

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

— КЛАССИКИ НАУКИ —



ПЕТЕР ДЕБАЙ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

СТАТЬИ
1909 - 1965



ЛЕНИНГРАД
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1987

С Е Р И Я «К Л А С С И К И Н А У К И»

Основана академиком С. И. ВАВИЛОВЫМ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. А. Баев (председатель), *И. Е. Дзялошинский*, *А. Ю. Ишлинский*,
С. П. Капица, *И. Л. Кунянц*, *А. Н. Колмогоров*, *С. Р. Микулинский*,
Д. В. Ознобишин (ученый секретарь), *Л. С. Полак*, *Я. А. Смородинский*,
А. С. Спирин, *И. Т. Фролов* (заместитель председателя),
А. Н. Шамин, *А. Л. Яншин*

УДК 53 (081)

Д е б а й П. Избранные труды. — Л.: Наука, 1987. — 559 с.

В книге собраны переводы основных работ П. Дебая, одного из крупнейших физиков нашего времени, лауреата Нобелевской премии, относящихся к различным областям физики и смежных наук. В нее включены работы по теории теплоемкости кристаллов, дифракции рентгеновских лучей в кристаллических порошках, по изучению экранирования электрического заряда в растворах электролитов, по теории рассеяния света, а также статья, в которой получены асимптотические формулы для цилиндрических функций с большим значением аргумента и любым индексом. Большинство публикуемых работ полностью сохранило свою актуальность и в наши дни.

Книга рассчитана на научных работников — физиков, математиков и химиков, а также лиц, интересующихся историей науки.

Библиогр. 569 назв. Ил. 102. Табл. 72.

П од р е д а к ц и е й

чл.-кор. АН СССР И. Е. Д з я л о ш и н ск о г о

С о с т а в и т е л ь и п е р е в о д ч и к

д-р физ.-мат. наук В. Л. Г у р е в и ч

ПЕТЕР ИОЗЕФ ВИЛЬГЕЛЬМ ДЕБАЙ

БИОГРАФИЯ И ОЧЕРК НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Петер Дебай родился 24 марта 1884 г. в Маастрихте, в голландской провинции Лимбург. Его отец, Иоанн Вильгельм Дебай, был мастером на заводе металлических изделий в Маастрихте. Мать, Мария Анна Барбара Дебай (урожденная Рюмкерс), в течение многих лет работала кассиром в театре Маастрихта; театр в большой мере играл роль центра культурной жизни города. Кроме Петера Дебая, в семье был еще один ребенок — сестра, четырьмя годами младше его.

С двенадцатилетнего возраста в течение пяти лет Дебай посещал городскую школу в Маастрихте. Учился он хорошо и закончил школу первым учеником. Естественно, возник вопрос о продолжении его образования. В те времена получение высшего образования было делом довольно необычным для выходцев из простых семей, каковым был Дебай. Но его отец решил, что он согласен работать «денно и нощно», чтобы оплатить образование сына.

Молодому Дебаю предстояло сделать выбор между Техническим университетом в Дельфте и Высшей технической школой в Ахене. Вопрос платы за обучение и возможность продолжать жить дома заставили его выбрать второй вариант: Ахен находился сравнительно недалеко — в 30 километрах от его дома, на территории Германии. И в течение ряда лет Дебаю приходилось вставать около 5 часов утра, чтобы успеть на утренний поезд в Ахен.

Здесь он учился у таких выдающихся ученых своего времени, как Макс Вин (экспериментальная физика) и Арнольд Зоммерфельд (теоретическая физика). Его дипломная работа касалась теоретического рассмотрения токов Фуко в прямоугольном проводнике; в ней он предложил изящное решение задачи, основанное на теореме Грина. Это исследование стало его первой печатной работой. Другие работы, выполненные в Ахене, были посвящены изучению дифракции света на телах цилиндрической и сферической формы.

Зоммерфельд сразу обратил внимание на способного молодого физика. Как только у Зоммерфельда появилась возможность взять себе ассистента, он не сомневался в своем выборе. В 1906 г. Дебай последовал вместе с Зоммерфельдом в Мюнхен, где проработал в течение пяти лет — до 1911 г.

В Мюнхене в 1908 г. он закончил работу над докторской диссертацией. Она явилась продолжением работ по дифракции света, начатых в Ахене. Диссертация называлась «К теории радуги». В ней рассматривалось

радиационное давление, испытываемое сферическими частицами с различными коэффициентами преломления. В этой работе Дебай продемонстрировал прекрасное владение математическим аппаратом. Конечный результат вычислений выражался через функции Ханкеля, у которых аргумент и индекс могли одновременно стремиться к бесконечности. Асимптотические представления для таких функций в то время отсутствовали, и Дебай их получил. А главное, в этой работе он впервые занялся проблемой, которая продолжала его интересовать на протяжении всей последующей жизни, — взаимодействием излучения с веществом.

Другая работа Дебая, относящаяся к этому же времени, выполненная совместно с Хондром и опубликованная в 1910 г., касалась вопроса распространения электромагнитных сигналов, который приобрел большое значение в последующие десятилетия в теории радаров и волноводов. В том же году он опубликовал работу «Концепция вероятности в теории излучения». Она содержала один из первых последовательных выводов формулы Планка.

В 1911 г. Дебай переехал в Цюрих, где стал преемником Эйнштейна на кафедре теоретической физики Цюрихского университета. Университет предложил двадцатисемилетнему Дебаю должность ординарного профессора теоретической физики.

За несколько лет до этого Эйнштейн опубликовал свою первую работу по теории теплоемкости твердых тел. Используя квантовую гипотезу Планка, он дал в этой работе выражение для удельной теплоемкости, которое удовлетворительно описывало данные опыта в сравнительно широком температурном интервале. Однако в своей последующей публикации он обращал внимание на тот факт, что использованная им модель с одной характерной частотой все-таки обнаруживает слишком большие расхождения с экспериментальными данными.

Дальнейший существенный шаг в построении теории удельной теплоемкости твердых тел принадлежал Дебаю. Он сам много лет спустя следующим образом описывал стоявшую перед ним задачу: «Я считал, что формула Планка применима к любым колебательным системам. Я представлял себе твердое тело или решетку из атомов таким образом, что путем введения соответствующих координат эту механическую систему можно описать как совокупность некоторого числа независимых осцилляторов, из которых каждый имеет собственную частоту. Единственный вопрос состоял в том, чтобы найти этот спектр частот. Я начал формулировать математическую задачу для трехмерного кубического расположения атомов. Эта задача оказалась довольно сложной. Вскоре я понял, что для моих непосредственных целей нет необходимости иметь детальные сведения о спектре. Нужно знать только число степеней свободы; на долю каждой из них приходится энергия kT . С другой стороны, при низких температурах, согласно формуле Планка, на долю высоких частот приходится все меньше и меньше энергии. Поэтому я решил найти предельный закон распределения плотности собственных частот».¹

¹ Debye P. The early days of lattice dynamics. — In: Lattice dynamics. London: Pergamon Press, 1964, p. 9.

В своей работе Дебай предложил модель спектра колебаний кристаллической решетки, которая удовлетворяла двум существенным требованиям. Во-первых, она правильно описывала ход плотности состояний в области низких частот, где последняя определяется длинноволновыми акустическими колебаниями, т. е. звуковыми волнами, которые могут распространяться в кристалле. Во-вторых, спектр в этой модели обрывался в области высоких частот. Это обстоятельство позволило правильно учесть полное число колебательных степеней свободы кристаллической решетки. В итоге в науку были введены важнейшие понятия, получившие название дебаевской модели спектра колебаний кристаллической решетки и температуры Дебая. Найденное им выражение для удельной теплоемкости известно ныне как «формула Дебая». Для многих кристаллов эта формула описывает экспериментальный ход теплоемкости в гораздо более широком температурном интервале, чем формула Эйнштейна.

Любопытно отметить, что в том же 1912 г. появились в печати две статьи Борна и фон Кармана, в которых колебания кристаллической решетки рассматривались совершенно иным образом. Сама решетка трактовалась как система материальных точек, связанных друг с другом квазиупругими силами, обладающая пространственной периодичностью. В названных работах детально изучались связанные колебания такой трехмерной структуры. Нужно сказать, что и сам Дебай использовал подобный подход в своей работе, посвященной рассеянию рентгеновских лучей (о ней подробнее будет сказано ниже).

Вот как сам Борн вспоминает пятьдесят лет спустя об истории создания теории колебаний кристаллической решетки и о начале своей совместной работы с фон Карманом: «Однажды мы заговорили о статье Эйнштейна, посвященной удельной теплоемкости твердых тел... Мы сразу обратили внимание на то, что монохроматическую формулу Эйнштейна следует улучшить, приняв во внимание взаимодействие колебаний атомов. Мы начали, естественно, с анализа одномерного случая... Затем мы сформулировали трехмерную задачу и дали ее приближенное решение. После того как мы послали статью в *Physikalische Zeitschrift*, в Гётtingен приехал из Мюнхена профессор Зоммерфельд, чтобы прочесть лекцию. От него мы узнали, что Дебай решил очень простым методом ту же самую задачу, о чём он сообщил в своей лекции, прочитанной в Швейцарии. Это произошло незадолго до того, как была послана в печать наша статья. Таким образом, приоритет принадлежит Дебаю, опередившему нас на несколько недель».²

В 1912 г. Дебай покинул кафедру теоретической физики в Цюрихе и переехал в Уtrecht, возвратившись, таким образом, в родную Голландию. Одной из причин, побудивших его к этому, было, вероятно, желание уделить часть времени экспериментальной работе. Однако занял он должность профессора математической физики и теоретической механики.

В 1913 г. вышла одна из самых известных работ Дебая — «Теория аномальной дисперсии в области длинноволнового электромагнитного

² Born M. Reminiscences of my work on the dynamics of crystal lattices. — In: Lattice dynamics. London: Pergamon Press, 1964, p. 1—7.

излучения». Она была посвящена важному вопросу — теории диэлектрических потерь в полярных жидкостях, т. е. жидкостях с молекулами, обладающими постоянными дипольными моментами. Нужно сказать, что интерес к задачам, в которых фигурируют такие молекулы, возник у Дебая еще в Цюрихе, за год до этого. В той же работе, о которой идет речь сейчас, Дебай основывался на анализе такой физической картины, когда под действием переменного электрического поля постоянные молекулярные диполи поворачиваются, так как благодаря действию электрических сил число диполей, ориентированных по полю, стремится превысить число диполей, ориентированных против поля. Вязкое трение поворачивающихся диполей о соседние частицы жидкости является, согласно Дебаю, источником потерь.

Работа Дебая имела чрезвычайно большое значение для изучения диэлектрических потерь, так как она содержала постановку этой физической задачи. Кроме того, она установила определенную традицию в этом разделе физики. Так, диэлектрические потери в самых разных физических системах (а не только в жидкостях) часто называют дебаевскими потерями. Экспериментальные данные по потерям в таких системах нередко обрабатывают по так называемой релаксационной формуле Дебая, т. е. по формуле того типа, который он получил для полярных жидкостей.

Впоследствии Дебай пришел к выводу о необходимости дальнейшего развития теории диэлектрических потерь в жидкостях. Это было связано с тем, что претерпели изменение сами представления о физической картине тех процессов, которые протекают в жидкости. Дело в том, что взаимодействие полярной молекулы с соседними частицами жидкости не во всех случаях может быть описано как вязкое трение. Соседние молекулы также могут менять свои ориентации в пространстве, причем эти изменения могут быть достаточно резкими, т. е. иметь скачкообразный характер. В результате испытывает резкие скачки и фаза колебаний осциллятора, представляющего собой молекулярный диполь, колеблющийся в переменном электрическом поле.

Дальнейший существенный шаг в развитии этих теоретических представлений сделал Я. И. Френкель. Он нашел выражение для динамической поляризации полярной жидкости, отвечающее описанной физической картине.

Пребывание Дебая в Утрехте продолжалось всего два года. Однако в научном отношении оно оказалось весьма плодотворным. Кроме теории диэлектрической дисперсии и диэлектрических потерь в жидкостях, полученные им результаты включали также работы по теории колебаний кристаллической решетки и по теории дифракции рентгеновских лучей.

Дифракция рентгеновских лучей была открыта в Мюнхене в 1912 г. Толчком к этому открытию послужил доклад на теоретическом семинаре Зоммерфельда о работе Эвальда об оптических свойствах пространственно-периодической решетки из электронов. Один из участников семинара, М. фон Лауэ, высказал мысль, что если длина волны излучения оказывается порядка расстояния между структурными единицами кристалла, то должны наблюдаться дифракционные явления. Для экспериментальной

проверки этой идеи Лауз предложил использовать рентгеновские лучи; специально поставленные опыты дали блестящее подтверждение ее правильности. Так возникла новая область физики твердого тела — рентгеноструктурный анализ.

Дебай внимательно следил за этими исследованиями и был прекрасно с ними знаком. Его интерес к проблемам теории излучения, с одной стороны, и к проблемам теории колебаний кристаллической решетки — с другой, подготовили его к тому, чтобы сделать существенный шаг в теории дифракции рентгеновских лучей. Его работа «Интерференция рентгеновских лучей и тепловое движение» явилась одним из существенных этапов в развитии нашего понимания физики кристаллов.

Теоретическое рассмотрение Дебая основывалось на идее, что атомная структура не является жесткой, как это ранее считал Лауз, а ее периодичность возмущается тепловым движением атомов, составляющих кристаллическую решетку. Учет теплового движения, как показал Дебай, приводит к размытию интерференционных максимумов. Теория, построенная Дебаем, детально описывает характер этого размытия, его температурную и угловую зависимость.

Во время пребывания Дебая в Утрехте произошло большое событие в его личной жизни. Он женился на Матильде Альберер, уроженке Баварии. С ней он прожил всю свою жизнь. У них было двое детей — сын и дочь.

В 1914 г. Дебай получил приглашение в Гётtingен. По-видимому, толчком к этому послужило огромное впечатление, которое произвело выступление Дебая на дискуссии по кинетической теории материи, состоявшейся в Гётtingене с 21 по 26 апреля 1913 г. Его доклад назывался «Уравнение состояния и его обоснование с помощью квантовой гипотезы».

Этот доклад, включенный в изданный том трудов конференции, содержал два важных дополнения: в первом рассматривались ангармонические члены в выражении для энергии колебаний кристаллической решетки и таким путем объяснялось явление теплового расширения; во втором явление теплопроводности трактовалось как результат процессов рассеяния и распада волн колебаний решетки (впоследствии прокvantованных в работе И. Е. Тамма и получивших название фононов). Фактически именно на основе идей такого рода Р. Пайерлс 16 лет спустя построил свою знаменитую теорию фононной теплопроводности кристаллических диэлектриков.

В Гётtingене Дебай получил должность профессора теоретической и экспериментальной физики. При этом ему была предоставлена возможность экспериментальной работы в новых, недавно построенных лабораториях. Однако основной притягательной силой Гётtingена была плеяда математиков и физиков, работавших там в это время. Математическую школу возглавлял Феликс Клейн. С ним вместе работали Давид Гильберт, Кааратеодори, Ландау, Теплиц, Вейль, Рунге и Курант. В числе физиков должны быть названы Фойхт, Вихерт, Маделунг, Прандтль, Рикке, Борн, фон Карман, Тамман и Симон.

Переезду Дебая в Гётtingен непосредственно предшествовал выход

из печати знаменитой статьи Бора (июль 1913 г.), в которой вводилось квантование энергии электрона в атоме. Далее Бор показал, что этот результат эквивалентен предположению о том, что момент количества движения электрона при его обращении вокруг ядра в стационарном состоянии кратен универсальной величине — постоянной Планка, деленной на 2π ($\hbar/2\pi$).

В том же самом году Дебай предложил более общую форму условия квантования

$$\oint p dq = n\hbar,$$

где q — обобщенная координата, p — соответствующий ей обобщенный импульс, а интегрирование производится по периоду движения. Хочется подчеркнуть, что это условие, предложенное Дебаем, было сформулировано им раньше, чем ему стала доступна первая публикация Бора.

Это условие было вновь независимо сформулировано в 1915 г.; его обычно связывают с именем Зоммерфельда, и до создания квантовой механики в 1926 г. оно считалось наиболее общей формой условия квантования.

Продолжая свои исследования в области теории взаимодействия рентгеновских лучей с веществом, Дебай высказал точку зрения, что в веществе, пребывающем в любом агрегатном состоянии, никогда не приходится иметь дело с совершенно беспорядочным расположением атомов или молекул и что для наблюдения дифракции рентгеновских лучей вовсе не требуется полного кристаллического упорядочения. В его работе 1915 г. было доказано, что даже в молекулярных газах, где молекулы совершают хаотическое, беспорядочное движение, расположение атомов все же не является абсолютно беспорядочным. О наличии определенного порядка в их расположении можно судить по дифракционной картине, возникающей при прохождении рентгеновских лучей через газ. К аналогичному выводу о влиянии корреляций в расположении атомов, образующих молекулы газа, на дифракцию рентгеновских лучей независимо пришел и Эренфест в том же самом 1915 г.

С изучением дифракции рентгеновских лучей было связано и начало экспериментальной деятельности Дебая. Сначала Дебай вместе со своим ассистентом, молодым швейцарским физиком Паулем Шеррером, пробовал получить рентгенограмму от листа бумаги; естественно, никакой интересной картины на фотографии не получилось. Затем был исследован тонко измельченный порошок LiF. Успех оказался полным. На фотографии были отчетливо видны кольца, получающиеся пересечением рентгеновских лучей, дифрагировавших от случайно ориентированных кристалликов вдоль образующих конусов, с фотопленкой.

Этот метод Дебая—Шеррера, или метод порошков, в течение многих лет применялся в качестве основного метода рентгеноструктурного анализа. Он сохраняет свое значение и до настоящего времени; его используют для идентификации кристаллических материалов, будь они естественного или искусственного происхождения, в химии, минералогии, биологии и металлургии. В качестве одного из первых приложений этого

метода Шеррер установил природу металлических коллоидных растворов и показал, как можно определить размеры и структуру частиц далеко за пределами разрешающей силы обычного оптического микроскопа. Применение метода позволило определить структуру целого ряда кристаллов.

В Гёттингене Дебай также опубликовал работу по теории эффекта Зеемана в свете квантовой гипотезы. Он получил выражение для дискретных значений угла, который образует орбита электрона с направлением магнитного поля, т. е. нашел (практически одновременно с Зоммерфельдом) правила квантования проекций момента количества движения электрона.

Другая важная работа этого периода относилась к области молекулярной физики и была посвящена попытке объяснить происхождение ван-дер-ваальсовых молекулярных сил сцепления (1920 г.). В этой работе Дебай пришел к выводу, что между неполярными молекулами, т. е. такими молекулами, у которых нет постоянных (жестких) дипольных моментов, существует квадрупольное взаимодействие. Это взаимодействие обусловлено тем, что молекула не является жесткой электрической системой, оно полностью отсутствовало бы, если бы молекула представляла собой систему совершенно неподвижных электрических зарядов. В качестве доказательства того, что заряды в молекуле фактически подвижны, Дебай приводит экспериментальные данные по коэффициентам преломления газов, значения которых заметно отличаются от единицы.

Дебай оставался в Гёттингене до 1920 г. В 1920 г. он принял предложение вновь переехать в Цюрих и занять там должность директора Физического института при федеральной Высшей технической школе. В это же время он стал редактором «Physikalische Zeitschrift» — одного из основных физических журналов того времени. В этом журнале было напечатано большое число выдающихся работ самого Дебая.

В 1923 г. он опубликовал работу, содержащую количественную теорию изменения длины волны рентгеновских лучей при их рассеянии свободным электроном. На опыте этот эффект наблюдался Комптоном, о чем тот и сообщил в короткой заметке, опубликованной в конце 1922 г. Его последующая, более подробная публикация содержала также квантовую теорию этого эффекта, который и получил в науке название эффекта Комптона. Таким образом, теория этого явления была построена Дебаем и самим Комптоном независимо и практически одновременно.

В том же году Дебай опубликовал (в соавторстве со своим ассистентом Э. Хюккелем) две большие статьи по теории электролитов. Интерес к этой области физики был совершенно новым для Дебая. В первой статье рассматривались равновесные свойства растворов сильных электролитов. В начале статьи авторы замечают, что большая группа электролитов — сильные кислоты, основания и их соли, совокупно называемые «сильными» электролитами — обнаруживает определенные отклонения от зависимостей, требуемых классической теорией (под классической имеется в виду теория, применимая к таким растворам, где растворенное вещество не диссоциирует на ионы). Далее они строят теорию, которая отличается от

классической учетом кулоновского взаимодействия ионов, диссоциированных в растворе.

Все последующее рассмотрение основано на учете того важного обстоятельства, что, рассматривая любой ион, мы обнаруживаем в его окружении больше ионов противоположного, чем того же, знака — как непосредственный результат действия электростатических сил между ионами. Далее авторы замечают, что для вычисления соответствующей характерной длины, на которой, если пользоваться современной терминологией, поле данного иона экранируется другими ионами, необходимо принять во внимание тепловое движение ионов.

Соответствующая фундаментальная характерная длина $1/\kappa$, фигурирующая в качестве основной величины в теории сильных электролитов, получила название радиуса Дебая—Хюккеля. Она и определяет характерный размер ионной атмосферы, т. е. заряженного облака, окружающего данный ион и состоящего преимущественно из ионов другого знака. Потенциальная энергия отдельного положительного иона с зарядом e по отношению к его окружению равна $-e^2/D\kappa$, где D — диэлектрическая проницаемость растворителя.

Вычислив добавку к термодинамическому потенциалу раствора, обусловленную кулоновскими силами, авторы переходят к расчету конкретных величин, измеряемых на опыте. Это и осмотическое давление, и понижение давления пара, и понижение точки замерзания (и повышение точки кипения) раствора. Все эти величины непосредственно связаны друг с другом. Сопоставление с теорией их экспериментальных значений (в первую очередь понижения точки замерзания) знаменовало немедленный успех теории.

Хотелось бы специально подчеркнуть то большое влияние, которое оказала идея дебаевского экранирования на другие, казалось бы, весьма далекие области физики. Сюда относится и физика плазмы, и физика твердого тела, и даже физика элементарных частиц.

Вторая из этих работ, написанных совместно с Хюккелем, посвящена гораздо более трудной проблеме. В ней изучается подвижность ионов в растворе в зависимости от их концентрации. Нужно сказать, что в статье анализировались не абсолютные значения подвижностей, а их отклонения (пропорциональные корню квадратному из концентрации) от экспериментальных значений для разбавленных растворов.

Далее в работе проделан весьма тонкий и полный анализ возникшей физической ситуации. В работе вводится и вычисляется характерное время, которое требуется для установления ионной атмосферы. Оно определяется как то время релаксации, в течение которого эта атмосфера формируется, если в раствор внезапно добавить электрический заряд.

Благодаря существованию такого конечного времени при движении иона в электрическом поле происходит деформация окружающей его ионной атмосферы. Дело в том, что при движении иона непрерывно нарушаются равновесие с его окружением, а восстановление равновесия требует конечного времени релаксации. В итоге возникает отставание ионной атмосферы от движущегося иона. Оно приводит к возникновению дополн-

нительной тормозящей силы, действующей на ион, которая тем больше, чем выше концентрация ионов в растворе.

Вторая причина дополнительного торможения иона состоит в наличии в растворе ионов другого знака. Они движутся под действием электрического поля в противоположном направлении и увлекают при этом раствор, находящийся в их непосредственном окружении.

Работа содержит весьма глубокий и обстоятельный анализ существовавших к тому времени экспериментальных данных. Она заложила основы теории подвижности сильных электролитов.

В ряде последующих статей, часть из которых написана совместно с Фалькенхагеном, Дебай продолжал развивать идеи относительно термодинамических и кинетических свойств растворов сильных электролитов. Среди них в первую очередь следует отметить работу, посвященную частотной зависимости (дисперсии) проводимости и диэлектрической проницаемости сильных электролитов. Как и можно было бы ожидать на основании чисто физических соображений, существенная дисперсия имеет место на частотах порядка обратного времени релаксации ионной атмосферы, о котором говорилось выше. Таким образом, экспериментальное исследование дисперсии, которая, как заключают Дебай и Фалькенхаген, имеет место в экспериментально доступном частотном интервале, могло бы дать полезные сведения о временах релаксации в различных растворах. Предсказания теории были впоследствии проверены в лабораториях Дебая и Вина.

По-видимому, один из самых значительных результатов, полученных Дебаем во время пребывания в Цюрихе, содержался в короткой заметке под названием «Несколько замечаний относительно намагниченности при низких температурах». В ней Дебай исследовал явление адиабатического размагничивания и предложил использовать его как средство достижения низких температур.

Еще в 1904 г. Ланжевен указывал, что адиабатическое размагничивание газообразного кислорода должно обязательно привести к охлаждению газа. На опыте такого рода эффект наблюдали Вейс и Пикар на ферромагнитном никеле. Однако прежде никто не рассматривал это явление как средство достижения очень низких температур. Дебай же дал и количественную теорию этого явления.

1926 г. — год создания современной квантовой механики. Дебай не только живо воспринял эти новые идеи — существуют свидетельства, что он сыграл роль в их формировании. Вот что пишет в своих воспоминаниях один из крупнейших физиков, академик П. Л. Капица: «Прочтя работу де Бройля в „Comptes rendus“, Дебай предложил Шредингеру рассказать о ней на семинаре. Шредингер на это ответил примерно так: „О такой чепухе я не хочу рассказывать“. Но Дебай, как старший руководитель, сказал, что все же ему надо это сделать. Тогда Шредингеру пришлось согласиться, и он решил попытаться представить на семинаре идеи де Бройля в более удобопонимаемом математическом виде. Когда ему удалось это сделать, то он и пришел к тем уравнениям, которыми он прославился на весь мир и которые носят теперь его имя.

Дебай мне рассказал, что когда Шредингер излагал свою работу на семинаре, он сам не понимал, какое крупное открытие он сделал. Дебай тут же на семинаре сказал ему: „Вы сделали замечательную работу“.³

В 1927 г. Дебай покинул Цюрих. Он занял должность профессора экспериментальной физики и директора Физического института при Лейпцигском университете. В этот период его интересы почти целиком сосредоточились на вопросах химической физики. Вышел из печати классический труд Дебая — книга «Полярные молекулы». В нем рассматривались молекулярные аспекты диэлектрического поведения, главным образом газов и жидкостей.

В процессе экспериментальной работы Дебай с сотрудниками в Лейпциге сумел впервые получить дифракцию рентгеновских лучей на изолированных молекулах. Этот успех был достигнут в опытах с парами четыреххлористого углерода. По размерам интерференционных колец удалось с высокой точностью определить расстояние между атомами хлора в молекуле. Затем таким же образом была исследована структура целого ряда других важных молекул.

Другой вопрос, которым занимался Дебай во время пребывания в Лейпциге, — это изучение жидкостей с помощью дифракции рентгеновских лучей. Дебай указал, как с помощью обратного преобразования Фурье можно по угловой зависимости интенсивности рассеяния определить вероятность нахождения молекул жидкости на том или ином расстоянии друг от друга. Структуру жидкостей он обсуждал в терминах ближнего порядка.

Его интерес к взаимодействию электромагнитных волн с веществом проявился в это время также и в работах по дифракции света на ультразвуковых волнах. Свою работу 1932 г., выполненную совместно с Сирсом, он начинает со ссылки на известную работу Л. Бриллюэна 1922 г., посвященную теории рассеяния света акустическими тепловыми флуктуациями (к сожалению, более ранняя работа Л. И. Мандельштама 1918 г. на ту же тему осталась, по-видимому, неизвестной Дебаю). Авторам работы пришла мысль, что было бы интересно попробовать рассеять свет звуковыми волнами, искусственно возбужденными в жидкости (о возможности подобной постановки опыта также упоминал Бриллюэн в своей статье). В эксперименте, который они поставили, наблюдались спектры различного порядка, подобные спектрам от дифракционных решеток. Число порядков, которые удавалось наблюдать, зависело от интенсивности колебаний, а расстояние между ними зависело только от частоты звука и возрастало при ее увеличении. Авторы отмечают, что весь эффект получился довольно ярким, и его легко было спроектировать на экран.

В теории эффекта, изложению которой посвящена вторая часть работы, принято во внимание то важное (и необходимое для объяснения данного эксперимента) обстоятельство, что размеры освещенного объема жидкости конечны. Это в свою очередь приводит к тому, что угол брэгговского отражения света от пространственной дифракционной решетки, образованной

³ Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М.: Наука, 1981, с. 366.

звуком, четко не определен и рассеяние происходит в довольно значительном интервале углов. Именно это и наблюдалось на опыте.

Идеи, высказанные в данной работе, оказали значительное влияние на дальнейшее развитие науки. Акустооптика — раздел физики конденсированного состояния, изучающий взаимодействие света со звуковыми волнами — интенсивно развивается и в настоящее время. Число работ на эту тему, и теоретических, и экспериментальных, весьма велико.

В 1935 г. Дебай переехал в Берлин, где он занял пост директора Физического института; по настоянию Дебая институту было присвоено имя Макса Планка. Ранее институт возглавляли А. Эйнштейн и М. фон Лауз; при этом он оставался только институтом теоретической физики. Теперь же там имелись и лаборатории для экспериментальных исследований. Одновременно Дебай получил должность профессора физики Берлинского университета.

Основные области научных интересов Дебая в это время относились к темам, которые интересовали его и раньше: это диэлектрические свойства и квазикристаллическая структура жидкостей, парамагнитная релаксация, достижение низких температур с помощью адиабатического размагничивания. Он также теоретически исследовал явление термодиффузии как метод разделения изотопов.

В своей работе на посту директора Дебаю приходилось сталкиваться с целым рядом трудностей, связанных с тем, что ему теперь нужно было работать и руководить институтом в условиях фашистского государства. С началом в 1939 г. второй мировой войны Дебай столкнулся с ситуацией, которую считал для себя и для института совершенно неприемлемой. Власти решили поручить институту исследовать возможность строительства уранового реактора. Это исследование планировалось проводить в условиях секретности, в частности, его держали в секрете и от самого Дебая. Вот как сам Дебай описывает последующие события: «Когда я принял приглашение занять должность в Берлине, я все еще оставался голландским гражданином. Согласно законам Голландии, голландский гражданин может занять государственный пост в другой стране, не потеряв при этом своего гражданства, только с разрешения королевы. Я обратился за разрешением, и оно было получено.

В это же самое время германское правительство согласилось в письме, подписанном министром просвещения Рустом, с тем, что, принимая предложенные мне посты, я не становлюсь германским подданным, и меня не будут просить переменить подданство на германское. Предложенные посты, как обычно, являлись пожизненными. Пока наша лаборатория еще строилась, я получил приглашение от Гарвардского университета. Это приглашение я отклонил, поскольку не чувствовал себя вправе уйти до окончания начатой мной работы... Началась война, и однажды, безо всякого предупреждения, д-р Тельшов из Института кайзера Вильгельма сообщил мне, что я более не смогу посещать лабораторию, если не приму германского подданства. Я отказался. Тогда министр просвещения рекомендовал мне оставаться дома и заняться писанием книги. Вместо этого я, несмотря на препятствия, чинимые различными германскими властями,

сумел уехать в США через Италию, чтобы прочесть бейкеровский курс лекций по приглашению Корнеллского университета».⁴

Покинув Берлин в январе 1940 г., Дебай был вынужден оставить свой дом и все свое имущество. Его сын уехал в США еще раньше. Но его жена смогла присоединиться к нему лишь некоторое время спустя.

В 1936 г. Дебай получил Нобелевскую премию «за вклад в изучение молекулярной структуры посредством исследования дипольных моментов и дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах». Нобелевская премия была присуждена ему по химии, хотя всю жизнь Дебай был профессором физики. Сам же он, судя по его высказываниям, считал себя и физиком, и химиком; многие его работы послужили установлению связи между этими двумя областями человеческого знания.

В 1940 г. Дебай, как уже говорилось, принял приглашение прочесть курс лекций на химическом факультете Корнеллского университета. Одновременно он стал деканом химического факультета этого университета, с которым отныне и до самой смерти (в 1966 г.) были связаны его жизнь и работа. В 1952 г. он официально ушел в отставку, однако и после этого продолжал активно работать и публиковать научные статьи.

С началом войны США оказались отрезанными от источников такого важного сырья, как каучук. В стране началась интенсивная работа по созданию его заменителей. Дебай принял участие в этой работе. Соответственно физика полимеров стала основным объектом его научных интересов. Для физики полимеров очень важно знать распределение молекул полимера по молекулярным весам (или по крайней мере средний молекулярный вес молекул), а также их форму в растворе. Для изучения этих свойств Дебай развел мощный метод, основанный на измерении рассеяния света раствором полимера. Вопрос, который интересовал Дебая, — это как по увеличению интенсивности рассеяния света раствором (по сравнению с чистым растворителем) можно подсчитать число растворенных частиц, а по наблюдению углового распределения рассеянного света сделать заключение об их форме. При этом угловая асимметрия рассеяния, позволяющая составить суждение о форме частиц, проявляется, когда какой-нибудь размер частицы становится сравнимым с длиной световой волны.

Теоретическому анализу этих вопросов и экспериментальному исследованию различных растворов, содержащих макромолекулы, Дебай посвятил около 20 работ. Это заняло около 20 лет — с 1944 по 1964 г.

Можно, таким образом, сказать, что основной темой исследования Дебая во время работы в Корнеллском университете было изучение рассеяния света разупорядоченными (аморфными) веществами как средство определения размеров и формы рассеивающих центров. Одна из последних его крупных работ, выполненная в 1959 г., была посвящена вопросу, который продолжает оставаться чрезвычайно актуальным вплоть до наших дней, а именно изучению критических явлений. В упомянутой работе эти явления изучались вблизи критической точки смешения рас-

⁴ The collected papers of Peter J. W. Debye. New York; London: Interscience Publ., 1954, p. XIII.

твора двух жидкостей. Исследовался теоретически и экспериментально сдвиг критической точки под действием приложенного электрического поля. Средством изучения этого явления служило измерение интенсивности и угловой асимметрии рассеяния света. По ним можно было судить о величине флуктуаций концентрации, возрастающих при приближении к критической точке, и об их характерных пространственных размерах.

После официальной отставки с поста руководителя химического факультета Дебай продолжал читать лекции и давать научные консультации в различных городах США и, как правило, дважды в год совершал поездки в Европу. И только в 1965 г., в возрасте 81 года, он должен был по настоянию врачей отказаться от очередной такой поездки.

Умер Дебай в следующем, 1966 году. До последних своих дней он продолжал работать и интересоваться делами своей лаборатории.

Уже на сравнительно ранней стадии научная деятельность Дебая получила широкое официальное признание в различных странах мира. Он был награжден медалью Румфорда Лондонским королевским обществом (1930 г.), медалью Лоренца — Королевской Голландской академией (1935 г.), Нобелевской премией по химии (1936 г.), медалью Франклина — Франклиновским институтом (1937 г.), медалью Вилларда Гиббса — Американским химическим обществом (1949 г.), медалью Макса Планка — Западно-Германским физическим обществом (1950 г.), медалью Никольса — Американским физическим обществом, Нью-Йорк (1963 г.). Он был почетным доктором Льежского, Брюссельского, Цюрихского, Оксфордского, Софийского, Пражского университетов, Университета Гарварда, Бруклинского политехнического и Кларксоновского технологического институтов и многих других университетов и институтов.

Среди всех почестей была одна, которую, как утверждали люди, хорошо знаявшие Дебая, он особенно ценил. Жители его родного города Маастрихта в знак признания его заслуг воздвигли его бюст в городском зале для торжественных собраний.

Его избрали своим членом следующие научные учреждения: Американская академия (Бостон), Франклиновский институт (Филадельфия), Национальная академия наук США (Вашингтон), Нью-Йоркская академия, Королевская Голландская академия (Амстердам), Королевское общество (Лондон), Королевский институт Великобритании (Лондон), Королевская Датская академия (Копенгаген), Академия Брюсселя и Льежа (Бельгия), Королевская Ирландская академия (Дублин), Индийская академия (Бангалор) и ряд других. С 1924 г. Дебай состоял иностранным членом Академии наук СССР.

Само имя Дебая в буквальном смысле слова также вошло в науку. В научной литературе постоянно сталкиваешься с такими понятиями, как дебаевский радиус, дебаевская температура, дебаевские потери, дебаеграммы, фактор Дебая — Уоллера. Именем Дебая названа атомная единица дипольного момента. Все это — дань уважения памяти человека, чьи великие идеи принадлежат золотому фонду науки.

В. Л. Гуревич, И. Е. Дзялошинский