344. *Эйнштейн А., Баргман В.* Бивекторные поля. II.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 586—596.
345. *Эйнштейн А.* Релятивистская теория несимметричного поля.— Собр. науч. тр., т. 2, с. 849—873.
346. *Янг Ч., Миллс Р.* Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность.— В кн.: *Элементарные частицы и компенсирующие поля* (Под ред. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964, с. 28—37).
347. *Treder H.-J.* Der heutige Stand der Geometrisierung der Physik und der Physikalisierung der Geometrie.— *S.-Ber. Akad. Wiss. DDR*, 1975, S. 1—33.
348. *Hoffmann D.* Erwin Schrödinger. В.: Teubner, 1984. 92 S.
349. *Шредингер Э.* Автобиография.— В кн.: *Шредингер Э.* Избр. тр. по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с. 343—346.
350. *Schrödinger E.* Die Energiekomponenten des Gravitationsfeld.— *Phys. Ztschr.*, 1918, Bd. 19, S. 4—7.
351. *Kuhn T. S., Heilbron J. L., Forman P., Allen L.* Sources for history of quantum physics. Philadelphia, 1967. 176 p.
352. *Шредингер Э.* Об одном замечательном свойстве квантовых траекторий электрона.— В кн.: *Шредингер Э.* Избр. тр. по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с. 161—171.

353. Шредингер Э. Квантование как задача о собственных значениях, I—IV.— В кн.: Шредингер Э. Избр. тр. по квантовой механике. М., Наука, 1976, с. 9—50, 75—138.
354. Ramon V. V., Fortan P. Why was it Schödinger who developed de Broglie's ideas?— Hist. Stud. Phys. Sci., 1969, vol. 1, p. 291—314.
355. London F. Quantenmechanische Deutung der Theorie von Weyl.— Ztschr. Phys., 1927, Bd. 42, S. 375—389.
356. Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1978. 240 с.
357. Сакураи Дж. Теория сильных взаимодействий.— В кн.: Элементарные частицы и компенсирующие поля. М.: Мир, 1964, с. 42—104.
358. Элементарные частицы и компенсирующие поля. М.: Мир, 1964. 300 с.
359. Einstein and the physics of the future: discussion.— In: Some strangeness in the proportion: A centennial symposium to celebrate the achievements of Albert Einstein/Ed. H. Woolf. L. etc.: Addison-Wesley, 1980, p. 491—506.
360. Сакураи Дж. Векторная теория сильных взаимодействий.— В кн.: Элементарные частицы и компенсирующие поля. М.: Мир, 1964, с. 105—116.
361. Вигнер Е. Инвариантность в физической теории.— В кн.: Вигнер Е. Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971, с. 9—19.
362. Паули В. Релятивистская теория элементарных частиц. М.: Изд-во иностр. лит., 1947. 84 с.
363. Максвелл Дж. К. Из «Трактата об электричестве и магнетизме».— В кн.: Максвелл Дж. К. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 345—632.
364. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М.: Изд-во АН СССР, 1947. Т. 1. 848 с.
365. Кравец Т. И. М. Фарадей и его «экспериментальные исследования по электричеству».— В кн.: Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М.: Изд-во АН СССР, 1947, т. 1, с. 733—780.
366. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 3. 831 с.
367. Bork A. M. Maxwell and the vector potential.— Isis, 1967, vol. 58, p. 210—222.
368. Максвелл Дж. К. О фарадеевых силовых линиях.— В кн.: Максвелл Дж. К. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 11—88.
369. Максвелл Дж. К. О физических силовых линиях.— В кн.: Максвелл Дж. К. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 107—193.
370. Максвелл Дж. К. Динамическая теория электромагнитного поля.— В кн.: Максвелл Дж. К. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954, с. 251—341.
371. Maxwell J. C. On a method of making a direct comparison of electrostatic with electromagnetic force; with a note on the electromagnetic theory of light.— Philos. Trans. Roy. Soc. London, 1868, vol. 157, p. 643—657.
372. Григорьян А. Т., Вальцев А. Н. Генрих Герц. М.: Наука, 1968. 310 с.
373. Doran B. G. Origins and consolidation of field theory in nineteenth century Britain: From the mechanical to the electromagnetical view of nature.— Hist. Stud. Phys. Sci., 1975, vol. 6, p. 133—260.
374. Larmor J. Aether and matter. Cambridge: Univ. press, 1900.
375. Лоренц Г. А. Теория электронов. М.: ГИТТЛ, 1956. 472 с.
376. Абрагам — Беккер (Абрагам М., Беккер Р.). Теория электричества. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 260 с.
377. Вигнер Э. Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971. 320 с.
378. Aharonov Y., Bohm D. Significance of electromagnetical potentials in quantum theory.— Phys. Rev., 1959, vol. 115, p. 485—491.
379. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. Вып. 6. 344 с.
380. Фейнберг Е. Л. Об «особой роли» электромагнитных потенциалов в квантовой механике.— УФН. 1962, т. 78, с. 53—64.
381. Erlichson H. Aharonov—Bohm effect — quantum effects on charged particles in field-free regions.— Amer. J. Phys., 1970, vol. 38, p. 162—173.

382. *Moriyasu K.* The renaissance of gauge theories.— *Contemp. Phys.*, 1983, vol. 23, p. 553—581.
383. *Манин Ю. И.* Математика и физика. М.: Знание, 1979. 63 с.
384. *Weyl H.* Gruppentheorie und Quantenmechanik. Leipzig, 1928.
385. *Fock V., Ivanenko D.* Géométrie quantique linéaire et déplacement parallèle.— *C. r. Acad. sci.*, 1929, t. 188, p. 1470—1472.
386. *Fock V., Ivanenko D.* Ueber eine mögliche geometrische Deutung der relativistischen Quantentheorie.— *Ztschr. Phys.*, 1929, Bd. 54, S. 798—802.
387. *Фок В. А.* Геометризация дираковской теории электрона.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 415—432.
388. *Фок В.* Волновое уравнение Дирака и геометрия Римана.— *ЖРФХО*, часть физ., 1930, т. 62, с. 133—151.
389. *Паули В.* Общие принципы волновой механики. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1947. 332 с.
390. *Гейзенберг В., Паули В.* К квантовой динамике волновых полей. II.— В кн.: Паули В. Труды по квантовой теории, статьи, 1928—1958. М.: Наука, 1977, с. 89—111.
391. *Дирак П. А. М.* Квантованные сингулярности в электромагнитном поле.— В кн.: Монополь Дирака. М.: Мир, 1970, с. 40—57.
392. *Weyl H.* Theory of groups and quantum mechanics. N. Y.: Dover Publ., 1931. 422 p.
393. *Вентцель Г.* Введение в квантовую теорию волновых полей. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 292 с.
394. *Швингер Ю.* Теория квантованных полей. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 252 с.
395. *Аберс Е. С., Ли Б. В.* Калибровочные теории.— В кн.: Квантовая теория калибровочных полей. М.: Мир, 1977, с. 241—433.
396. *Манин Ю. И.* Геометрические идеи в теории поля: (Вступительная статья редактора перевода сборника «Геометрические идеи в физике»). М.: Мир, 1983, с. 5—18.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ ¹

- Аронов (Aharonov Y.) 264, 265, 297.
 Аберс (Abers E. S.) 278, 298
 Абрагам (Abraham M.) 5, 15, 21—24, 46—48, 59, 78, 87, 144, 256, 263, 288, 297
 Александров П. С. 287
 Алексеев И. С. 286.
 Аллен (Allen L.) 296
 Амбарцумян В. А. 231
 Андерсон (Anderson C.) 276
 Андреев Н. Н. 290
 Аншютц (Anschütz H.) 190
 Аристотель (Αριστοτέλης) 50
 Ахутин А. В. 75
 Бабушкин В. У. 288
 Балахов В. А. 293
 Бай (Bay W.) 264
 Бак (Bach E.) 114
 Баргман (Bargmann V.) 150, 236, 241, 242, 296
 Барнетт (Barnett S. J.) 182, 183
 Бах (Bach R.) 163, 207, 291
 Бек (Beck G.) 12, 146, 147, 285
 Беккер (Becker R.) 297
 Бенъкова Н. П. 292
 Бергман (Bergmann P. G.) 12, 150, 168, 169, 209, 214, 239, 242, 247, 285, 291
 Бессо (Besso M.) 33, 34, 56, 99, 100, 101, 152, 157, 158, 165, 188, 191, 194, 197, 199, 240, 241, 286, 292
 Блэклетт (Blackett P. M.) 183, 292
 Бозе (Bose Sh.) 190
 Бом (Bohm D.) 264, 265, 297
 Бопп (Bohr F.) 43
 Бор (Bohr N.) 8, 24, 112—120, 205, 210, 249, 282, 289, 290
 Борк (Bork A. M.) 261, 262, 297
 Борн (Born M.) 39, 46, 66, 70, 99, 103, 104, 114, 115, 121, 152, 158, 164, 165, 181, 194, 195, 199—201, 210, 287, 290, 293
 Боте (Bothe W.) 164
 Брауэр (Brauer L.) 73, 82, 83, 85
 Брентано (Brentano F.) 81
 де Бройль (Broglie L. de) 150, 170, 190, 192, 194, 203, 251—253, 281
 Броуз (Brose H. L.) 266
 Буллаф (Bullough R.) 286
 Бурман В. Р. 231
 Буссинек (Boussinesq J. V.) 31
 Бухерер (Bucherer A.) 23
 Бьянки (Bianchi L.) 65, 187, 189, 206, 223
 Вавилов С. И. 116, 121, 122, 183, 290, 292
 Вайнберг (Weinberg S.) 5, 9, 11, 278
 Вайскопф (Weiskopf V. F.) 241, 276, 296
 Вайценбек (Weitzenböck R.) 93, 217, 223, 225, 226, 234, 238, 294, 295
 Вайярта (Vallarta M.) 225, 228, 295
 Варден ван дер (Waerden R. L. van der) 232, 236, 241, 295, 296
 Вебер (Weber W.) 18—21, 78
 Веблен (Veblen O.) 7, 89, 149, 150, 170, 171, 239, 296
 Вебстер (Webster A.) 291
 Вебстер (Webster D. L.) 116
 Вейль (Weyl H.) 4, 6, 7, 10, 11, 12, 37, 40, 43—45, 50, 51, 55, 58, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73—108, 109, 123—140, 144, 149, 151—176, 179, 180, 187, 191, 195, 198, 201, 204, 206, 207, 212, 215, 216, 218, 224, 225, 227, 230, 231, 232, 235—238, 244—253, 265—291, 295, 298
 Вейерштрасс (Weierstrass K.) 80
 Вентцель (Wentzel G.) 112, 277, 298
 Вигнер (Wigner E. P.) 225, 255, 263, 276, 278, 297
 Визгин В. П. 6, 286, 287, 289
 Вии (Wien W.) 5, 20, 21
 Вииер (Wiener N.) 203, 224, 225, 228, 295
 Виртингер (Wirtinger W.) 162
 Витали (Vitali G.) 226
 Виттен (Witten L.) 208, 293
 Вихерт (Wiechert E.) 5, 18, 20, 59, 78, 80, 87, 288
 Владимиров Ю. С. 232, 295
 Воронов И. А. 216, 294
 Ву (Wu T. T.) 275
 Вулф (Woolf H.) 297
 Гааз (Haas A.) 118, 290, 292
 Гааз де (Haas W. de) 182
 Гайденко П. П. 285, 288
 Галлей (Galilei G.) 5, 82
 Гамильтон (Hamilton W. R.) 13, 38, 45, 61, 67, 100, 149, 177—179, 190, 193, 215, 222, 265, 293, 295
 Гамов Г. А. (Gamov G. A.) 150, 170, 204, 231
 Ганс (Gans R.) 23, 41
 Гаусс (Gauss C. F.) 78, 82, 260
 Гейгер (Geiger H.) 164
 Гейзенберг (Heisenberg W.) 3, 9, 75, 111, 113—116, 190, 194, 195, 199, 203, 210, 274—276, 285, 289, 292, 298
 Гейтлер (Heitler W.) 231
 Гелл-Манн (Gell-Mann M.) 255, 273
 Герлотц (Herglotz G.) 77
 Герлах (Gerlach W.) 113, 181, 183, 292
 Гернек (Hernack F.) 291
 Герц (Hertz H.) 249, 262, 263, 297
 Гессенберг (Hessenberg G.) 88, 89, 288
 Гильберт (Hilbert D.) 6, 7, 11, 12, 17, 25, 41, 44, 50—57, 148, 151—153, 160, 164, 167, 169, 189, 212, 248, 264, 282, 287, 288
 Глаймор (Glymour G.) 287
 Глашоу (Glashow Sh.) 4, 11
 Голдберг (Goldberg S.) 12, 208, 286
 Гольдгаммер Ц. А. 27, 286
 Гольст (Holst H.) 117, 118, 290
 Гордон (Gordon W.) 267, 281
 Горелик Г. Е. 4
 Гоффман (Hoffmann V.) 149, 150, 169, 189, 204, 208, 239, 242, 292
 Грей (Gray A.) 263
 Григорьян А. Т. 4, 285, 297
 Грин (Green G.) 260
 Громмер Я. П. (Grommer J. P.) 148—150, 165—169, 176, 187, 188, 194, 204—207, 210, 211, 217, 223, 231, 291, 292, 294
 Гроссман (Grossmann M.) 44, 45, 53, 55, 59, 60, 73, 77, 89
 Грязнов Б. С. 285
 Гумм (Gumm R.) 67, 68
 Гурвиц (Hurwitz A.) 77
 Гуссерль (Husserl E.) 77, 80—84, 288
 Дайсон (Dyson F.) 103, 290
 Даламбер (d'Alembert J.) 244
 Дантинг ван (Dantzig D. van) 149, 150, 170, 239
 Дарвин (Darwin Ch. G.) 116
 Дебай (Debye P.) 24, 59, 66, 248
 Дебевер (Debever R.) 295
 Декарт (Descartes R.) 5, 51, 127
 Джексон (Jackson J. D.) 256
 Джеммер (Jammer M.) 12, 17, 286, 293
 Джинс (Jeans J.) 30
 Джозеф (Joseph H.) 80
 Джулиа (Julia V.) 216
 Дирак (Dirac P.) 122, 196, 203, 215, 225, 229—231, 236, 237, 241, 242, 246, 270—272, 275, 276, 278, 295, 298
 Дондер де (Donder T. de) 150, 170, 203
 Доран (Doran B. G.) 286, 297
 Дросте де (Droste T. de) 208
 Друде (Drude P.) 5
 Дуглас (Douglas A. V.) 290
 Дэвидсон (Davidson C.) 103, 290

¹ Составлен X. Бобадильей.

- Евклид (Ευκλείδης) 82, 223
 Ельшиевич М. А. 289, 290, 292
 Зеeman (Zeeman P.) 20, 114, 115, 249, 250
 Зелиг (Seelig C.) 77, 157, 158, 286
 Зельдович Я. В. 285
 Зоммерфельд (Sommerfeld A.) 5, 23, 24, 41, 43, 56, 67, 99, 100, 102, 112, 115, 120, 152, 157, 161, 165, 195, 199, 200, 251, 287, 290
 Иваненко Д. Д. 150, 170, 203, 224, 225, 229—232, 236, 271—275, 285, 287, 294, 295, 296, 298
 Идлс Г. М. 4, 183, 292
 Икеда (Ikeda P.) 150
 Илли (Ily J.) 17, 286
 Инфельд (Infeld L.) 39, 43, 173, 189, 204, 208, 232, 236, 238—244, 292, 293, 296
 Иордан (Jordan P.) 12, 150, 151, 194, 199, 203, 215, 231, 247, 285
 Иос (Joos G.) 141
 Иоффе А. Ф. 179, 182, 201, 292, 293, 294
 Ирмян (Earmann J.) 287
 Ишварара (Ishiwara J.) 45—48, 51, 87, 287, 288
 Каган В. Ф. 173, 191, 289, 291
 Калуза (Kaluzka M.) 141
 Калуза (Kaluzka Th.) 4, 12', 50, 74, 141—151, 157, 164—174, 204, 205, 210, 211—216, 239, 240, 248, 267, 268, 275, 281, 282, 290, 291, 293, 294
 Кан (Kahn C.) 290
 Кан (Kahn F.) 290
 Кант (Kant I.) 79, 84
 Картан (Cartan E.) 7, 11, 89, 163, 171, 175, 217, 218, 219, 225, 226, 232, 234, 235, 244, 280, 284, 291, 294, 295
 Кауфман (Kauffmann W.) 5, 21, 22, 23, 59
 Кедров В. М. 286
 Кеммер (Kemmer N.) 276
 Кемпбелл (Campbell N.) 27, 286
 Кениг (König R.) 89
 Кеплер (Kepler J.) 130
 Кларк (Clark G.) 208
 Клейн М. (Klein M.) 12, 165, 286, 290
 Клейн О. (Klein O.) 150, 170, 194, 203, 205, 211—216, 239, 240, 248, 267, 268, 275, 281, 293, 294
 Клейн Ф. (Klein F.) 66, 69, 76, 287
 Кобзарев И. Ю. 4, 255, 286
 Кодри (Caudrey P.) 286
 Коган Я. И. 216, 294
 Кожевников А. Б. 4
 Коноплева Н. П. 285
 Кортвег (Korteweg D. J.) 31
 Котельников А. П. 293
 Кравец Т. П. 258, 259, 297
 Крамерс (Kramers H.) 115—118, 290
 Кример (Gremmer E.) 216
 Крейман (Kretschmann E.) 102
 Криномазов А. Н. 289
 Кристоффель (Christoffel E. B.) 16, 88, 91, 133, 135, 144, 177, 185, 192, 193, 198, 232
 Кудр де (Coudres Th. de) 20
 Кудрявцев П. С. 286
 Кулон (Coulomb Ch.) 41, 116
 Кун (Kuhn Th.) 296
 Курант (Courant R.) 66, 190
 Лагранж (Lagrange J. L.) 13, 170
 Лакатос (Lakatos I.) 13, 285
 Ланге (Lange F.) 66, 80, 288
 Ландау Л. Д. 231, 239, 256, 276, 296
 Ланде (Lande A.) 12, 112, 114, 253, 285
 Ланжевэн (Langevin P.) 5
 Ланцоз (Lanczos C.) 225, 227, 295
 Лармор (Larmor J.) 5, 18, 25, 28, 30, 263, 297
 Лауб (Laub J.) 34
 Лауб фон (Laue M. von) 104, 117, 165
 Леви-Чивита (Levi-Civita T.) 7, 88, 89, 180, 207, 208, 217, 225, 226, 231, 266, 288, 295
 Левкович А. Д. 291
 Лейбниц (Leibniz G. W.) 152
 Лейтон (Leighton R.) 297
 Леметр (Lemaître G.) 160
 Ленард (Lenard Ph.) 27, 28, 30, 104, 158
 Левин В. И. 6
 Леонтович М. А. 225, 228, 295
 Лернер (Lerner R.) 285
 Ли В. В. (Lee B. W.) 278, 298
 Ли Т. Д. (Lee T. D.) 255, 273, 277
 Липшиц (Lipschitz R.) 88
 Лисневский Ю. И. 289
 Лифшиц Е. М. 239, 256, 296
 Личнеровиц (Lichnerowicz A.) 285
 Лобачевский Н. И. 70, 293, 294
 Лодж (Lodge O.) 5, 19, 25, 286
 Лонгрен (Lonnegren K.) 286
 Лондон (London F.) 170, 203, 214, 237, 268, 269, 270, 276, 294, 297
 Лоренц (Lorentz H. A.) 5, 17—25, 29—35, 41, 51, 53, 54, 77, 79, 119, 157, 220, 228, 256, 263, 266, 286, 293, 297
 Людвиг (Ludwig G.) 150, 296
 Майер (Mayer W.) 150, 169, 216, 232, 235—242, 244, 295, 296
 Мак-Витти (McVittie G.) 227, 295
 Мак-Кормак (McCormack R.) 12, 17, 18, 34, 36, 286
 Максвелл (Maxwell J. C.) 5, 6, 15—18, 24—30, 33, 37—39, 47—49, 53—56, 64, 85, 87, 95, 137, 140, 146, 158, 178, 182, 183, 189, 196, 199, 222, 225, 234, 240, 256—264, 297
 Машель Г. А. 150, 203, 205, 211, 212, 231, 267, 294
 Мандельштам Л. И. 293
 Манли Ю. И. 267, 284, 298
 Марков М. А. 183, 292
 Матиссон (Mathisson M.) 208
 Мах (Mach E.) 79, 85
 Медник (Medicus F.) 80, 82
 Мейер (Meier W. F.) 141
 Молленштедт (Möllenstedt G.) 264
 Мехра (Mehta J.) 12, 287
 Ми (Mie G.) 15, 16, 25—27, 35—48, 54, 59—73, 77, 86, 87, 96, 106, 129, 153, 156, 161, 164, 167, 185, 206, 263, 264, 282, 286, 287, 288
 Мидзуно (Mizuno T.) 46
 Мизнер (Misner Ch.) 94, 208, 289
 Миллс (Mills R.) 243, 253—255, 272—278, 280, 296
 Минковский (Minkowski H.) 23, 36, 39, 49, 50, 53, 54, 59, 77—79, 146, 228
 Монастырский М. И. 4
 Морисау (Moriasu K.) 298
 Мортон (Morton W. B.) 18
 Моссоли (Mossotti O.) 20, 182
 Мотрошилова Н. В. 288
 Мунц (Müntz H.) 223, 225
 Неeman (Ne'eman Y.) 254
 Нейман фон (Neumann J. von) 254
 Нерст (Nernst W.) 24
 Нетер (Noether E.) 58, 61, 62, 64, 65, 69, 77, 254, 279, 282, 287
 Нордстрем (Nordström G.) 41, 45—51, 87, 144, 287, 288
 Ньюмен (Newman M.) 79, 86, 288
 Ньютон (Newton I.) 5, 13, 41, 82, 210, 227, 294
 Обремнов И. Б. 231, 294
 Овчинников Н. Ф. 286
 Омиченко А. А. 291
 Пайс (Pais A.) 254, 255, 292
 Пайнсон (Pynson L. R.) 12, 78, 287, 288
 Палагги (Palagyi M.) 104
 Палатини (Palatini A.) 193, 245, 293
 Парфентьев Н. Н. 70
 Паскаль (Pascal V.) 33
 Паули (Pauli W.) 7—12, 37—42, 54, 65, 69, 74, 102—106, 112, 115, 116, 123, 125, 149, 150, 156—158, 164, 168—170, 174, 175, 195, 202, 203, 215, 239, 224, 247 254—256,

- 284, 269, 273—278, 283—289, 296—298
 Петров А. З. 9, 12, 285
 Пиаджио (Piaggio H.) 227, 295
 Пикар (Piccard A.) 182, 183
 Пифагор (Пифагорас) 130
 Планк (Planck M.) 23—33, 42, 56, 117—120, 152, 153, 176, 184, 190, 199, 212, 214, 217, 222, 223, 229, 282, 286, 290, 293
 Плебанский (Plebanski E.) 208, 293
 Подольский (Podolski B.) 43
 Полак Л. С. 4, 287
 Попов В. Н. 285
 Прока (Proca A.) 276
 Пуанкаре (Poincaré H.) 5, 21, 22, 35, 53, 79, 149, 232, 288
 Пуассон (Poisson S. D.) 40, 48, 234
 Райхенбахер (Reichenbacher E.) 87, 288
 Раман (Raman V. V.) 12, 290, 297
 Рамесский П. К. 295
 Реймон (Reymond A.) 79
 Рейна (Reina C.) 193, 293
 Рейснер (Reissner H.) 78, 187
 Рид (Reid C.) 288
 Рикке (Rieske E.) 20
 Риман (Riemann B.) 62, 78, 82, 100, 133, 138, 162, 186, 198, 218, 221, 223, 232, 284, 291, 294.
 Рисс (Riesz F.) 75
 Ритц (Ritz W.) 59
 Риччи (Риччи-Курбастро) (Ricci, Ricci-Curbastro G.) 88, 89, 134, 136, 145, 174, 176, 221, 226, 288, 289
 Рихтер (Richter St.) 289
 Робертсон (Robertson H. P.) 208, 266
 Родичев В. И. 173, 175, 218, 232, 291, 294
 Родный Н. И. 286
 Розен (Rosen N.) 169, 208, 242, 292, 296
 Румер Ю. Б. (Rumer G. B.) 12, 150, 151, 168, 214, 215, 216, 285, 291
 Рунге (Runge C.) 23
 Рытов С. М. 229, 295
 Садовский В. Н. 285
 Сакурая (Sakurai J.) 254, 255, 277, 278, 297
 Салам (Salam A.) 5, 9, 11, 216, 278, 285
 Сирл (Searle G.) 18
 Ситтер де (Sitter W. de) 129, 130, 160, 208, 290
 Скотт (Scott E.) 286
 Славнов А. А. 253, 297
 Смородянский Д. А. 285
 Соколов А. А. 287
 Соловйн (Solowine M.) 232, 295
 Стэйчел (Stachel J.) 292
 Степан В. С. 286
 Стодола (Stodola A.) 225
 Стокс (Stokes G.) 260, 265
 Странео (Straneo P.) 832, 244
 Стройк (Struik D. J.) 173, 203, 291
 Страус (Strauss E.) 242
 Скоутен (Schouten J. A.) 7, 88, 89, 149, 150, 170—175, 191, 219, 226, 238, 239, 244, 280, 289, 291
 Сэндс (Sands M.) 297
 Тамани (Tamaki K.) 46
 Тамм Н. Е. 7, 224, 225, 228, 229, 276, 295
 Топлиц (Toeplitz O.) 148
 Тимофеев И. С. 286
 Тирн (Thiry J.) 150, 151, 215
 Тирринг (Thirring H.) 291
 Толман (Tolman R.) 160
 Томонага (Tomonaga S.) 8, 277
 Томсон В. (Thomson W.) 15, 25, 26, 28, 30
 Томсон Дж. (Thomson J. J.) 5, 18—20, 25, 259, 260
 Тоннела (Tonnelat M.—A.) 12, 171—175, 197, 199, 201, 285, 291
 Торн (Torne K.) 94, 208, 289
 Траутман (Trautman A.) 287
 Тредер (Tredner H.—J.) 12, 226, 292, 293, 296
 Трифоноу Д. Н. 289
 Тростников В. Н. 288
 Тэт (Tait P. C.) 262
 Уилер (Wheeler J. A.) 94, 208, 289
 Уленбек (Uhlenbeck G.) 150, 170, 203
 Утияма (Utiyama R.) 277
 Фаддеев Л. Д. 253, 297
 Фарадей (Faraday M.) 18, 158, 181, 256—261, 297
 Фаулер (Fowler W.) 203
 Фейнберг Е. Л. 264, 297
 Фейнман (Feynman R.) 8, 273, 277, 297
 Ферми (Fermi E.) 276
 Феррарис (Ferraris M.) 193, 293
 Фирц (Fierz M.) 151
 Фихте (Fichte J. G.) 80—85, 288
 Фитцджеральд (Fitzgerald G.) 5, 19, 20, 263
 Фишер (Fischer E.) 75
 Фойгт (Voigt W.) 80
 Фок В. А. 7, 150, 170, 194, 203—214, 224, 225, 229—232, 236, 248, 267—278, 281, 293—295, 298
 Фоккер (Fokker A. D.) 50, 251
 Форман (Forman P.) 12, 121, 290, 296, 297
 Франк (Franck J.) 165, 181, 183
 Франквилля (Francaviglia M.) 193, 293
 Фредерикс В. К. 150, 203, 212, 213, 214, 231, 294
 Френель (Fresnel A.) 122
 Френкель В. Я. 182, 292
 Френкель Я. И. 231
 Фридман А. А. 160, 180, 197, 212, 292, 294
 Фриз де (Vries H. de) 31
 Фуджи (Fujii Y.) 255
 Хаббл (Hubble E.) 160
 Хайльброн (Heilbron J.) 296
 Хевисайд (Heaviside O.) 5, 18, 19, 41, 262, 263
 Хенль (Hönl H.) 289
 Хиросигэ (Hirosgé T.) 12, 17, 286
 Холтон (Holton J.) 51, 152, 287
 Хорф (Hoff J.) 157
 Хоффман (Hoffmann D.) 296
 Хунд (Hund F.) 12, 112, 114, 115, 289
 Целльнер (Zöllner J. K.) 20, 182
 Чирнгауза (Tschirhausen E. W. von) 141
 Чосер (Chaucer G.) 141
 Чэдвайн (Chadwick J.) 276
 Чэмберс (Chambers R.) 264
 Шварцшильд (Schwarzschild K.) 59, 103, 225
 Швингер (Schwinger J.) 8, 277, 278, 298
 Широков П. А. 70, 291
 Шмутцер (Schmutzer E.) 12, 173, 175, 212, 285
 Шрёдингер (Schrödinger E.) 7, 8, 11, 12, 31, 74—76, 190, 194, 199—205, 213, 232, 236, 237, 241, 247—253, 265—270, 281, 285, 293, 294, 296, 297
 Штарк (Stark J.) 248, 250
 Штерн (Stern O.) 113, 181
 Эвальд (Ewald P.) 66
 Эддингтон (Eddington A. S.) 7, 11, 12, 44, 74, 87, 97, 103, 130—141, 151, 157, 160, 164, 167—176, 180, 190—192, 197, 204, 206, 208, 216, 225, 227, 235, 248, 266, 285, 290, 295
 Эйзенхарт (Eisenhart L.) 7, 217, 234, 244, 294
 Эйнштейн (Einstein A.) 4—17, 23—37, 42—61, 65—80, 86—103, 112—125, 129, 136—143, 148—176, 178—248, 252, 254, 266, 269, 272, 280—298
 Эйлер (Euler L.) 170
 Эйро (Eyrand H.) 238, 296
 Эккарт (Eckhart I.) 83, 86
 Эпштейн (Epstein P. S.) 115
 Эренфест (Ehrenfest P.) 103, 114—117, 150, 152, 156, 158, 165, 170, 179, 182, 183, 204, 241, 292
 Эресман (Ehresmann Ch.) 280
 Эрлихсон (Erlichson H.) 264, 297
 Юкава (Yukawa H.) 276
 Юнг (Young Th.) 122
 Юшкевич А. П. 82
 Явлов Б. Е. 181—183, 292
 Якоби (Jacobi K. G.) 13
 Янг (Yang C. N.) 11, 243, 253—255, 272—280, 285, 296

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава первая ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ПОЛЕВАЯ ПРОГРАММА СИНТЕЗА ФИЗИКИ	13
Вводные замечания	13
Формирование электромагнитно-полевой программы	17
Трудности электромагнитно-полевой программы: СТО и кванты	22
Единые теории поля, основанные на электромагнитно-полевой программе	25
Попытки Эйнштейна	28
Теория Ми	35
Теории Ишивары и Нордстрема	45
Выводы	51
Глава вторая ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ — ЯДРО ПРОГРАММЫ ЕДИНЫХ ГЕОМЕТРИЗОВАННЫХ ТЕОРИЙ ПОЛЯ	52
Релятивистская программа и общая теория относительности	52
Отношение Эйнштейна к унифицирующим возможностям ОТО	55
Теория Гильберта — первая единая теория поля, основанная на ОТО	58
Выводы	71
Глава третья ТЕОРИЯ ВЕЙЛЯ — ПЕРВАЯ ПОДЛИННО ГЕОМЕТРИЗОВАННАЯ ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ	73
Научно-коммуникативные аспекты формирования теории Вейля	74
Значение философских интересов Вейля	78
Предшествующие работы по единым теориям поля	86
Предшествующие исследования по дифференциальной гео- метрии	88
Геометрический фундамент теории и основная идея объеди- нения гравитации и электромагнетизма	89
Проблема полевых уравнений и законы сохранения в теории Вейля	93
Вопрос об опытной проверке основ теории (критика Эйн- штейна)	96
В. Паули и теория Вейля: от активной поддержки к критике	102
Выводы	107

Глава четвертая	
1921 ГОД — УЗЕЛ В РАЗВИТИИ ЕДИНЫХ ГЕОМЕТРИЗОВАННЫХ ТЕОРИЙ ПОЛЯ	109
Введение	109
Квантово-теоретическая программа	111
Развитие теории Вейля	123
Теория Эддингтона	130
Теория Калуцы	141
Теория Эйнштейна 1919—1923 гг.	151
Выводы	168
Глава пятая	
ПУТЬ ЭЙНШТЕЙНА: ДЕСЯТИЛЕТИЕ НАДЕЖД И РАЗОЧАРОВАНИЙ	171
Введение	171
Аффинная теория, 1923—1924 гг.	176
Концепция переопределения полевых уравнений и кванты, 1923 г.	184
Аффинно-метрическая теория, 1925—1926 гг.	190
Проблема уравнений движения и пятимерие, 1927 г.	203
Геометрия с абсолютным параллелизмом, 1928—1930 гг.	216
Новый вариант пятимерия (Эйнштейн и Майер, 1931—1932 гг.)	238
Эскиз дальнейших усилий Эйнштейна (Принстон, 1933—1955 гг.)	241
Выводы	243
Глава шестая	
РОЛЬ ЕДИНЫХ ГЕОМЕТРИЗОВАННЫХ ТЕОРИЙ ПОЛЯ В ГЕНЕЗИСЕ И РАЗВИТИИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ	247
Введение	247
Теория Вейля и волновая механика	248
Калибровочная концепция поля и единые теории поля (постановка проблемы)	253
Потенциалы и напряженности в электродинамике	256
Калибровочные преобразования в теории Вейля	265
Локальные калибровочные преобразования и квантовая механика	267
От калибровочной симметрии к калибровочным полям	269
На пути к теории Янга — Миллса	275
Выводы	280
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	282
ЛИТЕРАТУРА	285
УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН	299

Владимир Павлович Визгин

**ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ
в первой трети XX века**

Утверждено к печати

Институтом истории естествознания и техники
Академии наук СССР

Редактор издательства И. М. Столярова

Художник Ф. Н. Буданов

Художественный редактор С. А. Литвак

Технические редакторы

А. М. Сатарова, О. М. Гуськова

Корректоры

Н. М. Вселюбская, Т. С. Козлова

ИБ № 29318

Сдано в набор 18.10.84

Подписано к печати 13.02.85

T-03340. Формат 60×90^{1/16}

Бумага для глубокой печати

Гарнитура обыкновенная

Печать высокая

Усл. печ. л. 19,0. Усл. кр. отт. 19,0.

Уч.-изд. л. 22,9

Тираж 2350 экз. Тип. зак. 445

Цена 2 р. 60 к.

Ордена Трудового Красного Знамени

издательство «Наука»

117864 ГСП-7, Москва В-485

Профсоюзная ул., 90.

4-я типография издательства «Наука»

630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.