

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ПОПУЛЯРНЫЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ  
КЛАССИКОВ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Я. И. ФРЕНКЕЛЬ

*НА ЗАРЕ*  
**НОВОЙ**  
*ФИЗИКИ*

СБОРНИК ИЗБРАННЫХ  
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ РАБОТ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Ленинград · 1970

**Френкель Я. И. На заре новой физики.** Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л., 1969, стр. 1—384.

В книге собраны научно-популярные произведения выдающегося советского физика-теоретика Я. И. Френкеля (1894—1952), плодотворно работавшего в таких областях, как квантовая механика, физика твердого тела, физика атомного ядра и т. д. Эти научно-популярные статьи не вошли в академическое собрание сочинений ученого и, рассеянные по старым журналам и сборникам, а отчасти и неопубликованные, стали недоступными современному читателю. Написанные ярко и доходчиво, на высоком научном уровне, они представляют особый интерес, так как были написаны в период становления новой физики человеком, который внес в нее существенный вклад. Книга адресована широкому кругу читателей, интересующихся историей физики и ее проблемами.

Илл. 24, библиогр. назв. 66.

Ответственный редактор

академик Б. П. КОНСТАНТИНОВ

## *Предисловие редактора*

Выход сборника научно-популярных работ Якова Ильича Френкеля приурочен к исполнившемуся в 1969 г. 75-летию со дня его рождения. Яков Ильич Френкель сыграл очень большую роль в развитии физики нашего века — теории металлов, атомного ядра и особенно молекулярной теории жидкостей. В Физико-техническом институте Академии наук СССР Яков Ильич беспрерывно руководил теоретическим отделом и был инициатором и доброжелательным критиком очень многих теоретических и экспериментальных работ института. Своей воспитательской и педагогической деятельностью Яков Ильич внес огромный вклад в создание отечественных кадров физиков; эта сторона его деятельности имела особенное значение для физико-механического факультета Ленинградского политехнического института и Физико-технического института.

В моей личной научной жизни Яков Ильич был добрым гением. Я неоднократно получал его неоценимые для меня советы, он был оппонентом по двум моим защитам — кандидатской и докторской диссертаций. В общении Яков Ильич был всегда жизнерадостен, энергичен, неизменно отзывчив и доброжелателен. Меня поражала широта интересов Якова Ильича, глубина его пытливой творческой мысли, а также его необыкновенная способность быстро работать и оформлять результаты своих исследований в виде статей и книг. Незадолго до безвременной кончины Якова Ильича зимой

1952 г. часов в 12 дня я встретил его перед зданием Физико-технического института и выразил восхищение его веселым и бодрым видом, что было мне особенно приятно отметить, так как Яков Ильич сравнительно долго (в октябре—ноябре 1951 г.) отсутствовал в институте из-за болезни. Яков Ильич ответил мне, что тому есть причина — сегодня с утра он написал две научные статьи.

Когда в середине 40-х годов Абрам Федорович Иоффе поручил мне составление от имени Физико-технического института проекта представления Якова Ильича к Государственной премии (в 1947 г. Я. И. Френкель был удостоен Государственной премии 1-й степени за свои работы по кинетической теории жидкостей), я был поставлен, можно сказать, в затруднительное положение. Ведь перу Якова Ильича принадлежат сотни оригинальных статей по всем областям физики — и не только физики! и десятки учебников и монографий! Я попросил Якова Ильича помочь мне и рассказать, что он считает главным в своем научном творчестве. Яков Ильич с величайшей скромностью рассказал о своих оригинальных работах. Что же касается книг, написанных Яковым Ильичем и занимающих целые полки в библиотеке нашего института, он предоставил мне «разделяться» с ними самому!

Припоминаю и такой эпизод: однажды я спросил у Якова Ильича, как он успевает так быстро писать свои книги? Он ответил шуткой: «Сказать по секрету? Я никогда не перечитываю написанного!». У Якова Ильича, действительно, было очень легкое перо, что блестяще сочеталось с его выдающимися физическими способностями.

Публикуемые ниже статьи Якова Ильича, часть которых ранее не издавалась, а другие мало знакомы современному читателю, возвращают нас к истокам возникновения современных физических теорий — квантовой механики и теории относительности, и их приложения к конкретным физическим проблемам (теория жидкостей, теория металлов). Ознакомление с ними представляет тем больший интерес, что их автор сам сделал очень много для развития этих областей физики.

Академик

*Б. П. Константинов*

*В. Я. ФРЕНКЕЛЬ*

### **К БИОГРАФИИ Я. И. ФРЕНКЕЛЯ**

**В** приводимых ниже заметках автор не ставит перед собой задачи дать развернутую биографию Якова Ильича Френкеля. В рамках вступительной статьи к сборнику его работ представляется более целесообразным остановиться лишь на некоторых сторонах его жизни и научного творчества. К тому же в 1966 г. в серии «Научные биографии», выпускаемой Академией наук СССР, об Я. И. Френкеле была издана отдельная книга [1]. Здесь приводится в основном новый материал, не вошедший в указанную книгу и относящийся к началу его научной деятельности, к работам по физике атомного ядра. Специальное внимание уделено особенностям научного стиля Френкеля.

#### **ЮНЫЕ ГОДЫ. НАЧАЛО ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОЙ И НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

По воспоминаниям Якова Ильича Френкеля, на формирование его личности исключительно большое влияние оказал его отец, Илья Абрамович Френкель. В молодости И. А. Френкель принимал участие в народовольческом движении; это повлекло за собою арест и ссылку в Сибирь на поселение в г. Березов. Вернувшись из 7-летней ссылки, И. А. Френкель отошел от активной революционной деятельности, но сохранил свои симпатии идеям революции и оказывал многочисленные и важные услуги подпольщикам (в частности, будущему Наркому внешней торговли А. М. Лежаве, а также видному

теоретика партии М. С. Ольминскому). И. А. Френкелю так и не удалось получить высшего образования; его университетом была сибирская ссылка, где он познакомился с интеллигентнейшими людьми того времени, направлявшими его интересы на самообразование.

Тем большее внимание уделял он впоследствии воспитанию своих детей. Они с детства изучали иностранные языки и занимались музыкой. Родители всячески поощряли их увлечения, например Яков Ильич занимался рисованием. Точными науками, как и живописью, он заинтересовался безвсякого внешнего влияния, в результате знакомства с гимназическим курсом математики и физики. Началось это увлечение в петербургской гимназии К. Мая — одной из лучших в городе, в которой математику преподавал Н. М. Гюнтер. В 1905 г., т. е. за 4 года до поступления молодого Френкеля в 5-й класс этой гимназии, там проходили занятия математического университета, организованного по инициативе Гюнтера в связи с закрытием из-за студенческих волнений Петербургского университета. К чтению лекций Н. М. Гюнтер привлек А. А. Маркова, А. Н. Крылова и других выдающихся петербургских математиков.

Может быть, именно эта «математическая атмосфера» гимназии К. Мая способствовала тому, что вначале интересы Я. Френкеля склонялись в сторону математики, в частности к занятиям «экспериментальной математикой», к тому, что немецкий математик Феликс Клейн в своей биографии Гаусса называл «Numerawachte», т. е. наблюдением над числами. Этими «экспериментальными работами» Френкель-гимназист занимался, например, на уроке словесности, что подтверждают записи, сохранившиеся в его тетради по этому предмету. В бумагах известного ленинградского физика Ю. А. Круткова [2] имеется еще одно подтверждение этого увлечения Я. Френкеля: в одной из его тетрадей воспроизведена методика заполнения числами так называемых магических квадратов\* и сделана пометка: «сообщил мне Я. И. Френкель».

\* В магических квадратах сумма чисел, расставленных в соответствующие клетки, одна и та же по всем горизонталям, вертикалям и диагоналям.

Другое, куда более весомое свидетельство юношеского увлечения Я. Френкеля математикой — его сочинение на тему о прогрессивном исчислении — внушительная тетрадь, насчитывающая 150 страниц текста. С ее содержанием молодой гимназист ознакомил доцента Я. В. Успенского, одного из учеников А. А. Маркова, и со смешанным чувством досады и удовлетворения узнал от него, что разработал основы исчисления конечных разностей, которые были заложены в работах великих математиков XVII в. — Ферма, Лейбница и Ньютона. Здесь следует заметить, что ни в те времена, ни сейчас это исчисление не излагается в курсах анализа бесконечно малых.

Еще в гимназические годы Яков Ильич изучил наиболее в то время известные курсы русского математика А. К. Поссе и голландского физика Г. А. Лоренца (вышедшие в издании библиотеки самообразования), а также общие и специальные курсы физики Г. Лоренца, М. Абрагама и А. Феппля. Разумеется, он занимался и по общему курсу физики О. Д. Хвольсона, бывшего, по словам С. И. Вавилова, «несравненным летописцем физики», курсу, который молодой, но уже пользовавшийся всемирной известностью Эйнштейн в 1909 г. аттестовал как «превосходный» [3, стр. 181]. Наряду с этим Я. Френкель проработал все выпуски издававшихся в те годы «Новых идей в физике», по которым ознакомился с работами выдающихся физиков начала века — Планка, Эйнштейна, Минковского, Перрена, Резерфорда и др.

Все это Яков Ильич делал по своей инициативе, поощряемый Федором Федоровичем Индриксоним, который не только преподавал физику в гимназии К. Мая, но был лекционным демонстратором университета и автором ряда популярных книг по физике. Самостоятельно работал Френкель и над своим трактатом по атмосферному электричеству. Эту работу молодого человека прочли А. Ф. Иоффе и Н. А. Булгаков (третий, кроме Боргмана и Хвольсона, профессор физики Петербургского университета), высоко оценившие способности Френкеля.

Упомянутому триумvirату петербургских профессоров физики не удалось создать в Петербурге физическую школу. В начале века такая школа существовала в Мо-

ске и возглавлялась Петром Николаевичем Лебедевым, скончавшимся 46 лет в 1912 г. Отсутствием школы и определялся, как отмечал Я. И. Френкель, тот факт, что, по существу, в физике он был самоучкой. Конечно, понимание ее основ он почерпнул из учебников, но он не получил навыков самостоятельной работы по теоретической физике. Надо сказать, что теоретическая физика в то время еще не была выделена в самостоятельную дисциплину, поэтому, естественно, и теоретиков к тому времени было мало как во всем мире, так и в России в частности.

Можно сказать, что Френкель немного «опоздал родиться»: случись так, что он поступил бы в Петербургский университет не в 1913 г., как это имело место, а 5 годами раньше, он смог бы присоединиться к группе молодых студентов университета, группировавшихся вокруг венского теоретика Пауля Эренфеста, ученика Людвигу Больцмана. Женившись на Т. А. Афанасьевой — русском математике — Павел Сигизмундович Эренфест (как называли его в России) прожил в Петербурге пять лет, вплоть до 1912 года. За этот период он организовал семинар по новой физике с уклоном в теоретическую физику и математику. В работе этого семинара, сыгравшего большую роль в развитии физики в России, принимали участие молодые физики и математики: А. Ф. Иоффе, Д. С. Рождественский, К. К. Баумгарт, Л. Д. Исаков, Ю. А. Крутков, В. Р. Бурсиан, Г. Г. Вейхарт, В. М. Чулановский, Я. Д. Тамаркин, А. А. Фридман и др. Но в 1912 г. Эренфест принял предложение заменить Лоренца на его кафедре теоретической физики в Лейдене (Голландия) и уехал из России.

Яков Ильич Френкель жил в эпоху, сделавшую его современником двух революций — социальной революции, преобразовавшей его Родину, и революции научной, потрясшей основы физики — науки, с которой он связал свою жизнь. Но Яков Ильич был не только современником этих революций, но и их участником. Его научное наследие — свидетельство существенного вклада, внесенного им в создание современной физики. Менее известно, что он принимал участие и в Октябрьской революции. Находясь в 1918 г. в Крыму, Яков Ильич, будучи заместителем Наркома просвещения Крыма и ведая высшим и техническим образованием, возглавил работу по реформе Таврического университета, сотрудничал в боль-



шеви́стской газете «Красный Крым», являясь членом ее редакционной коллегии. Эта деятельность во время захвата Крыма денки́нцами повлекла за собой арест и отстранение от преподавательской работы [1, 4, стр. 8].

Интересен один эпизод, относящийся ко времени окончательного восстановления Советской власти в Крыму (ноябрь 1920 г.) и рассказанный автору академиком П. Л. Капицей. Я. И. Френкель сразу же вернулся к исполнению своих обязанностей в Крымском Наркомпросе, по-прежнему ведая вопросами высшей школы, а также занимаясь приемом опоздавших студентов, выдачей охранных грамот, пропусков и т. п. Ему стало известно, что в Я. те, где в то время жили его родители, находится престарелый Дмитрий Константинович Чернов — знаменитый русский металлург, работы которого, в частности, сыграли большую роль в развитии отечественной артиллерии. Д. К. Чернов, будучи профессором Михайловской артиллерийской академии в Петербурге, имел чин тайного советника, а в тот беспокойный период жить тайному советнику в Крыму было делом небезопасным. Чернов был болен и истощен; к тому времени ему исполнилось 82 года. Яков Ильич сообщил об его бедственном положении в Москву, распорядился выставить у дома Чернова специальную охрану, обеспечил его продовольственным пайком, по словам П. Л. Капицы, буквально спас ему жизнь. Увы, ненадолго! В январе 1921 г. Чернов умер от крупозного воспаления легких и был похоронен в Ялте.

Очень короткая встреча Я. И. Френкеля с Д. К. Черновым могла бы стать материалом для целого рассказа, развертывающегося на фоне революционного Крыма. Чернов был не только выдающимся металлургом, но и искусным скрипичным мастером. Известно, что ему удалось переделывать обычные скрипки и доводить их до такой степени совершенства, что позднее эксперты не всегда отличали их по звучанию от экземпляров, созданных самим Страдивари. А Яков Ильич с детских лет играл на скрипке, играл не виртуозно, но проникновенно; он страстно любил скрипичные пьесы и переложения для скрипки симфонической и фортепианной музыки. 13 лет спустя после описанных событий ему довелось играть на черновской скрипке в одном из домов отдыха, куда приехал сын Чернова — скрипач, игравший на инстру-

менте «отцовского производства». Вместе с Яковом Ильичем он музицировал потом в Ленинградском Доме ученых им. А. М. Горького.

Обращаясь к чисто научной деятельности Френкеля в Крыму, следует сказать, что, хотя в Таврическом университете и собрались очень значительные силы (математики: Н. М. Крылов, В. И. Смирнов, М. Л. Франк, Н. И. Кошляков, Л. А. Вишнеvский; биологи: А. Г. Гурвич и Н. И. Кузнецов; химик В. И. Вернадский, металлург А. А. Байков; историк Б. Д. Греков и литературовед Н. К. Гудзий), физика в нем была представлена только двумя лицами: проф. Л. И. Кордышем и Яковом Ильичем, имя которого в то время не было широко известно. Несколько позднее на той же кафедре недолго работал также начинавший свою научную деятельность И. Е. Тамм.

Таким образом, Я. И. Френкель оказался в Крыму в обстановке фактической научной изоляции, поддерживая научные контакты только с упомянутыми математиками и биологами А. Г. Гурвичем и А. А. Любищевым. Интересно отметить, что, когда в 1918 г. в Крыму ненадолго воцарились немцы (армия генерала Коша), университет начал получать свежие немецкие физические журналы, в которых публиковались новейшие достижения квантовой теории: работы Эйнштейна, Зоммерфельда, Лауэ, Эренфеста и других выдающихся физиков. В Крыму Якову Ильичу только в 20-м году удалось «сколотить» физический семинар, в работе которого принимало участие несколько молодых ассистентов и студентов старших курсов. Но основным, если не единственным, докладчиком на семинаре был Я. И. Френкель, занимавшийся в основном просветительской деятельностью, читая своим слушателям специальные курсы теоретической физики. Вспоминая об этом времени, охватывавшем примерно три года, Яков Ильич считал его в научном отношении бесплодным. В актив он мог поставить лишь тот факт, что за эти годы овладел лекторским искусством.

Я. И. Френкель понимал, что с наибольшим успехом сможет работать только в Петрограде, где физика начала бурно развиваться и где работали молодые коллеги Якова Ильича — П. Л. Капица, П. И. Лукирский, Н. Н. Семенов, Я. Г. Дорфман, с 1916 г. группировавшиеся вокруг А. Ф. Иоффе, который в этом же году

организовал при Политехническом институте семинар по новой физике. За время отсутствия Якова Ильича в Петрограде были организованы два новых научных учреждения: Государственный рентгеновский и радиологический институт (А. Ф. Иоффе, М. И. Неменов) и Государственный оптический институт (Д. С. Рождественский). К своему удовлетворению Яков Ильич узнал, что был заочно избран в число действительных членов первого из упомянутых институтов. В начале 1921 г. Френкель покинул Крым и после непродолжительной остановки в Москве в конце зимы 1921 г. вернулся в Петроград.

Здесь, в Рентгеновском институте (впоследствии преобразованном, точнее, переименованном в Физико-технический институт и носящем ныне имя Абрама Федоровича Иоффе), он встретил всех участников семинара Иоффе, а также своих коллег — физиков-теоретиков Ю. А. Круткова и В. Р. Бурсиана; здесь и началась интенсивная научная деятельность Якова Ильича, которая привела к тому, что выполненные им в течение 3—4 лет работы принесли ему широкую известность среди физиков не только Советского Союза, но и далеко за его пределами.

Уже в самом начале 20-х годов Френкель организовал в институте работу семинара по теоретической физике. Раз в неделю этот семинар собирал немногочисленных теоретиков института и города, а также и экспериментаторов преимущественно из числа молодежи. По рассказам участников этого семинара, функционировавшего под руководством Якова Ильича почти три десятилетия, он следил за неукоснительным выполнением докладчиками основных требований: ясности изложения и необходимости выделения идейного содержания работы. Лишь в редких случаях на семинар выносились чисто математические, вычислительные стороны обсуждавшегося вопроса. Если интересная с физической точки зрения статья была перегружена «строительными лесами математических формул», Френкель стремился сам и требовал от докладчика найти адекватный и простой аппарат, с помощью которого легко получались бы те же результаты. Эта особенность семинара и привлекала к нему физиков-экспериментаторов, многие из которых (Г. Х. Горовиц, Н. Н. Миролюбов, Б. Я. Пинес), стимулируемые Френкелем, пробовали свои силы в теоретической физике, оставаясь, впрочем, вер-

ными физике экспериментальной. На семинарах Френкеля царил непринужденная обстановка. Я. И. Френкель был очень демократичен, ему была чужда, претила роль «мэтра», «рядящегося в тогу непогрешимости», как образно выразился А. И. Ансельм [5]. Участники семинара конца 20-х годов шутя называли Якова Ильича «отцом-наставником», а себя — «семинаристами»: так гласит надпись на оттиске статьи Л. Д. Ландау и Д. Д. Иваненко, преподнесенной ему авторами. Своими правами руководителя Я. И. Френкель пользовался лишь в тех случаях, когда докладчик был плохо подготовлен или, что было крайне редко, недостаточно понимал излагаемый материал. Такой докладчик с позором изгонялся с трибуны. Чтобы не срывать семинар, на его место вставал Яков Ильич, у которого в запасе всегда было несколько своих сообщений или интересные сведения, почерпнутые из свежих физических журналов.

С годами семинар Френкеля разрастался, увеличивалось число его участников. Широкий спектр разбиравшихся вопросов контрастировал с начинавшейся в 20-х—30-х годах специализацией. Большинство читавшихся на семинаре докладов уже не носило реферативный характер. Это были оригинальные работы, представленные теоретиками Ленинграда, Москвы и других городов на суд участников семинара. В 30-е годы особенно часто приезжал из Москвы Игорь Евгеньевич Тамм, с которым Якова Ильича связывали узы теснейшей дружбы. В течение долгих лет И. Е. Тамм работал в теоретическом отделе Физико-технического института в качестве консультанта. Всякий теоретик, оказывавшийся в Ленинграде, бывал на семинаре у Френкеля, поэтому список его участников получился бы очень длинным. То же можно сказать и об иностранных физиках, бывавших гостями Ленинграда: на «физтеховском» семинаре выступали Эренфест, Борн, Бриллюен, Паули, Дирак, Пайерлс, Фрелих, Лондон и многие другие видные иностранные ученые.

#### ТВОРЧЕСКАЯ МАНЕРА Я. И. ФРЕНКЕЛЯ

И. Е. Тамм в биографии Я. И. Френкеля [6] подчеркивает, что, по классификации В. Оствальда, он принадлежал к числу ученых-романтиков. Для них, в отличие

от ученых-классиков, характерен широкий круг активных научных интересов, быстрота реакции. Ученые-романтики, подобно камертону, немедленно откликаются на новый экспериментальный факт, новую теорию, сразу же приступая к ее дальнейшему развитию, приводящему подчас к построению новых теорий и предсказанию новых экспериментальных эффектов. Этот романтизм в науке, конечно, не связан с теми незабываемыми и романтическими годами, в обстановке которых проходила научная молодость Я. И. Френкеля. Но вместе с тем нельзя не отметить и удивительное соответствие между ними. Революция в России по времени совпала с необыкновенной порой, которую переживала сама физика, с теми основными этапами революции в физике, которые были подготовлены многими годами предшествовавшего эволюционного развития этой науки. В 1900 г. возникла гипотеза квантов энергии Планка; в 1905 г. — специальная теория относительности Эйнштейна и его же квантовая теория света, более радикальная, чем первоначальная теория Планка, и сразу же нашедшая себе целый ряд экспериментальных доказательств за пределами явлений теплового излучения. 1913 год принес квантовую теорию атома Бора. В ногу с революционными работами теоретиков, а часто и значительно опережая их, шли потрясавшие сознание современников и экспериментальные открытия: рентгеновские лучи, радиоактивность, беспроволочное телеграфирование, работы Резерфорда по ядерной физике. Этот каскад открытий часто бывало трудно понять и принять.

Об этом времени хорошо сказал О. Д. Хвольсон [7]: «Физика стала немного напоминать ту часть медицины, которая иногда успешно вылечивает больных лекарствами, для которых существуют готовые рецепты, но действие которых на организм непонятно. Так, мы в физике имеем чудодейственный рецепт квантования (Бора, — В. Ф.). Эти рецепты непонятны, но они бесконечно полезны».

Как уже говорилось, в 1916 г. при Петроградском политехническом институте А. Ф. Иоффе организовал семинар по новой физике. Его участник Я. Г. Дорфман позднее вспоминал удивительную эрудицию Я. И. Френкеля, к тому времени окончившего Петроградский университет и оставленного там по рекомендации Хвольсона и Булга-

кова для подготовки к профессорской деятельности (аналог теперешней аспирантуры).

Одна из первых печатных работ Я. И. Френкеля была посвящена обзору учения о строении атомов в свете радиоактивных излучений. Его учебник, ныне профессор теоретической физики А. Г. Самойлович, начавший работать в 20-е годы, считает, что обзор, вышедший в пяти выпусках Журнала русского физико-химического Общества (ЖРФХО) в 1917—1919 гг. [8], был наиболее обстоятельным и фундаментальным; по нему знакомились с предметом в начале 20-х годов. Позднее этот обзор послужил основой для ряда глав книги Я. И. Френкеля «Строение материи» [9]. Другая статья Я. И. Френкеля вышла практически одновременно в ЖРФХО и наиболее авторитетном в те годы английском физическом журнале «Philosophical Magazine» [10], в котором публиковались революционные работы Резерфорда и Бора. Она была посвящена природе контактной разности потенциалов и решала эту проблему в соответствии с борвской теорией атома.

Уже по первым статьям Я. И. Френкеля можно судить о стиле его работ, в полной мере раскрывшемся в последующие годы. Прежде всего, это скупость математических средств, привлекаемых им при оформлении теоретических идей. Здесь уместно заметить, что интерес к чистой математике сохранился у Я. И. Френкеля на всю жизнь, в то время как его собственные работы, за редкими исключениями, в математическом отношении были очень простыми. Отношение Френкеля к роли математики в физических исследованиях и ранее иллюстрировалось его высказываниями [1, стр. 436, 437]; добавим к ним еще одно, прежде не публиковавшееся [11]: «В тех случаях, когда физическая сущность вопроса не ясна, не следует искать у математики путеводной нити для ее выяснения. Мне кажется, что гораздо более полезной представляется работа, способствующая выяснению сущности дела, факторов, имеющих значение для правильного понимания интересующего нас физического явления, или, наоборот, несущественных для него, — одним словом, качественный анализ физической задачи, чем попытки ее количественного решения при явной недостаточности наших сведений о сущности изучаемых явлений».

Один из довоенных учеников Я. И. Френкеля по фи-

зико-механическому факультету Ленинградского политехнического института В. Я. Савельев (ныне профессор) писал ему из Нижнего Тагила [12]: «Очень жаль, что я не имею возможности пользоваться Вашими советами и указаниями. В моем распоряжении, к счастью, сохранились еще остатки той „хватки“, которую я получил во время работы под Вашим руководством. Я всегда с благодарностью вспоминаю, как Вы учили нас „расправляться“ с уравнениями, выбрасывать лишнее, сохраняя основной физический смысл и, таким образом, доводить работу до конца».

В статье «Теоретическая физика в СССР за 30 лет» (см. наст. сб., стр. 308) Яков Ильич, нарочито гиперболизируя свою мысль, говорит о том, что хороший физик-теоретик должен быть в какой-то мере подобен художнику-карикатуристу, что в разрабатываемой им теории он должен уметь подмечать наиболее существенные черты и отбрасывать второстепенные. Думается, однако, что глубоко прав был проф. Я. А. Смородинский, считая, что творчество Френкеля, если уж следовать примеру Якова Ильича и проводить параллели с художественными стилями, в наибольшей степени напоминает манеру импрессионистов. Прежде всего, на первый и не искушенный взгляд, многие из теоретических идей Якова Ильича были как бы набросаны слишком широкими мазками. Чтобы почувствовать стройность общей идеи, от читателя требовалась подготовка и воображение. А дальше, подобно тому, как, отступив от картины на несколько шагов, мы становимся свидетелями чудесного превращения кажущегося хаоса красок в гармоническое целое, так и многие из идей Френкеля по прошествии какого-то времени получили заслуженное признание и были должным образом оценены. Так бывает всегда с теориями и идеями, опережающими свое время.

Что касается языка научных статей, той формы, в которой их авторы излагают материал, то уже с давних пор они, как правило, подчеркнута безлики. В наши дни нужно быть очень хорошим специалистом в той или иной узкой области знаний, чтобы по статье распознать автора. Если это и удастся сделать, то не по стилю, а, скорее, по тем вопросам, которые его интересуют. М. П. Бронштейн [13, стр. 6] проводит яркую параллель, считая, что развитие науки можно уподобить увлекатель-

ному детективному роману, ученых же — искусным сыщикам и следователям, вооруженным по последнему слову техники и отыскивающим невидимых и трудно уловимых «микроскопических» виновников тех или иных макроскопических процессов, детективному роману, которому нет конца и который увлекает своим сюжетом. Подобно тому, как острый сюжет «позволяет» некоторым писателям забывать о языке, на котором изложен ход «расследования», так и в науке ученые часто не обращают, к сожалению, должного внимания на язык своих научных статей.

Статьи же Якова Ильича окрашены его индивидуальностью, узнать их не представляет труда. Для него характерен свободный, образный стиль изложения, использование научной метафоры, неожиданного сравнения — все это, конечно, в сочетании с врожденным чувством меры. Поэтому чтение многих его работ и монографий доставляет, если можно так выразиться, научно-эстетическое удовольствие. Образные выражения Френкеля сохраняются в памяти читателей и часто повторяются другими авторами. Желая, например, подчеркнуть, что облака являются динамическими образованиями, в которых идет непрерывный процесс «обновления», Яков Ильич сравнивает их с колеблющимся пламенем свечи.

Анализируя научное наследие Френкеля, А. Ф. Иоффе писал [14, стр. 17]: «Каждая из работ Якова Ильича — это уголок той картины, которую он видел перед собою, как физик и как художник». И немного погодя продолжал: «Зачем Я. И. Френкель иногда публиковал свои исследования также и в тех случаях, когда ему не удалось найти полного и стройного решения задачи? Думается, что здесь сказывался в Якове Ильиче учитель, руководитель школы. Он передавал подмеченные им связи, раскрывал новый уголок физической картины. Яков Ильич как бы говорил: вот мысль, в которой есть здоровое ядро. Постарайтесь его развить — это благодарная тема для теоретика. Такие работы Якова Ильича будили мысль прямых и косвенных его учеников и направляли ее на проникновение в механизм физических процессов».

Публикация идей, не доведенных до завершения, в сочетании с широким спектром вопросов, которыми занимался Яков Ильич, дали основание Петру Леонидовичу



Капице как-то в шутку ему заметить: «Ты был бы гениален, если б публиковал в 10 раз меньше».

Я. И. Френкель, как видим, часто публиковал своеобразные эскизы, первое приближение к будущей картине. Иногда следующий этап исследования также принадлежал ему. Так было, например, с целой серией работ по теории плавления, по теории явлений атмосферного электричества, по феноменологическим теориям сверхпроводимости. В некоторых случаях эту работу заканчивали другие ученые. Об этом пишет И. Е. Тамм [6, стр. 398]: «Он давал главное — давал новые идеи, создавал новые концепции. Эти идеи и концепции подхватывались другими учеными, которые детально их разрабатывали, подвергали тщательному математическому анализу и в результате доказывали их справедливость (а иногда и опровергали их). Имена этих ученых известны всем специалистам в соответствующей области науки, решающая же роль идей Якова Ильича, хотя его имя и упоминается в работах „основоположников“ этих областей, слишком часто оставалась в тени».

Вероятно, многим запомнились слова Нильса Бора, сказанные им в 1961 г. в Москве. Когда его спросили, чем определяется, по его мнению, успех копенгагенской школы, Бор ответил, что он и его ближайшие сотрудники никогда не боятся показаться глупыми своим молодым ученикам. Этот страх был чужд и Якову Ильичу — шла ли речь о более молодых или более старших коллегах. На конференции по физике атомного ядра в дискуссии по докладу Д. В. Скобельцына было, например, такое выступление Я. И. Френкеля [15]: «Так как никто не предложил никаких объяснений аномалиям, которые наблюдались Д. В. Скобельцыным, я рискну предложить одно объяснение, которое может быть и неверным, но представляет собой некоторую зацепку. . .». Предложить «зацепку» и с ее помощью приблизиться к истине или увидеть все же проблеск этой истины, если такая зацепка даже будет последовательно раскритикована, — так Яков Ильич понимал свою задачу.

Вернемся к выдержке из статьи А. Ф. Иоффе и несколько подробнее остановимся на проблеме школ в физике, в частности теоретической. Говоря о самом Абраме Федоровиче, один из видных советских физиков, член-корреспондент АН СССР А. И. Шальников, относящий

себя к числу учеников Иоффе, как-то заметил [16, стр. 535]: «По существу, ученики Иоффе — это все и... никто». Действительно, ведь непосредственно в его лаборатории в Физико-техническом институте трудилось не много людей. А его глубокое влияние испытали на себе практически все русские и советские физики, пришедшие в науку в 10—30-е годы. Все сказанное об А. Ф. Иоффе можно отнести и к Я. И. Френкелю. Среди теоретиков 20—40-х годов его учениками были «все и никто». Все — потому, что Я. И. Френкель был физиком с чрезвычайно широким диапазоном творческих интересов. Далее, он был автором завершеного в течение 1924—1935 гг. первого в нашей стране курса теоретической физики. По книгам этого курса (переведенным на английский и немецкий языки и не раз издававшимся за границей) учились не только советские, но и иностранные физики. «Когда я был студентом, — пишет Ричард Фейнман автору этих строк, — великолепные книги (great books) Вашего отца по волновой механике оказали на меня сильное и глубокое (strong and valuable) влияние». Никто, точнее, почти никто — потому, что число его непосредственных сотрудников было крайне мало. Я. И. Френкель не разрабатывал общих методов теоретической физики, приложение которых к широкому кругу конкретных вопросов, выполненное разными людьми, обычно и позволяет отнести их к числу учеников автора данного метода. В этом смысле у Френкеля не было своей школы и учеников. Сила его заключалась в том, что он был своеобразным «генератором идей», а обучить кого бы то ни было искусству такой «генерации» невозможно или во всяком случае весьма затруднительно. Впрочем, история науки знает и теоретиков такого же стиля работ, имевших разветвленные школы. Почему с одним ученым справедливо связывается целая школа, в то время как у другого, не уступающего ему по таланту, такой школы нет? «К сожалению, задать такой вопрос значительно легче, чем на него ответить», — такими словами прокомментировал В. Л. Гинзбург подобный вопрос в своей статье о Л. Д. Ландау [17]. Почему у Эйнштейна практически не было учеников, а Бор создал и возглавил несравненную по силе копенгагенскую школу, Борн — геттингенскую, Зоммерфельд — мюнхенскую и Эренфест — лейденскую? А вот, скажем, Дирак и Гейзенберг прямых учеников практически не

имели. В Советском Союзе мы также имеем примеры теоретиков обоих типов. Первый представлен именами Л. И. Мандельштама, Л. Д. Ландау, И. Е. Тамма, второй — Я. И. Френкеля и В. А. Фока. Число прямых учеников у двух последних несравнимо меньше, чем у каждого из трех первых. Это дало полное основание И. Е. Тамму [18, стр. 112] говорить о группах, а не о школах Френкеля и Фока.

#### РАБОТЫ Я. И. ФРЕНКЕЛЯ ПО ФИЗИКЕ АТОМНОГО ЯДРА

С 1930 г. в Физико-техническом институте по инициативе А. Ф. Иоффе начали заниматься исследованиями физики атомного ядра. К этой работе были привлечены И. В. Курчатов, А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович и другие способные молодые ученые, в основном питомцы физико-механического факультета Политехнического института. Начали заниматься вопросами физики и теории, молодые сотрудники Я. И. Френкеля: С. А. Бобковский, М. П. Бронштейн, Д. Д. Иваненко. Еще в 1926 г. Яков Ильич в своей работе о магнитном моменте электрона [19, стр. 460] отметил, что наличие его может помочь понять характер сил, сцепляющих в одно целое электроны и протоны в атомных ядрах. В то время, как известно, считалось, что атомное ядро состоит именно из этих элементарных частиц. Число протонов определяло атомный вес ядра,  $A$ ;  $A - z$  электронов входили в его состав и частично компенсировали силы электростатического отталкивания  $z$  протонов ( $z$  — заряд ядра). Представления о нуклонном заряде и ядерных силах в то время отсутствовали. В указанной и в более поздней работе [20] Френкель показал, что магнитное взаимодействие электронов и протонов, обязанное существованием у них спинов (магнитных моментов) может обеспечить равновесие в пределах ядра. Однако рассмотренное равновесие носило неустойчивый характер, соответствуя максимуму, а не минимуму полной энергии ядра. Работы Френкеля тех лет получили известность, на них ссылались, в частности, Резерфорд в своей лекции «Атомные ядра и их превращения», прочитанной в честь Гётри 25 февраля 1927 г. [21]. Но при всем остроумии теории Френкеля она была незавершенной и нуждалась в формулировании дополнительных предположений о зависимости сил маг-

нитного притяжения от расстояния для того, чтобы обеспечивать непротиворечивое описание структуры ядра. Она представляет, таким образом, лишь исторический интерес, свидетельствуя о многолетних работах и размышлениях Якова Ильча на эту тему.

В 1932 г. ученик и сотрудник Резерфорда Чадвик открыл новую, третью по счету после электрона и протона, элементарную частицу — нейтрон. Судя по работам, к ее открытию были близки Боте и Бечер в Германии, Ирен Кюри и П. Савич — во Франции и И. В. Курчатов — в СССР. Появление нейтрона сразу же ликвидировало ряд трудностей, существовавших в физике ядра, и привело к построению протонно-нейтронной модели ядра, впервые предложенной Д. Д. Иваненко и подробно развитой несколько позднее В. Гейзенбергом. 1932 год принес и два других фундаментальных для развития ядерной физики открытия. Об одном из них мы только упомянем: это расщепление атомного ядра (бериллия) искусственно разогнанными протонами. Этого результата добились молодые английские физики Кокрофт и Уолтон. Другим открытием было обнаружение американским физиком Карлом Андерсоном (и практически одновременно англичанами Блеккетом и Оккиалини) еще одной элементарной частицы — позитрона. Позитрон был обнаружен при исследовании поведения космических частиц в камере Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле.\* Открытие позитрона означало триумф теории Дирака, предсказавшего его существование на основе своих пионерских работ по релятивистской квантовой механике за два года до этого.

С Полем Дираком Я. И. Френкель познакомился еще в 1926 г. В 1928 г. Дирак впервые побывал в СССР в качестве иностранного делегата 6-го съезда русских физиков. В 1931 г. в Англии состоялась еще одна встреча Френкеля

---

\* Первые исследования в камере Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле, и идея такого сочетания принадлежат П. Л. Капице. В работах Д. В. Скобельцына методика получила дальнейшее развитие и привела к важным результатам, относящимся к физике космических лучей и, в частности, к открытию ливней. Успех Блеккета и Оккиалини определился тем, что камеру Вильсона они снабдили специальным приспособлением, обеспечивавшим «срабатывание» фотокамер при пролете через нее космической частицы (ранее фотографирование велось наудачу).

с Дираком, а в 1933 г., во время своего длительного визита в Советский Союз, Дирак в течение нескольких месяцев, работая в Физико-техническом институте, жил в расположенной поблизости от института квартире Я. И. Френкеля. Незадолго до этого визита Дирака в СССР Френкель писал ему [22]: «Я все еще нахожусь под впечатлением неожиданного открытия положительного электрона как экспериментального факта. Оно действительно блестяще подтверждает Вашу дырочную теорию. Но, с другой стороны, представляется неудовлетворительным с философской точки зрения заселять мир вещами, которые могут наблюдаться лишь постольку, поскольку они отсутствуют. Эта трудность, вероятно, связана с неадекватностью наших обычных представлений о материи, основанных на чисто корпускулярной точке зрения.

«Что Вы думаете о протонах? Если их следует трактовать как элементарные частицы, то тогда мы должны предположить также и существование отрицательных протонов. Если же они представляют собой комбинацию нейтрона и положительного электрона, возникает вопрос: почему нейтроны комбинируются лишь с положительными электронами, а не с отрицательными? И если, далее, нейтроны должны трактоваться как элементарные частицы, удовлетворяющие принципу Паули, должны быть также и „антинейтроны“, которые соответствуют дыркам в почти заполненном (saturated) распределении нейтронов в состояниях с отрицательной энергией».\*

Эта подробная выдержка из письма не нуждается в многословных комментариях. Она приведена здесь в подтверждение характерной для ученых романтического стиля быстрой реакции на новые открытия и исследования. Например, польский физик Л. Инфельд в 1953 г. в некрологе, посвященном Я. И. Френкелю, писал, что Яков Ильич был первым, кто откликнулся статьей на построенную Максом Борном и им нелинейную электродинамику [23].

В настоящем сборнике опубликована статья Я. И. Френкеля «Метод аналогий в физике». Использование физических аналогий очень характерно для Френкеля.

---

\* Выражаю глубокую признательность проф. П. А. М. Дираку, любезно приславшему копию этого письма.

Здесь имеется в виду не «литературное» оформление его идей, а сам подход к вопросу, поиски связей между, казалось бы, далеко друг от друга отстоящими явлениями и выяснение физической природы существующего на самом деле подобия между ними. Пожалуй, наибольший успех метод аналогий принес Френкелю именно в его работах 30-х годов по теории атомных ядер. На всех стадиях их проведения они тесно переплетались с исследованиями этого же направления Нильса Бора, стимулируемые ими в начале (1936 г.) и опережая их в конце работы (1939 г.) в той части, которая касалась электрокапиллярной теории деления тяжелых ядер.

В февральском номере английского журнала «Nature» за 1936 г. появилась первая статья Бора [24], в которой были развиты плодотворные представления о компаунд-ядре, образующемся в процессе ядерной реакции. Бор высказал предположение о том, что энергия, вносимая в ядро налетающей на него частицей, распределяется между нуклонами; причем флуктуация в этом распределении может привести впоследствии (по истечении времени, на много порядков превышающего время пролета частицы через ядро) к вылету из такого промежуточного (компаунд) ядра одной из ядерных частиц. О работе Бора, сразу же получившей признание и широкий резонанс, в марте 1936 г. докладывал на сессии Академии наук СССР И. Е. Тамм [25]. Выступая в прениях, Я. И. Френкель [26, стр. 343] изложил свои соображения о возможности приложения к тяжелым ядрам, содержащим много десятков нуклонов, методов, характерных для статистической физики (занимающейся объектами, насчитывающими огромное количество атомов или молекул). Именно тогда впервые было предложено использовать понятие температуры для описания поведения тяжелых ядер, а испускание частиц из компаунд-ядра трактовать в терминах испарения (поглощение же налетающих частиц — в терминах адсорбции), заимствованных из кинетической теории конденсированных тел. Все эти вопросы Я. И. Френкель [1, стр. 332, 333] еще до опубликования обсуждает в переписке с Бором, который всегда высоко оценивал его работы. Проведенные Френкелем на основе этих модельных соображений расчеты позволили правильно оценить время жизни возбужденных ядер.

Заметим, что процесс  $\alpha$ -распада он рассматривает по аналогии с испарением кристалла каменной соли ( $\text{NaCl}$ ), продуктами сублимации которого в данном случае являются молекулы  $\text{NaCl}$ , отсутствующие в готовом виде в кристалле. Так и вылет  $\alpha$ -частиц из ядер не означает, что они имелись в ядрах в готовом виде.

Столь же плодотворной оказалась и теория электрокапиллярного деления тяжелых ядер медленными нейтронами, развитая Френкелем в 1939 г. [27]. О том, что ядро можно трактовать по аналогии с жидкой каплей, говорили еще Гамов в 1929 г. и Вейцзеккер в 1935 г. и независимо друг от друга Бор и Френкель в 1936 г. После исторических работ Гана и Штрассмана, установивших факт деления ядер урана медленными нейтронами, Лиза Мейтнер и Отто Фриш в развитие работы Бора (1937 г. [28]) выдвинули представление о колебаниях ядерной жидкости [29]. Френкель был первым, кто дал этим идеям количественное оформление с учетом того обстоятельства, что колеблется в этом случае заряженная жидкость. Теорию этих колебаний он строит исходя из прозрачной аналогии с поведением капелек заряженной ртути. Тенденция к слиянию незаряженных капель ртути в капли больших размеров сменяется на противоположную в случае, когда капля заряжается до определенного потенциала. При достижении этого значения потенциала (заряда) капля данного размера, напротив, разлетается на две капли примерно равных размеров. В работе Френкеля указывается, что такой распад может происходить и без привнесения в систему энергии активации (налетающим нейтроном, например), приводящей к аperiodическому нарастанию колебаний, а самопроизвольно — спонтанно. Таким образом, впервые предсказывается (для урана и тория) спонтанный распад тяжелых ядер. Более точно: Френкель выражает удивление, что такой распад, предсказываемый его расчетами, не наблюдался в действительности, и относит это за счет приближенного характера своей оценки. Но именно этим он объясняет естественный обрыв периодической системы элементов на 92 элементе.\*

---

\* Спонтанный распад урана был открыт экспериментально Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком в 1940 г. в лаборатории И. В. Курчатова в Физико-техническом институте.

Электрокапиллярная теория деления тяжелых ядер Френкеля вместе с опубликованной независимо и несколько позднее более подробной теорией Бора и Уиллера на многие годы определили дальнейшее развитие теории деления. Капельная модель ядра носит название модели Бора—Френкеля.

#### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Научная деятельность Якова Ильича началась более полувека тому назад и интенсивно продолжалась в течение всей его жизни. Высказанные им идеи и разработанные на их основе теории прошли, таким образом, испытание временем: 50 лет — огромный срок при теперешнем темпе развития науки. Подводя краткий итог работам Я. И. Френкеля, можно утверждать, что это испытание они выдержали. Многие физические явления ныне уже чисто терминологически связаны с его именем. В электронной теории твердых тел это, прежде всего, «экситоны Френкеля»,\* «френкелевские пары». Им введено само понятие дырочной проводимости [30, стр. 330; 31]. В молекулярно-кинетической теории конденсированных тел это «дефекты по Френкелю» в кристаллической решетке, составляющие основу картины реального кристалла по Френкелю, в теории дислокаций — «модель подвижной дислокации Френкеля—Конторовой». В физике пористых тел и порошковой металлургии — «эффект Френкеля», ответственный за механизм спекания порошков. В теории атомных ядер — «капельная модель ядра Бора—Френкеля», в классической электродинамике — «френкелевское поле», термин, введенный недавно Р. Фейнманом в речи, произнесенной в связи с вручением ему Нобелевской премии по физике 1965 г. К этому следует добавить, что почти в каждой области такой всеобъемлющей науки, какой стала в нашем веке физика, есть широко известные теории Френкеля: френкелевская кинетическая теория жидкостей, теория вязкости, теория электропроводности металлов, квантовая теория ферромагнетизма, тео-

---

\* Существование экситонов было предсказано Я. И. Френкелем в 1931 г. для диэлектриков и полупроводников. Ныне возбуждения экситонного типа исследуются в металлах, газах и биологических объектах.





*П. А. М. Дирак.*

*Портрет работы Я. И. Френкеля (масло). 1933 г.*

рия дислокаций, теория земного магнетизма и атмосферного электричества и т. д. Список этот может быть продолжен.

В упоминавшейся биографии Якова Ильича акад. И. Е. Тамм писал [6, стр. 398]: «Говоря о Я. И. Френкеле, никак нельзя ограничиться одной научной стороной его деятельности. Это был живой, общительный, увлекающийся, необычайно разносторонний человек. Наряду с наукой он находил время и для игры на скрипке, и для живописи (сохранился целый ряд написанных им очень

хороших картин и портретов друзей и знакомых); он не только обладал своеобразным обаянием, покорявшим даже мало знакомых с ним людей, но отличался и необыкновенной душевной теплотой и был на редкость добрым человеком, в подлинном, самом лучшем смысле этого слова». С такой же теплотой вспоминает о Якове Ильиче и П. Л. Капица: «Я никогда не встречал таких добрых людей».

Есть два типа честных людей. В мелочи это проявляется так: те и другие платят за проезд в пустом трамвае без кондуктора, но в то время как для одних это обычная норма поведения, другие отмечают про себя свое благородство. Совершая доброе дело, также можно с удовлетворением посматривать на себя «со стороны», а можно творить добро импульсивно, не анализируя и не оценивая свои поступки, а делая это безотчетно, так, как мы ходим и дышим. Именно таким человеком и был Яков Ильич. А. Ф. Иоффе писал о нем [32]: «Необычайная доброта, любовь и уважение ко всякому, в ком Яков Ильич мог преположить добрые побуждения и стремление к знанию, были настолько присущи его светлой личности, что он часто казался наивным, доверяя даже недостойным доверия. Ему чужда была сама мысль об обмане, так далек был его душевный мир от любой нечестной мысли».

Жена Якова Ильича, Сарра Исааковна Френкель, вспоминала, например, что Яков Ильич проявлял излишнюю терпимость к оценке работ тех физиков, которые были ему мало симпатичны, а к тем, кто ему нравился, — бывал неоправданно строг. Яков Ильич объяснял это тем, что боится, как бы его личное отношение в какой-то мере не сказалось на мнении о работе, а потому и впадает в ненужную крайность. Ему было очень близко высказывание Герцена, который говорил: «Объективности я требую от врагов, от друзей я жду пристрастия». Яков Ильич, любивший повторять эту фразу, был пристрастен к друзьям: радовался их успехам и строго критиковал их.

Жаль, что человеческие качества выдающихся людей являются достоянием только их современников. Но такие ученые, как Яков Ильич Френкель, оставляют по себе более глубокий и непреходящий след благодаря своим идеям и работам, ознаменовавшим шаг на пути к пониманию природы и созданию физической картины мира.

# 1. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

\*

## КВАНТЫ И РАДИО

### § 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ВСЕСТОРОННЕЕ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЕ

Изобретение беспроводного телеграфа, казалось, навсегда упрочило электромагнитную теорию света. Электромагнитные волны, возбуждаемые быстрым колебательным движением электрических зарядов, перестали быть отвлеченным теоретическим принципом, как во времена Максвелла, или экспериментальным фактом, установленным Герцем. Они стали фактом столь же повседневным и, так сказать, непосредственно осязаемым, как и волны звуковые, хотя, быть может, и не столь понятным. Ибо, в то время как звуковые волны представляют собой механические колебания такого же самого типа, как и те механические колебания звучащих тел, которыми они возбуждаются, световые или электромагнитные волны не являются колебаниями механическими, но представляют собой колебания электрических и магнитных сил (или напряжений) в пустом пространстве. Попытки истолковать их как механические колебания некоего мирового эфира, якобы заполняющего пустое пространство, потерпели полное фиаско и в настоящее время почти окончательно отошли в историю физики, если не считать отдельных «твердолобых консерваторов», которые все еще пытаются спасти теорию эфира.

Итак, электромагнитные волны — это колебания силовые.

Однако источником их являются, так же как и в случае звука, колебания механические, т. е. колебательное

движение наэлектризованных частиц или отдельных электронов. Подобные механические, или, как мы их будем в дальнейшем называть, электронные, колебания могут быть не только причиной, но и следствием силовых (электромагнитных) колебаний. Так, например, первичные электронные колебания в антенне передающей радиостанции или в светящемся атоме вызывают в окружающем пространстве силовые колебания, которые в свою очередь вызывают вторичные электронные колебания во всех телах, содержащих способные колебаться электроны, например, в радиоприемниках или в человеческом глазу. Эти вторичные электронные колебания в свою очередь создают вторичные силовые колебания (отраженный свет) и т. д. Пространство, в котором распространяются световые, т. е. силовые, колебания, само по себе не «светится», «светятся», т. е. излучают свет, лишь тела или частицы, в которых совершаются электронные колебания.\* Только эти электронные колебания и представляют собой, в сущности, наблюдаемую нами реальность. Силовые колебания сами по себе нами вовсе не воспринимаются. Их можно было бы совершенно исключить из рассмотрения, и трактовать распространение света или передачу радиосигналов как непосредственное действие на расстоянии одних электронов на другие. Различие подобного электромагнитного или электронного действия на расстояние от того *actio in distans*, с которым оперировала классическая механика, заключается в его запаздывании, т. е. конечной скорости его передачи.

Действительно, при описании электромагнитных явлений, по крайней мере в области радио, мы можем с равным успехом пользоваться дифференциальным уравнением электромагнитного поля, считая источниками последнего электрические заряды, или же интегралами этих уравнений, непосредственно характеризующими действие одного электрона на другой в функции их относительного положения и движения. Этот подход является принципиально более простым, нежели обычный, но по существу оба они совершенно эквивалентны; при этом никаких волн в пустом пространстве предполагать не нужно: необходимо

---

\* В противоположность этому воздух, в котором распространяются звуковые колебания, сам «звучит».

принимать во внимание движение и взаимодействие отдельных электронов, учитывая то обстоятельство, что действие каждого из них на остальные передается не мгновенно, а с конечной скоростью, которую обычно называют скоростью света. Существенным моментом, обуславливающим эквивалентность этого подхода с тем, основу которого составляет представление о промежуточной инстанции в виде силовых колебаний или электромагнитных волн, является ненаправленный характер рассматриваемого дальнего действия, т. е. постепенное уменьшение его в одной и той же степени (обратно пропорционально расстоянию, если речь идет о силе, или его квадрату — в случае энергии) по всем направлениям.

## § 2. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ И НАПРАВЛЕННОЕ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЕ

Изложенная теория в обеих ее формах дает, как известно, совершенно исчерпывающее объяснение всех деталей радиоявлений. Но эти явления, по существу, ничем, кроме частоты колебаний или длины волны, не отличаются от явлений световых. Таким образом, следовало бы ожидать, что электромагнитная теория света, подтвержденная с такой изумительной полнотой в радиотехнике, должна столь же успешно объяснять все детали световых явлений, на почве которых она впервые возникла.

Действительно, до начала XX в. эта классическая теория света, созданная Максвеллом и разработанная в связи с электронной теорией материи Лоренцем, давала исчерпывающее количественное объяснение всем известным в то время оптическим явлениям.

Однако начало нашего века, и в особенности второе его десятилетие, ознаменовалось рядом новых открытий в области элементарных физических явлений, при попытке объяснения которых классическая оптика или, выражаясь точнее, классическая электродинамика и механика потерпели решительное, безнадежное фиаско.

Эта неудача тем более замечательна, что она хронологически совпала с наиболее полным торжеством классической теории в применении к радиотехнике. Классическая теория оказалась по существу теорией макроскопической, приложимой к процессам большого масштаба, в которых участвуют биллионы и триллионы элементарных частиц

материи К элементарным процессам, совершающимся в отдельных атомах или объектами которых являются отдельные электроны, эта макроскопическая теория оказалась совершенно неприменимой.

Вышеупомянутые новые элементарные явления разделяются на две группы. Первые относятся главным образом к механизму действия одних материальных частиц на другие, а вторые — к внутреннему строению этих частиц.

Мы рассмотрим сначала основное явление первой группы, так называемый фотоэлектрический эффект. Последний, как известно, заключается в том, что световые колебания достаточно высокой частоты, обычно лежащей за пределами видимого спектра, в ультрафиолетовой области, могут вырывать из материальных тел электроны. При этом скорости, сообщаемые отдельным электронам, совершенно не зависят от интенсивности света, т. е. от энергии световых колебаний, и определяются исключительно их частотой  $\nu$  согласно известному уравнению Эйнштейна:

$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - w, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость «фотоэлектронов»;  $m$  — их масса;  $w$  — постоянная, характерная для рассматриваемого тела;  $h$  — некоторая универсальная постоянная ( $h = 6.5 \cdot 10^{-27}$  эрг. сек.), впервые введенная Планком в теорию теплового излучения и называемая постоянной Планка.

В случае если  $\nu < \frac{w}{h}$ , то электроны светом не вырываются вовсе, как бы ни была велика его интенсивность.

При  $\nu > \frac{w}{h}$  свет ничтожно малой интенсивности, идущий, например, от какой-нибудь отдаленной звезды, вызывает такой же точно фотоэлектрический эффект, как и самый интенсивный свет. Интенсивность света влияет не на скорость вырываемых им электронов, а лишь на их число, которое возрастает прямо пропорционально интенсивности. Если, следовательно, источник света, способного вызывать фотоэлектрический эффект, постепенно удалять от соответствующего тела, то скорость вырываемых им электронов будет оставаться постоянной и лишь число их (отнесенное к единице времени) будет убывать обратно пропорционально квадрату расстояния.

Описываемые явления совершенно не объяснимы с точки зрения классической механики и оптики и почти навязывают старые представления корпускулярной теории света, которую обычно связывают с именем Ньютона (хотя последний отнюдь не отрицал полезность волновой теории и во многих случаях пользовался ею).

И действительно, в наши дни эта теория была возрождена преемником Ньютона в механике и оптике — Эйнштейном.

Именно исходя из представления о корпускулярной природе света, рассматривая световые лучи как пучок отдельных световых снарядиков, Эйнштейн и вывел или, вернее, придумал свое столь же простое, сколь и изумительное уравнение фотоэлектрического эффекта.

В отличие от Ньютона Эйнштейн предложил, однако, считать световые снаряды не материальными частицами, а как бы пространственно локализованными атомами, или «квантами», энергии, не обладающими основным признаком материальных частиц — неразрушимостью. Световой квант «рождается» в недрах атома за счет механической энергии последнего и тотчас же испускается им в окружающее пространство, где он несется со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/сек. до тех пор, пока не наткнется на другой атом, способный его поглотить. Здесь эфемерное существование кванта заканчивается превращением его в механическую энергию поглотившего атома. При этом энергия кванта  $\epsilon$  представляет собой меру того свойства света, которое на языке обычной электромагнитной теории называется частотой колебаний  $\nu$  (или длиной волны  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ). Энергия кванта связана с частотой соотношением

$$\epsilon = h\nu. \quad (2)$$

Согласно теории относительности, которую можно рассматривать как завершение классической механики и электродинамики, всякая энергия связана с массой, причем коэффициент пропорциональности между ними равен квадрату скорости света. Таким образом, световой квант должен иметь массу

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (3)$$

Но, согласно той же теории относительности, масса всякой обыкновенной материальной частицы является функцией ее скорости, выражаемой формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4)$$

где  $m_0$  — величина этой массы при  $v = 0$ . Если эта «покоящаяся масса» больше нуля, то при  $v = c$  действительная масса частицы должна обратиться в бесконечность, так же, конечно, как и ее энергия. Этим объясняется то обстоятельство, что скорость электронов никогда не достигает скорости света. Тот факт, что скорость световых квантов совпадает со скоростью света, свидетельствует о том, что их покоящаяся масса равна нулю. Физически это означает, что они существуют постольку, поскольку движутся со скоростью света и, останавливаясь, исчезают. При этом действительная масса квантов может иметь любое (конечное) значение, ибо она, согласно формуле (4), выражается неопределенностью вида  $\frac{0}{0}$ .

С движением материи связана не только энергия, но и другая (векторная) величина — количество движения, которое равно произведению массы на скорость  $mv$ . Отсюда следует, что и световые кванты, которые можно трактовать как материальные частицы с исчезающе малой покоящейся массой, должны обладать количеством движения  $g = mc = mcn$ , или, или согласно (3),

$$g = \frac{h\nu}{c} n. \quad (5)$$

Этим количеством движения световых квантов обуславливается механическое действие света, которое в макроскопическом масштабе воспринимается как световое давление. В случае элементарных актов испускания и поглощения света отдельными атомами оно выражается в виде толчков, испытываемых последними. При этом испускающий атом испытывает обратный толчок, аналогичный отдаче орудия при выстреле, а поглощающий — толчок, направленный в сторону движения поглощаемого им кванта. В 1917 г. существование подобных толчков было теоретически подтверждено Эйнштейном путем рассмотрения взаимодействия между атомами и тепловым



излучением. В последнее время оно получило непосредственное экспериментальное подтверждение в установленном А. Комптоном уменьшении частоты рентгеновых и гамма-лучей при рассеянии их свободными электронами.

Налетая на свободный электрон, световой квант не может испытать поглощения,<sup>1</sup> но отскакивает от него: так легкий деревянный шарик отскакивает от тяжелого металлического, отдавая последнему часть своей энергии. Уменьшение энергии отскакившего, или «рассеянного», кванта должно, согласно соотношению (2), проявляться в уменьшении частоты колебаний, что находится в точном количественном соответствии с экспериментальными фактами.

Подобно тому, как в случае электромагнитной теории света понятие о силовых колебаниях или волнах может быть фактически упразднено и взаимодействие между электронами сведено к непосредственному запаздывающему действию на расстоянии, точно так же и для квантовой теории Эйнштейна характерным и существенным являются не сами световые кванты, которые заменяют в ней световые волны, а описываемое при помощи этих квантов взаимодействие между атомами. В отличие от классического взаимодействия с его ненаправленным всесторонним характером взаимодействие квантовое, представляя собой по существу то же самое запаздывающее дальное действие, имеет направленный, односторонний характер. При этом позволительно думать, что оно бывает направлено от активного, «передающего», атома не в какую угодно сторону, но к вполне определенному пассивному, или «принимающему», атому. С этой точки зрения, которая выдвигалась не самим Эйнштейном, а другими авторами, в особенности Льюисом, рассеяния энергии в пространстве не происходит: она лишь переходит от одних атомов к другим.

### § 3. КВАНТЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ПРЕРЫВНЫЙ ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ

С квантовой теорией света, или, если угодно, теорией направленного квантового дальнего действия тесно связана другая группа элементарных явлений, о которых упоминалось выше, а именно явления, относящиеся к строению или, вернее, к механике самих атомов. В соответствии

с теорией Эйнштейна последние не должны излучать энергию в окружающее пространство непрерывным всесторонним потоком, подобно антенне передающей радиостанции, но должны выбрасывать ее отдельными конечными порциями во вполне определенных направлениях. Точно так же поглощение света должно происходить путем захвата порций или квантов, исходящих из отдельных других атомов, а не путем непрерывного раскачивания вторичных электронных колебаний за счет энергии первичных силовых колебаний, как это происходит в радиоприемниках.

Это представление об испускании и поглощении света атомами, подготовленное работами Планка (1900 г.) и Эйнштейна (1905 г.), было впервые сформулировано Бором (1913 г.) и послужило основанием теории строения атомов, связываемой с его именем, а также с именем Резерфорда.

Мне незачем распространяться здесь о сущности этой в настоящее время общеизвестной теории. Напомню лишь некоторые наиболее характерные черты ее, существенные для последующего.

1. Первым принципом теории Бора является принцип прерывности, согласно которому каждый атом (или молекула) может совершать ряд дискретных консервативных, или «стационарных», движений, т. е. движений, при которых его механическая энергия  $w$  остается постоянной. В классической электродинамике подобные движения невозможны: поскольку атомы содержат быстро вращающиеся электроны, последние должны непрерывно излучать энергию, т. е. механическая энергия атома (сумма кинетической и потенциальной энергий электронов) должна непрерывно превращаться в энергию лучистую (электромагнитную), частично поглощаемую другими атомами и растекающуюся в бесконечность. Заметим, что механическую энергию в классической электродинамике также следует трактовать как энергию электромагнитную, соответствующую тому электрическому и магнитному полю, которые зависят, соответственно, от положения и скорости электронов.

Что же касается лучистой энергии, то она соответствует электромагнитному полю, обусловленному ускорением электронов; поэтому в обыкновенной классической механике, оперирующей лишь с потенциальной энергией

(«энергией положения») и кинетической энергией («энергией скорости»), она аналога не имеет.

Консервативные движения в теории Бора по крайней мере в простейших случаях, когда рассматривается один электрон, обращающийся вокруг неподвижного положительного ядра (атом водорода), описываются этой классической механикой, исправленной теорией относительности (с учетом зависимости массы от скорости), но совершенно игнорирующей излучение.

Однако, в отличие от классической механики, допускающей движения с любой величиной энергии, теория Бора, или, вернее, принцип прерывности, утверждает, что консервативные движения могут происходить лишь в тех случаях, когда механическая энергия атома принимает определенные дискретные значения  $w = w_1, w_2, w_3 \dots, w_\infty$ . Эти «квантованные» значения энергии определяются следующими «квантовыми условиями»:

$$\oint p_1 dq_1 = n_1 h, \oint p_2 dq_2 = n_2 h, \dots, \oint p_f dq_f = n_f h, \quad (6)$$

где  $f$  — число степеней свободы рассматриваемой системы (например, 3 в случае одного электрона),  $q_i$  — ее обобщенные координаты, а  $p_i$  — соответствующие импульсы, выбранные таким образом, чтобы энергию можно было представить в виде суммы членов, зависящих, соответственно, от отдельных пар  $(q_1, p_1)$ ,  $(q_2, p_2)$  и т. д.\*

Приравнивая эти составные части порознь постоянным, мы можем выразить каждый импульс в функции соответствующей координаты. При этом интегрирование в формулах (6) берется в пределах циклического изменения координат, т. е. такого изменения, при котором система (электрон) возвращается в исходное положение (например, от 0 до  $2\pi$  для угловой координаты). Наконец,  $n_1, n_2, \dots$  суть произвольные целые числа, могущие в некоторых случаях принимать также и отрицательные значения наряду с положительными. Это так называемые квантовые числа. Различные уровни энергии данного

---

\* Напомним, что импульсами (моментами) называются производные от кинетической энергии, выраженной в функции координат  $q_1, \dots, q_f$  и скоростей  $q'_1, \dots, q'_f$  по соответствующим координатам. В случае прямоугольных координат импульсы равны составляющим количества движения  $mv$ .

атома могут быть, следовательно, представлены в виде некоторой функции от квантовых чисел

$$w = w(n_1, n_2, \dots, n_f). \quad (7)$$

Заметим, что понятие квантов в теории Бора имеет несколько другой смысл, чем в теории Эйнштейна, а именно, они относятся не к величине порций лучистой энергии, испускаемой или поглощаемой атомами, а к величине той энергии, которую они могут сохранить без испускания и поглощения. При этом вопрос об истинной природе света в теории Бора остается совершенно открытым.

Однако эти два смысла тесно связаны друг с другом, ибо принцип прерывности означает лишь невозможность испускания или поглощения энергии иначе, как в виде порций, или квантов, равных

$$\varepsilon = w(n') - w(n''), \quad (8)$$

где  $n'$  и  $n''$  — квантовые числа, характеризующие два различных консервативных движения, или, по обычной терминологии, стационарных состояния, рассматриваемого атома.\*

2. Вторым принципом теории Бора — принцип частоты — представляет собой не что иное, как применение соотношения (2) Планка—Эйнштейна к выражению (8).

Таким образом, этот принцип утверждает, что всякий переход атома от одного стационарного состояния к другому связан с испусканием или поглощением монохроматического излучения, частота которого  $\nu$  определяется из соотношения

$$\nu = \frac{w(n') - w(n'')}{h}. \quad (9)$$

Принцип частоты оставляет совершенно открытым вопрос о механизме вышеупомянутого перехода. Имеет ли он характер некоторого «регрессивного» или «прогрессивного» движения (в зависимости от того, в какую сторону изменяется энергия), требующего известного времени, или характер мгновенного перескока от одного

---

\* Для простоты мы заменяем всю совокупность чисел  $n_1, \dots, n_f$  одним  $n$ .

режима к другому? Может ли случиться, что атом в некоторый момент времени имеет энергию, промежуточную между двумя квантовыми уровнями  $w'$  и  $w''$ , и что с ним при этом должно произойти? Эти вопросы теория Бора оставляет совершенно открытыми. Она лишь утверждает, что атом стремится самопроизвольно к тем из допускаемых квантовыми условиями консервативных движений, которые обладают наименьшей энергией. Это движение, или состояние, называется нормальным. Атом может быть выведен из него и переведен на один из более высоких квантовых уровней, или, как говорится, возбужден лишь при помощи какого-либо внешнего воздействия: лучистого (поглощение света) или механического (удар электрона, столкновение с другим атомом). А затем, будучи предоставлен самому себе, он, подобно брошенному на лестнице шару, станет скатываться все ниже и ниже, со ступеньки на ступеньку, или перепрыгивать сразу через несколько ступенек, пока не достигнет нормального состояния.

3. Это стремление возбужденного атома излучить энергию и вернуться в нормальное состояние в известном смысле соответствует основному требованию классической электродинамики об излучении, которым должно сопровождаться всякое колебательное или вращательное движение электрона. Вместо того, однако, чтобы излучать энергию непрерывно, заряженный ею атом постепенно «расстреливает» ее конечными порциями. Соответствие между этими двумя способами излучения: непрерывным, который наблюдается в радиотехнике, и прерывным, который, по-видимому, имеет место в случае атомных процессов, имеет, как показал Бор (1918 г.), не только качественный, но до некоторой степени и количественный характер, особенно в области больших квантовых чисел, т. е. высоких энергетических уровней, отделенных друг от друга очень низенькими ступеньками (малыми квантами). В этой области частота колебаний, определяемая формулой (9), приблизительно совпадает с частотой обращения электронов по их орбитам, вернее, с частотой колебаний результирующего электрического момента атома  $P$  или одним из обертонов этой фундаментальной частоты. Вместе с тем оказывается, что вероятность самопроизвольного перехода атома с данного верхнего уровня на один из низших пропорциональна интенсивности соот-

ветствующего обертона, вычисленной по обычной классической формуле

$$\frac{2}{3c^3} \left( \frac{d^2 p_n}{dt^2} \right)^2 = \frac{2}{3c^3} (p_n)^2 (2\pi\nu_n)^4, \quad (10)$$

где  $p_n$  — амплитуда, а  $\nu_n$  — частота рассматриваемого обертона.

Это положение составляет третий принцип теории Бора — так называемый принцип соответствия.

#### § 4. ПРОТИВОРЕЧИЯ

Если бы мы пожелали применить принципы теории квантов в форме эйнштейновских атомов излучения и боровского представления об излучении атомов к радиотехнике, то мы получили бы следующую совершенно противоречущую действительности картину.

В антенне передающей радиостанции происходят мощные электронные колебания с квантованной, согласно формулам (6), энергией. При этом, однако, излучение может совершенно отсутствовать. Но антенна, предоставленная самой себе (в предположении отсутствия омического сопротивления и джоулевых потерь), постепенно разгружается от сообщенной ей энергии, перескакивая самопроизвольно от колебаний с большей амплитудой к колебаниям с меньшей амплитудой и выбрасывая каждый раз по чрезвычайно маленькому кванту энергии (соответственно малому значению радиочастоты) по сравнению со световыми или рентгеновскими.\* Эти мириады радиоквантов, разлетающиеся во все стороны, заменяют собой непрерывные электромагнитные волны. Они попадают то в один, то в другой радиоприемник или в различные части одного и того же приемника, где в случае наличия резонанса и поглощаются, причем радиоприемник уподобляется в дальнейшем излучающей антенне. Можно, впрочем, исключить «радиокванты» из рассмотрения так же, как мы выше исключили электромагнитные волны, и сказать, что антенна передающей станции непосредственно действует на все окружающие атомы, но не на все разом, а на каждый в отдельности и притом не все время, а в от-

---

\* В теории квантов этой малостью объясняется отсутствие фотоэлектрического эффекта в области радиочастот.

дельные моменты, соответствующие переходам от одного колебательного режима к другому, с чуть-чуть меньшей энергией.

Последнее представление с внешней стороны менее заметно отличается от классического, нежели первое, связанное с посредниками в виде радиоквантов. Однако по существу прерывное направленное дальное действие теории квантов столь же отличается от непрерывного и направленного дальнего действия классической электродинамики, как радиокванты от радиоволн.

Это противоречие классической и квантовой теории выступает особенно отчетливо в явлениях интерференции, на которых основывается измерение длины волны. Если в радиотехнике частота колебаний может быть определена непосредственно, независимо от длины волны, то в оптике первая вычисляется на основании последней, которая измеряется непосредственно. Таким образом, отбрасывая волны и заменяя их квантами, мы буквально обрубаем тот сук, на котором хотим сидеть.

Я не говорю уже о том, что исходя из теории квантов света явления интерференции совершенно необъяснимы.

Но ведь столь же необъяснимы в рамках обычной волновой теории фотоэлектрические явления, а также существование нормальных и вообще стационарных состояний у атомов, а также своеобразная структура их спектров и тому подобные столь же существенные факты.

Как же выбраться из образовавшегося тупика?

## § 5. ТЕОРИЯ ДЕ БРОЙЛЯ — СИНТЕЗ КВАНТОВ И ВОЛН <sup>2</sup>

Первая удачная попытка в этом направлении была сделана в 1924 г. молодым французским теоретиком де Бройлем. Сущность ее заключается в объединении, казалось бы, полярно противоположных понятий: частиц и волн в одно непрерывное целое. Связующим понятием является при этом понятие траектории частицы, т. е. описываемой ею линии, с одной стороны, и светового луча — с другой. А именно, траекторию светового кванта можно трактовать вместе с тем как ортогональную траекторию некоторой системы волновых поверхностей, т. е. как световой луч в обыкновенном, связанном с волновой теорией, смысле этого слова. Другими словами, световые

явления заключаются в волнообразном распространении некоторого колебательного процесса и вместе с тем в поступательном движении особых частиц по направлению световых лучей. При этом механические и, в частности, фотоэлектрические действия света обуславливаются частицами, в то время как интерференционные явления зависят от сопутствующих последним или направляющих их волн. Световые волны сами по себе не обладают энергией; последняя концентрирована в виде квантов, несущихся, так сказать, на гребне этих волн.

Таково в общих чертах исходное представление де Бройля. Для того чтобы уточнить его, он предложил рассматривать световые кванты не как атомы энергии, но как обыкновенные материальные частицы, обладающие некоторой отличной от нуля, хотя, быть может, и необычайно малой, покоящейся массой  $m_0$ . При этом условии скорость световых квантов  $v$  должна быть, очевидно, несколько меньше той величины  $c$ , которая обычно называется скоростью света

Различие между ними может быть при достаточном уменьшении практически сведено к нулю. Если, однако, квант обладает покоящейся массой, то мы можем представить себе его покоящимся, например, в такой координатной системе  $S_0$ , которая движется вместе с ним. В этой координатной системе квант имеет, следовательно, массу  $m_0$  и соответствующую ей, согласно формуле (3), энергию  $\varepsilon_0 = m_0 c^2$ . Но в той же формуле наряду с энергией фигурирует еще одна величина, которая ей эквивалентна в такой же мере (хотя и не в том же самом смысле), как и масса, а именно частота колебаний  $\nu_0$ . Каких колебаний? Очевидно, тех самых, с волнообразным распространением которых связано движение кванта. Если, однако, квант неподвижен, тогда эти колебания не могут распространяться, но должны происходить либо внутри кванта, либо во всем пространстве в одной и той же фазе (практически это соответствует распространению колебаний с бесконечно большой скоростью).

Итак, применяя основную идею де Бройля к покоящемуся кванту, мы приходим к выводу, что с последним связан некоторый колебательный процесс, происходящий во всем пространстве согласно выражению

$$\psi = \psi_0 \sin 2\pi\nu_0 t_0, \quad (11)$$



где  $\psi_0$  — амплитуда колебаний;  $\nu_0$  — частота колебаний, определяемая формулой

$$h\nu_0 = m_0c^2 = \varepsilon_0, \quad (12)$$

а  $t_0$  — время, отсчитываемое в системе  $S_0$ .

Оставляя открытым вопрос о том, что именно колеблется, электрические и магнитные силы или что-нибудь другое, попробуем теперь перейти от системы  $S_0$  к другой системе  $S$ , по отношению к которой  $S_0$  вместе с квантом несется в положительном направлении оси  $X$ -ов со скоростью  $v$ , близкой к  $c$ . В этой системе какое-либо явление будет характеризоваться значениями координаты  $x$  и времени  $t$ , отличными от тех значений  $x_0$  и  $t_0$ , которые характеризуют это явление по отношению к системе  $S_0$ . Связь между этими величинами определяется известными формулами преобразования Лоренца:

$$x_0 = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t_0 = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13)$$

Подставляя последнее выражение в выражение (11), получаем

$$\psi = \psi_0 \sin \left[ \frac{2\pi\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left( t - \frac{x}{c^2/v} \right) \right],$$

или

$$\psi = \psi_0 \sin \left[ 2\pi\nu \left( t - \frac{x}{w} \right) \right], \quad (14)$$

где

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (15)$$

и

$$w = \frac{c^2}{v}. \quad (16)$$

Выражение (14) представляет собой, очевидно, систему плоских синусоидальных волн, распространяющихся в положительном направлении оси  $x$ , т. е. в направлении движения кванта (по отношению к координат-

ной системе  $S$ ). Скорость распространения этих волн  $w$  не совпадает, однако, со скоростью движения кванта  $v$ , но, согласно формуле (16), во столько раз больше той критической скорости  $c$ , во сколько последняя больше  $v$ . Скорость света  $c$  как бы раздваивается на две различные скорости  $v$  и  $w$ , которые лишь в пределе при  $t_0 = 0$  сливаются (с разных сторон) с  $c$ .

Далее, частота колебаний  $\nu$ , согласно формуле (15), относится к «покоящейся частоте»  $\nu_0$  совершенно так же, как масса движущегося кванта  $m$  к его покоящейся массе  $m_0$ . Таким образом, соотношение между частотой колебаний и массой или энергией (12) остается справедливым и в общем случае, когда скорость кванта отлична от нуля.

Разделяя скорость распространения дебройлевских, или, как он их сам называет, фазовых, волн  $w$  на частоту колебаний, мы получаем длину волны  $\lambda$  и имеем, следовательно, в связи с соотношением (3)

$$\lambda = \frac{w}{\nu} = \frac{c^2}{v} \frac{h}{h\nu} = \frac{h}{mv},$$

или

$$mv = \frac{h}{\lambda}. \quad (17)$$

Итак, если частота колебаний определяет энергию кванта (по формуле  $mc^2 = h\nu$ ), то длина волны определяет его количество движения по формуле (17).

Эти результаты совершенно не зависят от величины покоящейся массы  $m_0$ , приписываемой кванту, и остаются в силе в предельном случае, если  $m_0 = 0$ . При этом получаются уже известные соотношения § 2, однако, в существенно отличном от прежнего физическом освещении. Ибо в то время, как в теории Эйнштейна частота и энергия или длина волны и количество движения связаны друг с другом чисто символическим образом, как понятия совершенно различных категорий, у де Бройля они представляют собой две стороны одной и той же корпускулярно-волновой модели.

## § 6. ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА ДЕ БРОЙЛЯ

Эти многообещающие результаты оказались, однако, в действительности совершенно бесплодными. Все попытки де Бройля объяснить явления интерференции и

другие связанные с ними свойства света с позиций своей «двуединой» корпускулярно-волновой теории потерпели полную неудачу. Но эта теория, оправдавшаяся по отношению к оптике, для которой она была непосредственно создана, получила блестящее дальнейшее развитие в отношении механики.

Мы уже упоминали о том, что соотношения де Бройля совершенно не зависят от величины покоящейся массы  $m_0$ . Отсюда естественно вытекает возможность применения их не только к гипотетическим световым квантам, но и к настоящим материальным частицам и, прежде всего, к элементарным частицам материи — электронам. При этом фазовые волны де Бройля утрачивают всякое сходство и вообще всякую связь с обыкновенными электромагнитными волнами классической электродинамики. Согласно последней, электрон, движущийся прямолинейно и равномерно, никаких волн не создает. Фазовые волны, сопутствующие электрону или несущие его на своем гребне, имеют совершенно иной, притом скорее чисто механический, нежели электромагнитный смысл. Де Бройль установил два фундаментальных их свойства.

1. Групповая скорость фазовых волн совпадает с истинной скоростью электрона. Напомним, что под групповой скоростью подразумевается скорость распространения амплитуды при совместном распространении двух или нескольких параллельных систем волн с неодинаковыми, но достаточно близкими длинами и частотами. Полагая

$$\psi = \sin 2\pi \left( \nu_1 t - \frac{x}{\lambda_1} \right) + \sin 2\pi \left( \nu_2 t - \frac{x}{\lambda_2} \right)$$

и принимая во внимание тождество

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2},$$

получаем

$$\begin{aligned} \psi = & 2 \cos 2\pi \left[ \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} t - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) x \right] \times \\ & \times \sin 2\pi \left[ \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} t - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) x \right]. \end{aligned}$$

Эта формула представляет собой своего рода биения во времени (при данном  $x$ ) и в пространстве (при дан-

ном  $t$ ). Скорость распространения этих биений, т. е. определенных значений амплитуды

$$2 \cos 2\pi \frac{v_1 - v_2}{2} \left[ t - \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \frac{x}{v_1 - v_2} \right],$$

равна, очевидно,

$$u = \frac{\frac{v_2 - v_1}{1} - \frac{v_1}{1}}{\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}},$$

или в пределе при  $v_2 \rightarrow v_1$  и  $\lambda_2 \rightarrow \lambda_1$

$$u = \frac{dv}{d\left(\frac{1}{\lambda}\right)}. \quad (18)$$

Если умножить числитель и знаменатель на  $h$  и заменить  $h\nu$  на  $\varepsilon = mc^2$  (энергия), а  $\frac{h}{\lambda}$  на  $mv$  (количество движения), то получаем

$$u = \frac{d\varepsilon}{d(mv)}. \quad (18a)$$

Но приращение энергии  $d\varepsilon$  должно равняться работе силы, действующей на электрон и равной  $\frac{d(mv)}{dt}$ . Работа выражается произведением последней на перемещение  $dx = vdt$ . Таким образом, мы имеем  $vd(mv) = d\varepsilon$ . Сравнение этого равенства с (18a) дает  $u = v$ .

Этот результат наводит на мысль, что электрон представляет собой не что иное, как группу или пакет фазовых волн с близкими частотами и длинами. Подобные группы волн могут распространяться, сохраняя свою индивидуальность, подобно настоящим материальным частицам.

2. Вопрос о том, в какой мере справедлива подобная волновая теория материи, мы пока оставим открытым и перейдем ко второму свойству фазовых волн, установленному де Бройлем.

Представим себе, что электрон вращается вокруг положительного ядра какого-либо атома по кругу радиуса  $r$  со скоростью  $v$ . При этом ему сопутствуют фазовые волны таким образом, что орбита электрона является их ортогональной траекторией или лучом. Естественно себе

представить, что устойчивыми движениями электрона будут лишь такие, при которых фаза дебройлевских колебаний в каждой точке орбиты определена однозначным образом. А это будет иметь место в том и только в том случае, если длина орбиты представляет собой целое кратное длины фазовой волны. Мы получаем, таким образом, следующее условие:

$$\frac{2\pi r}{\lambda} = n \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (19)$$

или, согласно (17),

$$mvr = \frac{h}{2\pi} n. \quad (20)$$

Левая сторона этого равенства представляет собой момент количества движения электрона. Равенство (20) есть не что иное, как простейший частный случай квантования консервативных движений согласно формулам (6).

Действительно, подразумевая под  $\varphi$  азимут электрона, т. е. угол между его радиусом-вектором и каким-нибудь неизменным направлением в плоскости орбиты, мы можем представить его кинетическую энергию в виде  $T = \frac{1}{2} m r^2 \dot{\varphi}^2$ , откуда следует

$$p = \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m r^2 \dot{\varphi} = mvr \quad \text{и} \quad \int pdq = 2\pi mvr.$$

Условие (20) было выдвинуто Бором уже в первой его работе, относящейся к 1913 г. Однако до работы де Бройля оно не имело решительно никакого физического смысла. В теории де Бройля оно приобретает чрезвычайно простой и, можно даже сказать, наглядный смысл, выражая то обстоятельство, что длина фазовых волн должна быть в резонансе с орбитой или ее половиной, или третью и так далее.

### § 7. ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА ШРЕДИНГЕРА

В механическом направлении теория де Бройля в ее первоначальной двуединой форме также оказалась бессильной продвинуться дальше.

Следующий шаг и притом шаг колоссальной важности в этом направлении был сделан в начале прошлого года

швейцарским физиком Шредингером.<sup>3</sup> Этот шаг был связан с возвращением от дебройлевского корпускулярно-волнового дуализма к монистической концепции материи, но не корпускулярной, а волновой. При этом Шредингер исходил вначале из дебройлевского представления об электронах, как о волновых пакетах. Но он не ограничился этим представлением, оказавшимся совершенно бесплодным и неверным, а сформулировал свою монистическую концепцию в виде дифференциального уравнения, определяющего законы распространения фазовых волн, так сказать, «в чистом виде», без каких-либо якобы с ними связанных частиц. И хотя первоначальная концепция была неверна, она привела Шредингера к открытию истинного уравнения атомной механики, по отношению к которому уравнение классической механики, даже с релятивистской поправкой, оказалось грубым приближением, применимым лишь к процессам макроскопического масштаба. Уравнение Шредингера вскоре получило в руках Борна новый физический смысл, ничего общего с представлением о волновых пакетах не имеющий, но тесно связанный со статистическим восприятием электронных явлений (см. ниже).

Таким образом, развитие новой волновой, или квантовой, механики в точности воспроизвело три основных этапа в развитии классической электродинамики. Первым этапом явилось учение Фарадея о распространении электромагнитных действий через тот же самый эфир, который со времен Гюйгенса считался материальным передатчиком световых волн. Вторым этапом явилось воплощение Максвеллом идей Фарадея в дифференциальные уравнения. При этом уравнения Максвелла дали, конечно, неизмеримо больше, нежели качественные представления Фарадея, с которыми эти уравнения оказались в конце концов совершенно несовместимыми. И действительно, на третьем этапе, связанном с именами Лоренца и Эйнштейна, материальный эфир был совершенно упразднен и фактически (хотя и не всегда де-юре) заменен запаздывающим дальнодействием между электронами.

Фарадеем новой механики явился де Бройль, Максвеллом — Шредингер и Лоренцем — Борн. Своего Эйнштейна она пока еще не имеет.<sup>4</sup>

После этого маленького отступления я перехожу к формулировке уравнения Шредингера. Последнее полу-

чается необычайно просто. Мы предполагаем, следуя за Шредингером, что дебройлевские волны распространяются согласно общему закону распространения волн, а именно

$$\nabla^2\psi - \frac{1}{w^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0, \quad (21)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  есть оператор Лапласа, а  $w$  — определенная выше по формуле (16) волновая, или фазовая, скорость. Так как мы имеем в виду гармонические колебания, то мы можем положить

$$\psi = \psi_0 \sin 2\pi\nu t, \text{ или } \psi = \psi_0(x, y, z) e^{+i2\pi\nu t}. \quad (22)$$

При этом  $\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -(2\pi\nu)^2\psi$ , так что предыдущее уравнение принимает вид

$$\nabla^2\psi + 4\pi^2\left(\frac{\nu}{w}\right)^2\psi = 0,$$

или

$$\nabla^2\psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2}\psi = 0, \quad (23)$$

где  $\lambda$  — длина волны, являющаяся, вообще говоря, функцией координат. Согласно соотношению (17), мы можем заменить множитель  $\frac{4\pi^2}{\lambda^2}$  на  $\frac{4\pi^2}{h^2}(mv)^2$ . Для того чтобы исключить корпускулярную, или «групповую», скорость  $v$ , мы воспользуемся законом сохранения энергии

$$\frac{1}{2}mv^2 + U = W, \quad (24)$$

где  $U(x, y, z)$  есть потенциальная энергия электрона, которую мы можем считать известной функцией координат, а  $W$  — полная энергия. Таким образом, мы имеем

$$\frac{4\pi^2}{\lambda^2} = \frac{4\pi^2}{h^2}(mv)^2 = \frac{8\pi^2m}{h^2}(W - U) \quad (25)$$

и, следовательно,

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(W - U)\psi = 0. \quad (26)$$

Это и есть уравнение Шредингера.

Однако само по себе, без каких-либо дополнительных указаний, оно никакого смысла не имеет. Эти дополнительные указания должны относиться, во-первых, к численным значениям полной энергии  $W$  и, во-вторых, к физическому значению самой функции  $\psi$ .

Первый вопрос решается на основании следующего принципа: решения уравнения (26) должны быть конечны, непрерывны и однозначны во всем пространстве, т. е. для всех значений  $x, y, z$ . Это требование выполняется лишь при ряде дискретных значений  $W$ , образующем так называемый спектр уравнения (26). Этот спектр, очевидно, зависит исключительно от вида функции  $U(x, y, z)$ . Полученные таким образом значения энергии представляют собой не что иное, как квантовые уровни энергии теории Бора, в большинстве случаев лишь незначительно отличаясь от последних.

Принцип однозначности представляет собой очевидную аналогию с принципом «резонанса», на основании которого де Бройль определял возможные круговые орбиты электрона, и ему (приблизительно) эквивалентен.

Чтобы выяснить связь его с обычной формой «квантовых условий» (6), введем вместо  $\psi$  другую функцию  $S$  по формуле

$$\psi = e^{\frac{2\pi i}{h}S} = e^{\frac{2\pi i}{h}(-wt + S_0)} \quad (27)$$

или

$$S = \frac{h}{2\pi i} \ln \psi = -wt + S_0, \quad (28)$$

где  $\omega = h\nu$ .

Подставляя в уравнение (26) выражение  $\psi$  через  $S$ , получаем после простых преобразований следующее уравнение:

$$\frac{h}{2\pi i} \nabla^2 S + (\nabla S)^2 = 2m(W - U), \quad (29)$$

где

$$(\nabla S)^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2.$$

При  $h = 0$  это уравнение переходит в обычное классическое уравнение Гамильтона—Якоби, причем  $S_0$  обозначает так называемую главную функцию, а  $S = -wt +$



+  $S_0$  — гамильтоново «действие». Мы видим, следовательно, что уравнение Шредингера отличается с внешней стороны от уравнения классической механики в форме Гамильтона—Якоби лишь небольшим (пропорциональным  $\hbar$ ) добавочным членом. Но за этим незначительным внешним отличием скрывается весьма глубокое физическое отличие, которое мы рассмотрим ниже.

Величина  $S$  (или  $S_0$ ), выраженная в функции обобщенных координат  $q$ , связана с (обобщенными) импульсами  $p$  соотношениями  $p_1 = \frac{\partial S}{\partial q_1}$ ,  $p_2 = \frac{\partial S}{\partial q_2}$ ,  $p_3 = \frac{\partial S}{\partial q_3}$ . Таким образом, квантовые условия (6) означают, что при изменении одной из координат на величину, соответствующую фактическому возвращению системы (атома) в исходную конфигурацию, функция  $S$  изменяется на целое кратное  $\hbar$  число.

При этом, согласно формуле (27), функция  $\psi$  должна возвращаться к первоначальному значению. Это значит, что условия (6) приблизительно эквивалентны условию однозначности  $\psi$ , как функции прямоугольных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , однозначно определяемых положением электрона.

Итак, боровские консервативные движения электрона представляют собой по теории Шредингера какие-то стационарные колебания, имеющие вид стоячих волн во всем пространстве. Последнее уподобляется упругой материальной среде, или, вернее, ограниченному упругому телу, обладающему характерными типами свободного колебательного движения, например натянутой струне с ее основным колебанием и обертонами последнего. Квантовые числа в теории Шредингера определяют не что иное, как порядок (номер) этого обертона и вообще его характер в случае колебаний более сложного типа.

Наряду, однако, с подобными стационарными колебаниями, или стоячими волнами, соответствующими дискретным значениям параметра  $w$ , согласно уравнению Шредингера, возможны колебания, распространяющиеся в пространстве в виде бегущих волн, для которых параметр  $w$  может принимать любое значение в некотором конечном или бесконечном промежутке (непрерывный спектр).

Так, например, при  $U = 0$  получается решение вида

$$\psi = e^{-i(kx - \omega t)} = e^{-i2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \nu t\right)},$$

где  $k = \frac{2\pi}{h} \sqrt{2m\omega}$ , представляющее собой систему плоских синусоидальных волн с длиной  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ , распространяющихся в направлении оси  $x$ . Эти волны соответствуют, по де Бройлю, электрону, несущемуся в том же направлении с кинетической энергией  $\omega \left( = \frac{1}{2} m v^2 \right)$ .

В этом и в подобных случаях первое достижение теории Шредингера — определение квантовых уравнений энергии — утрачивает всякое значение и на первый план выступает вопрос о физическом смысле фазовых волн и величины  $\psi$ .

### § 8. СТАТИСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

Консерваторы, придерживающиеся и поныне теории эфира, будут, вероятно, склонны истолковывать эти волны таким же образом, как и электромагнитные волны, т. е. как некоторое колебательное движение эфира, а величину  $\psi$  как параметр, определяющий механическое или кинематическое состояние последнего. Другими словами, новую волновую механику Шредингера они попытаются свести к старой ньютоновской механике этой злополучной среды.

После того, что было сказано в § 1, мне незачем подчеркивать наивность подобных представлений.

Механика де Бройля—Шредингера представляет собой усовершенствование механики Ньютона — Эйнштейна, которая получается из нее как предельный случай при  $h = 0$  (29). Для того чтобы выяснить смысл величины  $\psi$  в теории Шредингера, мы должны исходить из того значения, которое она имеет в классической механике, т. е. в том случае, если в формулу (27) подставить значение  $S$ , соответствующее уравнению (29) при  $h = 0$ .\*

Вспомним, что представляет собой в этом случае величина  $S = -wt + S_0$ . Функция  $S$ , определяемая как решение (полный интеграл) уравнения

$$(\nabla S)^2 = 2m(W - U)$$

\* Подобную подстановку, очевидно, нельзя делать в уравнении (26), так как оно при этом теряет смысл.

или

$$\frac{1}{2m} \left[ \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right] + U(x, y, z) = W = \text{const}$$

содержит три произвольные постоянные, в том числе и постоянную  $W$  (полную энергию). Дифференцируя ее по этим постоянным ( $W, \alpha, \beta$ ) и приравнявая результат новым постоянным ( $t, \alpha_1, \beta_1$ ), мы получаем три уравнения

$$t - t_0 = \frac{\partial S_0}{\partial W}, \quad \alpha_1 = \frac{\partial S_0}{\partial \alpha}, \quad \beta_1 = \frac{\partial S_0}{\partial \beta}, \quad (30)$$

из которых последние два определяют траекторию (орбиту) рассматриваемой частицы, а первое — движение ее по этой траектории. Постоянные  $\alpha, \beta, \alpha_1, \beta_1$ , фиксирующие форму траектории, индивидуализируют движение, т. е. из всей совокупности движений с данной энергией  $W$ , допускаемых видом функции  $S$  (или  $S_0$ ), они выделяют одно определенное движение, соответствующее некоторому начальному направлению скорости. Представим себе совокупность траекторий, получающихся при непрерывном изменении этих начальных условий, и пересечем их системой ортогональных поверхностей. Легко доказать, что во всех точках каждой из этих поверхностей функция  $S$ , а следовательно, и  $\psi$  имеют одно и то же значение, ибо импульсы  $p_x = \frac{\partial S}{\partial x}$ ,  $p_y = \frac{\partial S}{\partial y}$ ,  $p_z = \frac{\partial S}{\partial z}$  суть составляющие количества движения частицы  $mv$ ; вектор  $\nabla S$  с составляющими  $\frac{\partial S}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial S}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial S}{\partial z}$  направлен, следовательно, по касательной к траектории, проходящей через соответствующую точку; с другой стороны, он должен быть параллелен нормали к поверхности  $S = \text{const}$ , проходящей через последнюю.

Если рассматриваемый пучок траекторий уподобить пучку световых лучей, распространяющихся в некоторой неоднородной среде, то поверхности  $S = \text{const}$  или  $\psi = \text{const}$  будут играть роль волновых поверхностей, причем  $S$  имеет значение фазы колебаний, а  $\psi$  характеризует величину (и в частности, амплитуду) последних.

Эта аналогия между распространением световых лучей и движением материальных частиц, определяемым по методу Гамильтона—Якоби, была хорошо известна самому Гамильтону, но впоследствии она подверглась почти

полному забвению, пока де Бройль и Шредингер вновь не открыли ее. Однако в теории Шредингера эта аналогия гораздо глубже, чем в классической механике, ибо волновая функция  $\psi$  определяется в ней уравнением того же вида, как и уравнение распространения световых волн, между тем как при  $h = 0$  для  $\psi = e^{2\pi i \frac{S}{h}}$  получается уравнение совершенно другого типа (первого порядка и второй степени).

Во всяком случае мы имеем все основания думать, что уравнение Шредингера, или, вернее, получающаяся при его решении функция  $\psi$ , определяет не одно индивидуальное движение, а совокупность множества движений с одной и той же энергией, но с различными начальными условиями. Другими словами, механика Шредингера является до некоторой степени не просто аналитической, но статистической механикой, оперирующей не с отдельными частицами, а с «собраниями» множества одинаковых частиц, движущихся сходным образом независимо друг от друга.

Возникает вопрос, нельзя ли от этой статистической трактовки механической задачи, непосредственно вытекающей из уравнения Шредингера, перейти к определению индивидуальных движений, например, при помощи уравнений вида (30). На этот вопрос приходится пока ответить отрицательно. Хотя уравнение (29) при  $h = 0$  обращается в классическое, однако решения его при  $h$ , не равном 0, радикальным образом отличаются от решений гамильтонова уравнения  $(\nabla S)^2 = 2m(W-U)$  и не приближаются к последним, когда  $h$  — беспредельно убывает. Это видно хотя бы из того обстоятельства, что при  $h$ , не равном 0, функция  $S$  должна иметь комплексные значения. Таким образом, переход от пучков траекторий к отдельным траекториям в механике Шредингера оказывается невыполнимым.

При описании статистических явлений мы всегда бываем вынуждены обращаться к понятию вероятности. В механику Шредингера это понятие было введено Борном в следующей чрезвычайно простой форме.

Квадрат абсолютного значения функции  $\psi$ , или, другими словами, квадрат амплитуды шредингеровских колебаний в какой-либо точке пространства, есть мера вероятности того, что частица, движение которой характе-

ризуется этой функцией, находится именно в этой точке.

Заметим, что в классической механике функция  $S$  (действие) имеет всегда вещественные значения, так что в этом случае абсолютное значение функции  $\psi = e^{2\pi i \frac{S}{\hbar}}$  всегда равно 1. В механике Шредингера  $S$  является комплексной величиной, а потому  $\psi^2$  должна быть некоторой функцией координат.

Я не имею возможности в рамках этой статьи подробнее останавливаться на развитии приведенного принципа. Замечу лишь, что он уже успел блестяще оправдаться в применении к ряду важных вопросов атомной физики и, в частности, к вопросу о фотоэлектрическом эффекте. Для количественного истолкования последнего в новой механике световые кванты совершенно не требуются. Напротив, мы должны исходить из обычного представления электромагнитной теории света о световых волнах. При этом, однако, атом или, вернее, движущийся в нем электрон необходимо трактовать как систему шредингеровских волн. Это отнюдь не значит, что мы должны отказаться от корпускулярной концепции материи и заменить ее волновой.

Наоборот, новая механика является в известном смысле окончательным утверждением электронной теории. Но мы должны отказаться от попытки проследить движение каждого электрона в отдельности, довольствуясь теми результатами, которые получаются из уравнения Шредингера в связи со статистической интерпретацией Борна для большого собрания однородных атомов, находящихся в поле световых волн.

Таким образом, квантовый механизм поглощения света обуславливается не атомной природой последнего, а, как это ни парадоксально, волновым характером механики электронов и атомов. Само собой разумеется, что при таких условиях не может быть и речи об испускании квантов света. Согласно теории Шредингера, свет испускается в виде электромагнитных волн, представляющих собой в отношении частоты колебаний биения между фундаментальными, чрезвычайно высокими «обертонами»  $\nu = \frac{w}{\hbar}$ , которые соответствуют различным стационарным колебаниям фазовых волн. Пока атом находится в одном

стационарном состоянии, свет не испускается вовсе. При смене же одного состояния другим мы получаем испускание монохроматического света с частотой

$$\nu = \nu' - \nu'' = \frac{\omega' - \omega''}{h}$$

в согласии с одним из основных принципов теории Бора. Теория Шредингера идет, однако, гораздо дальше и позволяет вычислить интенсивность излучения или «вероятность» соответствующего перехода.

Итак, мы видим, что квантов света как пространственно локализуемых квазиматериальных частиц не существует вовсе. Свет распространяется в виде электромагнитных волн в полном согласии с той картиной, которая так хорошо знакома радиотехникам. То же самое, конечно, относится и к радиоволнам. Однако механизм их испускания и поглощения существенно отличается от того, при помощи которого эти явления обычно описываются. Здесь, в этом механизме взаимодействия материальных частиц друг с другом, и «сидят», если можно так выразиться, кванты.

Нужно ли вообще для описания этого механизма прибегать к посредничеству промежуточных агентов, хотя бы в форме электромагнитных волн? Я лично думаю, что они так же мало нужны для этого, как и эйнштейновские кванты или фарадеевский эфир. Они играют роль лишь вспомогательных графических образов, подобно, например, электрическим или магнитным силовым линиям. Новая механика является, по существу, так же как и старая, механикой дальнего действия между материальными частицами, но дальнего действия направленного и прерывного, а не непрерывного и всестороннего. В этом отношении устранение квантов света и возвращение к волнам существенного значения не имеет.

## ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ

### § 1. АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

**Ч**то такое свет? На этот вопрос в различные времена давались различные ответы; все они, однако, могут быть сведены к следующим двум основным типам:

1. Свет есть поступательное движение особого рода частиц — световых атомов.

2. Свет есть распространение в пространстве особого колебательного процесса — световых волн.

Согласно атомной теории света, светящееся тело представляется чем-то вроде артиллерийской батареи, обстреливающей окружающие тела ураганным огнем, причем эта стрельба происходит совершенно беспорядочно, т. е. более или менее равномерно по всем направлениям. В пустоте или в какой-либо однородной материальной среде световые снаряды летят прямолинейно и равномерно; пути их представляют собой то, что мы называем световыми лучами. Скорость полета этих снарядов остается также неизменной (как если бы они двигались без всякого сопротивления) и равной в случае «пустого» пространства 300 000 км/сек. (скорость света); в какой-либо другой среде (например, в воздухе, стекле и пр.) эта скорость имеет отличную, но также очень большую и притом постоянную величину.

В противоположность артиллерийским снарядам световые атомы не разрываются при попадании в какую-либо материальную мишень; они либо застревают в этой мишени (поглощение света), либо отскакивают от нее рикошетом (отражение света), либо, наконец, проходят

внутри и распространяются далее в несколько отличном от первоначального направлении (преломление света). Отражение или преломление могут происходить лишь в том случае, если мишенью служит какое-либо твердое или жидкое тело с достаточно гладкой поверхностью; поглощение же может иметь место и в отдельных атомах; вместо отражения или преломления в последнем случае может произойти рассеяние световых снарядов, т. е. более или менее значительное отклонение их от первоначального пути.

К изложенному сводятся в общих чертах те представления о природе света, которые были сформулированы свыше двухсот лет тому назад Ньютоном. Эти представления затем господствовали в физике в течение целого столетия; после чего они, казалось, навсегда были вытеснены представлениями о волновой природе света (см. ниже). Однако в начале нашего века М. Планк и А. Эйнштейн снова возродили эти представления в форме так называемой квантовой теории света. Слово квант (от латинского quantum — количество, порция) было введено Планком для обозначения элементарных количеств световой энергии, могущих испускаться или поглощаться обыкновенными материальными атомами или телами. Развивая далее идеи Планка, Эйнштейн предложил рассматривать эти кванты световой энергии как атомы света в духе представлений Ньютона, т. е. как своего рода материальные частицы. Основное отличие световых квантов от частиц обыкновенной материи заключается в том, что первые лишены той «неизменности», или «вечности», которая свойственна вторым; они «рождаются» в момент выстрела за счет энергии выбрасывающего их орудия — атома, «живут», т. е. существуют во время своего полета от этого атома до какого-нибудь другого, в котором они внезапно «умирают», т. е. исчезают, превращаясь в энергию последнего. Атомы материи, как известно, состоят из еще более мелких частиц: положительного ядра, которое играет в них роль солнца, и отрицательных электронов, вращающихся вокруг этого ядра подобно планетам. Никаких других частиц и, в частности, никаких световых квантов, которые покоились бы в них вместе с ядром или вращались бы вместе с электронами, атомы не содержат. Вместо склада артиллерийских снарядов, мы находим в атоме, способном испускать свет,



лишь избыточную по сравнению с нормой энергию. Световой снаряд образуется из этой энергии, так сказать, в момент выстрела; попадая в другой атом, он тотчас же перестает существовать как обособленная частица, «перевариваясь», если можно так выразиться, в дополнительную энергию проглотившего его атома. Эта дополнительная энергия проявляется обычно в том, что один из электронов, образующих оболочку атома, срывается со своей орбиты и переходит на орбиту, более удаленную от ядра, или же совершенно отрывается от последнего так, как если бы он был «вышиблен» из атома налетевшим световым снарядом. Тот или иной результат зависит от «калибра» этого снаряда, т. е. от величины содержащейся в нем или, вернее, образующей его энергии. При этом не следует думать, что калибр световых квантов как-либо проявляется в их геометрических размерах. Последние непосредственно ни в чем вообще не проявляются. Калибр световых снарядов обнаруживается в качестве или цвете образуемого ими света. Средним калибрам соответствуют видимые лучи, причем для фиолетовых лучей этот калибр примерно вдвое больше, чем для красных; световые снаряды более высоких калибров образуют невидимые ультрафиолетовые и рентгеновские лучи; наоборот, более низким «калибрам» соответствуют инфракрасные лучи, которые часто называются тепловыми, так как они обнаруживаются обычно лишь в виде тепла.

Изложенные представления о природе света и связанных с его поглощением или испусканием «квантовых переходах» материальных атомов из одного состояния в другое (путем переброски электронов с одних орбит на другие) не являются необоснованной спекуляцией; они вытекают из ряда простых опытных фактов. Простейшим из этих фактов является так называемый фотоэлектрический эффект. Он заключается в том, что при освещении какого-либо материального тела ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами из этого тела вырываются электроны. Опыт показывает, что кинетическая энергия, т. е. скорость этих электронов, совершенно не зависит от количества (интенсивности) света, но определяется исключительно его качеством; что же касается интенсивности света, то она влияет лишь на число электронов, испускаемых телом под действием света в единицу времени. Удаляя источник света, обуславливающий

фотоэлектрический эффект, мы уменьшаем число электронов, вылетающих из тела в 1 сек.; скорость же этих электронов совершенно не зависит от расстояния тела от источника. Мы получаем, следовательно, такой результат, как если бы тело обстреливалось снарядами, летящими из источника света по всем направлениям и имеющими вполне определенный калибр, отвечающий качеству света.

Квантовая теория света непосредственно связана с квантовой теорией строения материальных атомов, являющихся источниками или приемниками световых снарядов. Так как световой квант содержит конечное количество энергии, то при поглощении или испускании его энергия атома должна увеличиваться или уменьшаться на конечную величину. С другой стороны, известно, что различные химические атомы характеризуются определенным спектральным составом испускаемого ими света. Согласно квантовой теории, это означает, что каждый атом может испускать лишь световые снаряды вполне определенных характерных для этого атома калибров. Напомним, что свету того или иного качества соответствуют снаряды того или иного калибра, т. е. той или иной энергии. Условием испускания света атомом является предварительное возбуждение его, т. е. сообщение ему извне каким-либо путем (например, посредством электронного удара) той добавочной энергии, которая должна быть затем испущена в виде светового кванта. При этом испускание кванта может и не следовать непосредственно за возбуждением атома. Опыт показывает, что атом может пребывать в возбужденном состоянии некоторое конечное, хотя обычно и весьма ограниченное, время (порядка стомиллионной доли секунды) и что из данного возбужденного состояния он может вернуться в исходное нормальное состояние (соответствующее минимуму энергии) не сразу, но постепенно, через ряд промежуточных возбужденных состояний. Существенным является тот факт, что все эти более или менее «жизнеспособные», или устойчивые возбужденные, состояния образуют некоторый прерывный ряд, своего рода энергетическую лестницу; расстояния между ее ступенями определяют калибр световых снарядов, которые могут испускаться данным атомом. Все же остальные состояния, соответствующие промежуточным значениям энергии (ле-

жащим между двумя соседними ступенями энергетической лестницы атома), оказываются совершенно нежизнеспособными и фактически не наблюдаются. Можно себе представить, что переход от одного устойчивого состояния к другому с испусканием или поглощением света осуществляется мгновенно, в виде «квантового перескока».

Эти представления о строении или, вернее, о поведении атомов были впервые введены в науку в 1913 г. датским физиком Н. Бором. Вместе с тем он дал и простейший рецепт для построения энергетической лестницы данного атома, т. е. для определения устойчивых, или квантованных, движений образующих его электронов. Этот прекрасно оправдавшийся на опыте квантовый рецепт, а равным образом и различные его обобщения, предложенные в дальнейшем другими физиками, не допускали, однако, никакой разумной интерпретации и оставались до последнего времени каким-то внешним условием, навязанным физике атомов атомной теорией света.

## § 2. ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Атомная теория света, как уже упоминалось выше, возродилась в нашем столетии после векового забвения. XIX в. прошел под знаком волновой теории, которая точно так же, как и атомная, зародилась гораздо раньше, но лишь в начале XIX в. получила твердое обоснование и дальнейшее плодотворное развитие. Основателем волновой теории света является Гюйгенс. Исходным пунктом теории Гюйгенса послужила в то время еще весьма поверхностная аналогия между световыми и звуковыми явлениями (сила света убывает с расстоянием от его источника по тому же закону, что и сила звука; отражению света соответствует отражение звука в форме эха и др.). Углубляя эту аналогию, Гюйгенс высказал гипотезу о том, что свет представляет собой колебательное движение особой среды, наполняющей пространство, которое кажется нам совершенно пустым. В этой среде, названной им световым эфиром и играющей по отношению к свету ту же роль, какую воздух играет по отношению к звуку, всякое колебательное движение распространяется во все стороны в виде волн, напоминающих всем нам хорошо знакомые волны на поверхности воды.

Мы не можем здесь вдаваться в теоретический обзор развития волновой теории и ограничимся рассмотрением той формы, которую она приняла главным образом благодаря исследованиям великих английских физиков Фарадея и Максвелла, выполненным во второй половине прошлого века.

Современная электромагнитная теория света отличается от теории Гюйгенса, прежде всего, упразднением эфира как вспомогательной передаточной инстанции. Световые колебания трактуются ею не как колебательные движения частиц какой-либо среды, но как колебания силовые, т. е. как быстрые периодические изменения в каждой точке пространства электрических и магнитных сил, исходящих из источника света.

Причиной, обуславливающей эти силовые колебания, являются колебательные движения наэлектризованных частиц (электронов) в материальном теле, служащем источником света. От этого источника силовые колебания распространяются во все стороны со скоростью 300 000 км/сек. в виде электромагнитных волн определенной длины, тем большей, чем колебания медленнее. Действуя на заряженные частицы (электроны) в других телах, силовые волны раскачивают их. При этом частицы испускают во все стороны вторичные силовые колебания, во всех отношениях, кроме своей интенсивности, подобные первичным.

Эта картина световых явлений перестала быть абстракцией с тех пор, как немецкому физику Г. Герцу удалось (в 80-х годах прошлого века) искусственно получить электромагнитные волны большой и легко измеримой длины. Волны видимого света ничем, кроме своей длины, не отличаются от столь распространенных выше радиоволн. Всякое светящееся тело подобно передаточной радиостанции, вернее, совокупности большого числа миниатюрных радиостанций, образуемых его атомами. Длина электромагнитных волн, обуславливающих зрительное впечатление, заключается в пределах примерно от 8 сотых долей сантиметра (для красного света) до 4 сотых долей (для фиолетового). Вне этих пределов мы имеем со стороны длинных волн инфракрасные лучи и обыкновенные радиоволны (длина последних измеряется десятками и сотнями метров), а со стороны коротких волн — ультрафиолетовые и рентгеновские лучи (рент-

геновские волны еще в 10 000 раз короче видимых). Тело, поглощающее падающие на него световые лучи или волны, представляет собой своего рода радиоприемник. Тот или иной цвет различных тел зависит от того, что они или, вернее, образующие их атомные и молекулярные радиоприемники, настроены в резонанс на волны определенной, характерной для них длины.

Такова сущность волновой теории света в современной электромагнитной ее форме.

Трудно представить себе более разительное противоречие, чем противоречие между нею и атомной, или квантовой, теорией света, которая была набросана выше. Какая же из обеих теорий на самом деле справедлива и чем обуславливается возможность существования двух столь различных точек зрения на одни и те же явления?

На первый вопрос можно ответить следующее.

Волновая теория оказывается совершенно бессильной объяснить такие явления, как фотоэлектрический эффект или скачкообразное изменение энергии атомов при испускании или поглощении света. Эти явления говорят весьма красноречиво в пользу теории световых снарядов (квантов).

С другой стороны, однако, квантовая теория света не может объяснить ряда явлений, о которых мы умалчивали при ее изложении и открытие которых фактически привело в начале XIX в. к ее упразднению и замене волновой теорией. К этим явлениям относятся главным образом явления интерференции и дифракции света. Сущность этих явлений, которые наблюдаются также в случае звуковых волн или волн на поверхности воды — вообще при всяком волнообразном колебательном движении, заключается в следующем. Если из снопа лучей, расходящихся от какого-либо источника, выделить два различных пучка и заставить их (путем, например, отражения от двух зеркал) вновь соединиться на каком-нибудь экране, то на последнем получается вместо однородного освещения чередование светлых и темных полос — интерференционные полосы. Образование этих полос волновой теорией объясняется чрезвычайно просто. А именно, при наложении друг на друга систем волн одинаковой длины может произойти как увеличение колебаний, если гребни и впадины одной системы совпадают, соответственно, с гребнями и впадинами другой, так и ослаб-

ление их или даже полное уничтожение, если гребни одной системы совпадают с впадинами другой. Дифракция света тесно связана с интерференцией и заключается в отклонении световых лучей при прохождении через узкое отверстие или при падении на очень маленький предмет от прямолинейного распространения. В первом случае параллельный пучок лучей превращается в расходящийся, а во втором — свет как бы огибает непрозрачный предмет и попадает в область геометрической тени. Оба явления легко объясняются волновой теорией, если размеры отверстия или непрозрачного предмета близки к длине волн.

С точки зрения атомной теории света явления дифракции и интерференции представляются совершенно необъяснимыми.

Второй вопрос — о соответствии между волновой и атомной теорией света — может быть решен следующим образом. Общим для обеих теорий понятием является понятие лучей. В одном случае лучи представляют собой пути световых снарядов, а во втором — линии, в направлении которых распространяются волны. Интенсивности волн, т. е. энергии световых колебаний, соответствует в квантовой теории число световых снарядов, пролетающих через какую-нибудь площадку в единицу времени. Наконец, длине волн и частоте колебаний соответствует калибр световых снарядов. Именно этот калибр, измеренный, например, по энергии электронов, вырывааемых светом, оказывается пропорциональным «частоте колебаний» волновой теории, т. е. тем большим, чем меньше длина световых волн (измеренная, например, интерференционным способом).

Если в случае видимого света альтернатива между волновой и атомной теориями не может быть решена бесспорным образом, то для радиодиапазона поле сражения остается без всяких сомнений за волновой теорией; было бы нелепо вводить представление о чрезвычайно маленьких радиоснарядиках там, где мы непосредственно наблюдаем лишь радиоволны. А тот факт, что свет распространяется с той же скоростью, как и радиоволны, красноречиво свидетельствует о принципиальном тождестве между обоими явлениями. Отвергнув мысль о радиоснарядиках, мы должны поэтому, казалось бы, отвергнуть мысль об атомах света. Но тогда как же быть с фотоэлектриче-

ским эффектом и со скачкообразным изменением свойств атомов и молекул при испускании и поглощении света?

### § 3. ВОЛНЫ МАТЕРИИ

Изумительный по своей простоте и неожиданности ответ на этот вопрос был найден в последние годы французским физиком Л. де Бройлем и немецким Э. Шредингером. Сущность этого ответа заключается в том, что они отбрасывают представления о каких-либо частицах не только в отношении света, но и в отношении материи, и рассматривают материальные тела не как совокупности элементарных частиц, а как особого рода колебания или волны, более или менее аналогичные световым, но, конечно, совершенно иного рода.

Мысль эта была подсказана наличием только что рассмотренного соответствия между частицами и световыми волнами. Если в этом случае подлинной реальностью являются волны, а частицы представляют собой лишь видимость, то нельзя ли и частицы обыкновенной материи и прежде всего простейшие из материальных частиц (электроны) рассматривать как некоторую видимость, которой соответствуют в качестве подлинной реальности какие-то материальные, в частности электронные, волны?

Мысль эта может показаться на первый взгляд несколько дикой. Мы сможем, однако, легче освоиться с ней, если вспомним, при каких обстоятельствах были впервые открыты электроны.

Электроны были открыты в конце 80-х годов английским физиком В. Круксом в форме так называемых катодных лучей, т. е. каких-то лучей, распространяющихся вдоль прямых линий от катода или от отрицательного полюса разрядной трубки. Самое название лучей указывает на сходство вновь открытого явления со светом. Надо, впрочем, заметить, что это сходство ограничивалось вначале лишь прямолинейностью распространения. Дальнейшие опыты показали, что катодные лучи, в противоположность световым, отклоняются под влиянием электрических и магнитных сил, а при падении на какие-либо тела действуют на них таким образом, как если бы они представляли собой поток быстро несущихся снаря-

диков, обладающих некоторой массой и вполне определенным электрическим зарядом отрицательного знака. В то время фотоэлектрический эффект и сходные с ним явления еще не были известны (их изучение только-только началось). Мысль об атомах света в старом ньютоновском смысле давным-давно уже была похоронена и забыта. Таким образом, никому не приходило в голову, что быстро несущиеся снарядики, якобы образующие катодные лучи, могут являться видимостью, подобной световым квантам, и что наличие подобной видимости ни в коем случае не опровергает существования соответствующей ей реальности в виде особых катодных волн. После того что было сказано в двух предыдущих главах, мы не имеем никакого основания отвергать эту гипотезу. Правда, между световыми квантами и катодными квантами, т. е. электронами, имеется одно важное различие. В то время как существование первых чрезвычайно эфемерно и ограничивается путешествием от утробы материнского атома до утробы поглотителя, вторые, т. е. катодные кванты, обладают как будто бы неразрушимостью, вечностью, свойственной истинной материи<sup>1</sup> и выражающейся, между прочим, в наличии у них неизменного электрического заряда. Это обстоятельство не имеет, однако, принципиального значения. Шредингеру удалось установить уравнение, которым определяется распространение катодных волн в пространстве. В первом приближении это уравнение совпадает с тем, которым до сих пор определялось движение потока заряженных частиц под действием данных сил. Если при этом число частиц, как и в случае световых снарядиков, считать пропорциональным интенсивности (энергии) соответствующих колебаний, то оно оказывается строго постоянным в противоположность тому, что имеет место в случае света.

Изложенные представления немедленно же нашли себе ряд непосредственных подтверждений сначала в фактах, уже ранее установленных, а затем и в ряде замечательных явлений, предсказанных новой теорией и обнаруженных на опыте. Эти явления совершенно подобны явлениям интерференции и дифракции света и так же необъяснимы с точки зрения существования катодных частиц, как указанные явления с точки зрения существования световых квантов. Так, например, при прохождении катодных лучей через маленькие кристаллы ка-



кого-либо вещества, наряду с главным катодным пучком, прошедшим без изменения своего направления, получается ряд рассеянных, т. е. отклоненных под определенным углом, пучков, распределение которых в пространстве совершенно такое же, как если бы мы имели дело не с катодными лучами, а с рентгеновыми лучами той же длины волны.\*

Наряду, однако, с подобными непосредственными самоочевидными подтверждениями, новые идеи о природе материи получили множество блестящих количественных доказательств, относящихся к описанию явлений испускания и поглощения света, а также ряда других атомных и молекулярных явлений.

При истолковании всех этих явлений оказывается необходимым рассматривать, наряду с «бегущими» электронными волнами, т. е. волнами, распространяющимися в определенном направлении или расходящимися во всех направлениях от кокой-либо точки, так называемые «стоячие» волны или колебания. Прототипом подобных колебаний могут служить колебания струны, мембраны или металлической пластинки, а равным образом и всякого иного упругого твердого тела ограниченных размеров с одной или несколькими закрепленными точками. Согласно новой волновой механике, материальные атомы аналогичны подобным вибрирующим упругим телам с той, однако, разницей, что размеры их остаются принципиально неограниченными. Нормальное состояние атома соответствует наиболее медленной из всех возможных вибраций.

В этом смысле оно подобно основному колебанию струны, при котором последняя колеблется как одно целое, испуская характерный для нее основной тон. Наряду с этим основным колебанием, струна может совершать колебания более быстрые, при которых она разбивается на две, три и более самостоятельно вибрирующие части (обертоны). То же самое относится и к тем вибрациям, которые происходят в атомах материальных тел или,

---

\*Длина катодных волн, как показал еще де Бройль, может быть вычислена из скорости  $v$  электронов, которые им соответствуют, по формуле  $\lambda = \frac{h}{mv}$ , где  $m$  — масса электрона, а  $h$  — так называемая постоянная Планка.

вернее, которыми образуются эти атомы. Соответствующие этим колебаниям тоны имеют чрезвычайно высокую частоту, гораздо большую, нежели частота самых крайних рентгеновых лучей. Они, разумеется, не только не слышимы, но и не видимы, т. е. не обнаруживаются непосредственно в форме световых колебаний. Последнее получается при одновременном «звучании» двух или более различных тонов, например основного тона и одного из обертонов, причем световые колебания обуславливаются возникающими при таких условиях биениями — сравнительно медленными периодическими усилениями и ослаблениями результирующих колебаний. Напомним, что частота биений (число биений в секунду) равна разности частот обоих типов.

Таким образом, представление квантовой теории света и боровской теории строения атомов, согласно которому испускание света происходит в форме кванта при перескоке атома из одного состояния в другое с меньшей энергией, заменяется в волновой механике Шредингера представлением о непрерывном световом излучении, обусловленном сложением двух или нескольких характерных для данного атома вибраций с различными частотами.

При падении световых волн на какой-либо другой атом, находящийся в нормальном состоянии, т. е. совершающий лишь свою основную вибрацию, в последнем могут возбуждаться (в особенности при наличии резонанса) различные обертоны. В этом заключается сущность поглощения света. Если частота падающего света выше всех тех резонансных частот, которые соответствуют биениям между основным тоном и обертонами рассматриваемого атома, то в последнем вместо новых стоячих волн возбуждаются бегущие волны, т. е. волны, расходящиеся во все стороны и представляющие собой сущность фотоэлектрического эффекта — испускания электронов под действием света.

Все эти достижения, число которых непрерывно умножается, поставили вне всяких сомнений справедливость основных представлений волновой механики и ее математического остова. В ней остается, однако, еще большое число неясностей. Особенно не ясен вопрос о характере волнового процесса, соответствующего взаимодействию нескольких электронов. Оставляя эти неясности без рас-

смотрения, я останавлиюсь в заключение на одном принципиально важном вопросе.

Атомные представления о материи и свете являются неполным отображением представлений волновых хотя бы уже потому, что такие фундаментальные явления, как интерференция и дифракция, оказываются совершенно непостижимыми с точки зрения первых представлений, между тем как они чрезвычайно просто объясняются вторыми.

Результатом этой неполноты атомистических представлений является неполнота соответствующих им закономерностей, выражающаяся в появлении в этих закономерностях некоторого элемента неопределенности, именуемого в физике вероятностью. Эта неопределенность выражается следующим принципом, сформулированным молодым немецким физиком В. Гейзенбергом, который, кстати, является одним из основателей новой механики: если точно известно положение в пространстве какой-либо частицы (электрона или светового кванта), то скорость ее может быть определена лишь с некоторой долей вероятности; и наоборот, если точно известна скорость, то положение частицы в пространстве может быть определено лишь с некоторой долей вероятности. В последнем случае мерой этой вероятности и является интенсивность соответствующих волн. Если, следовательно, мы знаем, где находится какая-либо частица в данный момент времени, то мы не можем сказать с уверенностью, где она будет находиться в последующие моменты. Все положения оказываются возможными, хотя и неодинаково вероятными; частицы, так сказать, «расплываются» при своем движении. Это «расплывание» происходит тем быстрее, чем меньше масса частицы. Оно чрезвычайно велико для световых квантов, гораздо меньше, но все же очень велико для отдельных электронов и ничтожно мало для обыкновенных тел, даже для микроскопических, не говоря уже об астрономических. При обычных условиях мы наблюдаем явления, в которых участвует очень большое число частиц. При этом мы замечаем лишь некоторые средние величины, которые подчиняются вполне определенной статистической закономерности. Эта закономерность не содержит в себе никаких следов той неопределенности, которая характеризует отдельные частицы. Совершенно аналогичные соотношения мы наблюда-

даем при статистическом обследовании человеческого общества; получаемые средние результаты совершенно не зависят от «свободы воли» отдельных индивидуумов. Вот почему мы можем описывать большинство физических явлений в атомистических терминах, не рискуя ошибиться в наших выводах и предсказаниях. И лишь в тех случаях, когда мы пытаемся подойти к индивидууму (атомам материи, электричества и света), мы теряем почву под ногами и оказываемся вынужденными трактовать эти «индивидуумы» не как частицы, но как особого рода волны.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОВЫХ АТОМОВ (КВАНТОВ)

### § 1. МАССА И ВЕС СВЕТОВЫХ АТОМОВ

**В** 1905 г., после почти полуторавекового забвения, ньютоновская гипотеза «истечения света» вновь появилась на физической арене. Весьма замечательно, что продолжателем Ньютона и здесь, так же как и в механике (включая и теорию тяготения), явился Эйнштейн. Правда, новая корпускулярная теория света возрождала ньютоновскую теорию в несколько преобразованном виде. А именно, в то время как в теории Ньютона световые атомы трактовались как частицы некоторой материи и соответственно этому обладали основным принципом материальности — неразрушимостью<sup>1</sup>, в теории Эйнштейна они получили новый, совершенно своеобразный смысл — атомов, или «квантов», энергии. Световые кванты Эйнштейна, в противоположность материальным частицам, могут создаваться и исчезать за счет механической энергии испускающих их атомов или, так сказать, «в пользу» механической энергии атомов, их поглощающих. При этом энергия светового кванта  $\epsilon$  представляет собой меру той величины  $\nu$ , которая на языке волновой теории называется частотой света, т. е. числом колебаний в секунду. Соотношение между этими двумя величинами выражается известной формулой

$$\epsilon = h\nu, \quad (1)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Теория Ньютона занималась главным образом вопросом о распространении света и, в частности, отражением и преломлением световых лучей на границе двух сред, которые при этом трактовались как сплошные, лишенные внутреннего строения тела. Эта макроскопическая точка зрения уступила место в теории Эйнштейна микроскопической; в связи с этим, а также в связи с «нематериальностью» световых атомов новая оптика занялась главным образом вопросом об испускании (создании) и поглощении (уничтожении) этих атомов. Что же касается вопроса об их распространении, то он был разрешен весьма просто: при отсутствии сил тяготения световые кванты движутся прямолинейно и равномерно с предельной скоростью  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Само собой разумеется, что при этом речь идет о движении в пустоте от одного атома (испускающего) к другому (поглощающему). В поле тяготения движение светового кванта совпадает с движением материальной частицы, имеющей ту же самую предельную скорость. Последний принцип вытекает из того факта, что движение какой-либо частицы в поле тяжести не зависит от массы этой частицы. Поэтому представляется вполне естественным допущение, что законы, установленные для движения материальных частиц в поле тяжести, остаются в силе и по отношению к любым частицам, поскольку последние обладают массой. Согласно же общему принципу, установленному Эйнштейном на основании теории относительности, масса и энергия — понятия эквивалентные, так что световой квант, обладающий энергией  $\epsilon$ , обладает вместе с тем массой

$$m = \frac{\epsilon}{c^2}. \quad (2)$$

В эйнштейновской теории световые атомы, как и у Ньютона, столь же весомы, как и атомы материальные. Эта весомость света проявляется наиболее непосредственным и наглядным образом в отклонении, которое испытывают лучи, испускаемые звездами, при прохождении около солнечного диска.

Не останавливаясь на строгом выводе величины этого отклонения, основанном на эйнштейновской механике и теории тяготения, мы приведем расчет, основанный на теории Ньютона.

Представим себе, что при отсутствии сил тяготения световой квант двигался бы равномерно по прямой  $MN$  со скоростью  $c$ . Под влиянием поля тяготения, исходящего из центра  $S$  (Солнце), путь кванта искривляется, принимая вид  $MN'$ . Вследствие чрезвычайной малости этого отклонения (угол  $\alpha$ ) при вычислении его можно оперировать с силой, действующей на квант при невозмущенном движении вдоль прямой  $MN$ . В точке  $Q$  на единицу массы действует сила  $\frac{k}{r^2}$ , где  $k$  — постоянная, а  $r = SQ$ ; поперечная составляющая этой силы (перпендикулярная к  $MN$ ) равна  $\frac{k \sin \varphi}{r^2}$  ( $\varphi = \angle SQN$ ). Обозначая соответствующую (поперечную) составляющую скорости кванта через  $v$ , имеем равенство

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k}{r^2} \sin \varphi.$$

Если  $r_0 = SP$  есть ближайшее расстояние световой частицы от притягивающего центра, а  $(-x) = QP$  — расстояние ее от точки  $P$ , то из треугольника  $SQP$  получаем

$$r = \frac{r_0}{\sin \varphi}, \quad -x = r_0 \operatorname{ctg} \varphi$$

и далее

$$dx = c dt = \frac{r_0}{\sin^2 \varphi} d\varphi.$$

Предыдущее уравнение превращается, следовательно, в

$$\frac{c \sin^2 \varphi}{r_0} \frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{r_0^2} \sin^3 \varphi,$$

т. е. в

$$\frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{cr_0} \sin \varphi.$$

Полая величина поперечной скорости, приобретаемой световой частицей на всем ее пути  $MN'$  (или  $MN$ ), получается интегрированием правой части этого уравне-

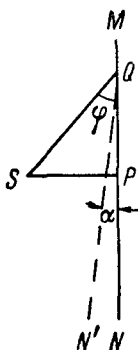


Рис. 1.

ния от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \pi$ . Таким образом, окончательно получаем  $v = \frac{2k}{cr_0}$  и для углового отклонения

$$\alpha = \frac{v}{c} = \frac{2k}{c^2 r_0}.$$

На самом деле, отклонение световых лучей как в теории, так и на опыте оказывается вдвое бóльшим. Предыдущая формула дает для него во всяком случае правильный порядок величины и надлежащую зависимость от расстояния  $r_0$ .

## § 2. ЭНЕРГИЯ И КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ И ВОЛН

В механизме Ньютона масса считалась основным признаком материи, неизменным свойством всякой материальной частицы. Результатом этого представления явилось весьма распространенное (даже поныне) отождествление понятий материи и массы. В механике Эйнштейна эти понятия, так сказать, оторвались друг от друга, причем понятие массы оказалось непосредственно связанным не с понятием материи, но с понятием энергии согласно формуле (2). В случае элементарных частиц материи (электронов) роль массы как основного «инвариантного» признака материи перешла к электрическому заряду. Впрочем, в один ряд с последним стала так называемая покоящаяся масса  $m_0$ , т. е. масса частицы в состоянии покоя. Масса частицы, движущейся со скоростью  $v$  ( $< c$ ), выражается через эту покоящуюся массу формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Соответственно этому для энергии  $\epsilon = mc^2$  получается выражение, которое при малости  $v$  в сравнении с  $c$  принимает вид

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2,$$

где  $\frac{1}{2} m_0 v^2$  представляет собой обычную кинетическую энергию частицы (в механике Ньютона), а  $m_0 c^2$  — ее



«внутреннюю энергию», происхождение и сущность которой остаются пока неизвестными.

Необходимо отметить, что масса, определяемая формулой (3), трактуется в теории относительности не как отношение между силой  $\mathbf{F}$  и ускорением  $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$ , но как коэффициент при скорости в выражении количества движения частицы

$$\mathbf{g} = m\mathbf{v}, \quad (3a)$$

так что уравнение движения имеет вид

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F}, \text{ а не } m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F},$$

как в механике Ньютона. Правда, второй закон Ньютона в «Началах» текстуально выражен именно в первой форме, но фактически эта значительно более широкая формулировка им никогда не применялась.

Если в формуле (3) положить  $v=c$  и  $m_0=0$ , то она превращается в неопределенность вида  $m=\frac{0}{0}$ . Это обстоятельство показывает, что в рамках теории относительности вполне мыслимо существование частиц, движущихся со скоростью света и имеющих тем не менее конечную массу и, следовательно, конечную энергию  $\epsilon$ . Подобными частицами и являются световые кванты. В отличие от обыкновенных материальных частиц они не обладают покоящейся массой, а также лишены заряда. Они существуют постольку, поскольку движутся со скоростью  $c$ . Остановка означает для них исчезновение. Не обладая неразрушимостью, характеризующей частицы материи, они должны трактоваться как частицы «нематериальные» — как атомы энергии.

Применяя это представление к световым квантам, мы должны, очевидно, наделить их, наряду с энергией (1) и массой (2), еще количеством движения

$$\mathbf{g} = m\mathbf{c} = m\mathbf{c}\mathbf{n} = \frac{\epsilon}{c} \mathbf{n} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{c} = c\mathbf{n}$ , а  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  — величина, которая на языке волновой оптики означает длину волны.

Соотношение (4) находится в полном соответствии не только с механикой Эйнштейна, но и с электродинамикой, точнее, с электромагнитной теорией света. В классической электродинамике энергия трактуется как некоторая непрерывная субстанция, разлитая в пространстве, с объемной плотностью

$$\eta = \frac{1}{8\pi} (E^2 + H^2),$$

где  $E$  — напряженность электрического, а  $H$  — магнитного полей. Этому представлению об энергии соответствует представление о количестве движения, объемная плотность которого определяется векторным произведением  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  по формуле

$$\mathbf{g} = \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \mathbf{H}.$$

При этом оказывается необходимым дополнить понятие об энергии понятием о потоке энергии, определяемым вектором Пойнтинга  $\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ . Сравнение последнего с вектором  $\mathbf{g}$  приводит к соотношению  $\mathbf{g} = \frac{1}{c^2} \mathbf{S}$ , которое в известном смысле соответствует выражению (2) между энергией и массой. Это соответствие становится полным в том случае, если поток энергии может быть представлен в виде  $\mathbf{S} = \eta \mathbf{c}$ , где  $\mathbf{c}$  — вектор, численно равный скорости света. В таком случае для плотности электромагнитного количества движения получается формула  $\mathbf{g} = \frac{\eta}{c^2} \mathbf{c}$ , из которой явствует, что величину  $\mu = \frac{\eta}{c^2}$  следует трактовать как обыкновенную плотность, т. е. плотность массы. В действительности соотношение  $\mathbf{S} = \eta \mathbf{c}$  в точности выполняется лишь для плоских электромагнитных волн или приблизительно на больших расстояниях от источников поля. А именно, в этом случае, как известно, векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  численно равны и перпендикулярны как друг к другу, так и к направлению распространения волн. Характеризуя это направление, соответствующее направлению векторного произ-

ведения  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ , единичным вектором  $\mathbf{n}$ , мы имеем

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \frac{c}{4\pi} E^2 \mathbf{n} = \frac{c}{8\pi} (E^2 + H^2) \mathbf{n} = \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \mathbf{c},$$

где  $\mathbf{c} = c\mathbf{n}$ , т. е.  $\mathbf{S} = \eta\mathbf{c}$ .

Таким образом, поскольку дело касается распространения света в пустоте, различие между электромагнитной (волновой) теорией и квантовой теорией Эйнштейна сводится к тому, что в первой световая энергия представляется распределенной в пространстве непрерывно, а во второй — сконцентрированной практически в отдельных точках или весьма малых элементах объема.

Это различие имеет двойное значение. Во-первых, оно означает, что атомы могут терять энергию (при излучении света) или приобретать ее (при поглощении) лишь определенными конечными порциями, а не непрерывно, как это предполагала классическая теория. Во-вторых, из него следует, что при излучении света, так же как и при его поглощении, мы имеем дело с направленным актом — эйнштейновское «Nadelstrahlung» (игольчатое излучение (нем.), — В. Ф.). Применяя к этому акту закон сохранения количества движения, мы приходим к выводу, что при испускании света частоты  $\nu$  в виде кванта с энергией  $h\nu$  и количеством движения  $\frac{h\nu}{c}$  атом должен испытывать толчок в обратную сторону, получая при этом количество движения  $\left(-\frac{h\nu}{c}\right)$  («световая отдача»). Наоборот, при поглощении указанного кванта количество движения последнего наравне с его энергией сообщается соответствующему атому.

Эти представления необходимо дополнить еще одним положением, основанным на аналогии между квантовой и волновой теориями. Согласно последней, поглощение света происходит следующим образом. Электрическая сила падающих волн (напряженность электрического поля волны  $E$ ) вызывает в атомах колебательное движение электронов. Это колебательное движение вызывает в свою очередь вторичные электромагнитные волны. Если энергия атома возрастает, т. е. амплитуда вынужденных электронных колебаний увеличивается, то вторичные электрические силы оказываются противополо-

ложными первичным и ослабляют их. При этом атом испытывает положительное световое давление, направленное в сторону распространения волн. Если, наоборот, энергия атома убывает, т. е. амплитуда электронных колебаний уменьшается, то вторичные электрические силы совпадают по направлению с первичными и их увеличивают; при этом атом испытывает отрицательное световое давление, противоположное направлению распространения волн. Это соотношение непосредственно вытекает из формулы  $g = \frac{S}{c^2}$ , связывающей поток энергии с плотностью электромагнитного количества движения. Оно было сохранено Эйнштейном и в его квантовой теории света. А именно, наряду с обыкновенным поглощением кванта, он ввел в рассмотрение так называемое отрицательное поглощение или вынужденное испускание, при котором квант света не поглощается атомом, но выходит из него вкупе с другим квантом той же величины и направления, испущенным самим атомом. При этом последний, так же как и при обыкновенном «спонтанном» излучении, испытывает толчок в сторону, обратную испусканию кванта, получая количество движения  $-\frac{h\nu}{c}$ .

### § 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА

Нетрудно показать, что эти представления в связи с соотношением (1) приведут к тем же формулам для эффекта Доплера, что и волновая теория света.

Представим себе атом с массой  $M$ , движущейся по отношению к рассматриваемой координатной системе со скоростью  $v$  (последнюю мы будем предполагать малой в сравнении со скоростью света). Предположим, что атом обладает некоторой внутренней энергией  $\epsilon_0$ , которую он, оставаясь в покое, должен был бы излучить в виде кванта с частотой  $\nu_0 = \frac{\epsilon_0}{h}$ . Наряду с этой внутренней энергией, он обладает кинетической энергией  $\frac{1}{2}Mv^2$ . Испускание света связано не только с потерей внутренней энергии, но также с изменением кинетической. Таким образом, частота испускаемого кванта  $\nu$

должна отличаться от величины  $\nu_0$ . Обозначив скорость атома после испускания через  $\nu'$ , на основании закона сохранения энергии имеем

$$\frac{1}{2} M\nu^2 + \varepsilon_0 = \frac{1}{2} M\nu'^2 + h\nu.$$

С другой стороны, из закона сохранения количества движения вытекает равенство

$$M\mathbf{v} = M\mathbf{v}' + \frac{h\nu}{c}.$$

Комбинируя его с предыдущим и замечая, что

$$\nu^2 - \nu'^2 = (\mathbf{v} + \mathbf{v}')(\mathbf{v} - \mathbf{v}'),$$

получаем

$$\frac{1}{2} (\mathbf{v} + \mathbf{v}') \frac{h\nu}{c} = h\nu - h\nu_0$$

или, так как

$$\frac{1}{2} (\mathbf{v} + \mathbf{v}') = \mathbf{v} - \frac{1}{2} (\mathbf{v} - \mathbf{v}') = \mathbf{v} - \frac{1}{2M} \frac{h\nu}{c},$$

$$\mathbf{v} \frac{h\nu}{c} - \frac{1}{2M} \left( \frac{h\nu}{c} \right)^2 = h\nu - h\nu_0.$$

Обозначая угол между направлением начальной скорости и направлением выброшенного кванта через  $\varphi$ , для определения зависимости  $\nu$  от  $\varphi$  окончательно получаем следующее уравнение:

$$\nu_0 = \nu \left( 1 - \frac{v}{c} \cos \varphi + \frac{h\nu}{2Mc^2} \right), \quad (5)$$

которое в первом приближении, если пренебречь весьма малым при обычных условиях членом  $\frac{h\nu}{2Mc^2}$ , превращается в известное уравнение Допплера для частоты света, испускаемого движущимся источником. Совершенно аналогичным образом можно вычислить эффект Допплера для частоты света, поглощаемого движущимся атомом. Для этого нужно лишь в предыдущем расчете рассматривать  $\nu$  как частоту падающего света,  $\mathbf{v}'$  — как начальную,  $\mathbf{v}$  — как конечную скорость и, наконец,

угол  $\varphi$  между  $\mathbf{v}$  и  $\frac{h\nu}{c}$  заменить углом  $\varphi'$  между  $\mathbf{v}'$  и  $\frac{h\nu'}{c}$ . Полагая в этом случае

$$\frac{1}{2}(\mathbf{v} + \mathbf{v}') = \mathbf{v}' + \frac{1}{2}(\mathbf{v} - \mathbf{v}') = \mathbf{v}' + \frac{1}{2M} \frac{h\nu}{c},$$

получаем

$$\mathbf{v}' \frac{h\nu'}{c} + \frac{1}{2M} \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 = h\nu - h\nu_0,$$

т. е. вместо (5)

$$\nu_0 = \nu \left(1 - \frac{v'}{c} \cos \varphi' - \frac{h\nu}{2Mc^2}\right). \quad (5a)$$

Поглощение света может быть связано с расщеплением атома на две самостоятельные движущиеся части: положительный ион и отрицательный электрон (фотоэлектрический эффект). Считая атом неподвижным, т. е. пренебрегая явлением Допплера, мы получаем в этом случае известное уравнение Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта

$$h\nu = \frac{1}{2} m v^2 + \varepsilon,$$

где  $m$  — масса,  $v$  — скорость фотоэлектрона, а  $\varepsilon$  — работа, необходимая для его вырывания из атома. При этом  $v$  предполагается малым в сравнении с  $c$ ; точное же выражение для кинетической энергии имеет вид

$$c^2(m - m_0) = c^2 m_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

В случае действия света на свободный электрон, т. е. систему, внутренняя энергия которой  $m_0 c^2$  остается неизменной, полное исчезновение кванта, т. е. превращение его энергии и количества движения нацело в энергию и количество движения электрона, оказывается невозможным. Так, например, если считать электрон до столкновения с квантом неподвижным, то после столкновения он должен был бы получить кинетическую

энергию  $c^2(m - m_0) = h\nu$  и количество движения  $m\mathbf{v} = \frac{h\nu}{c}$ . Отсюда вытекало бы соотношение

$$\frac{v}{c} = \frac{m - m_0}{m} = 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

т. е.

$$\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Это уравнение имеет два решения:  $v = c$  и  $v = 0$ ; оба они, очевидно, лишены физического смысла.

В рассматриваемом случае, как показали Комптон и Дебай, происходит рассеяние света; отдав часть своей энергии и своего количества движения электрону, квант как бы отскакивает от него, имея при этом несколько меньшую частоту  $\nu'$  и новое направление движения. Это уменьшение частоты колебаний, связанное с рассеянием света свободными электронами, и составляет сущность эффекта Комптона. Заметим, что подобное понижение частоты происходит лишь в том случае, если электрон находится первоначально в покое. В общем случае оно осложняется явлением Допплера и при известных условиях может даже замениться увеличением частоты рассеянного кванта.

Обозначим скорость электрона до столкновения с квантом через  $v_1 = c\beta_1$ , а после столкновения — через  $v_2 = c\beta_2$ ; частоты падающего и рассеянного кванта обозначим через  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Предположим далее, что первоначальное направление кванта совпадает с осью  $X$ , косинусы углов, образуемых рассеянным квантом с прямоугольными осями  $X, Y, Z$ , обозначим через  $p, q, r$ , а соответствующие косинусы для векторов  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$  — через  $a_1, b_1, c_1$  и  $a_2, b_2, c_2$ .

В таком случае закон сохранения энергии выразится уравнением

$$h\nu_1 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} = h\nu_2 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \beta_2^2}},$$

а закон сохранения количества движения уравнениями

$$\frac{h\nu_1}{c} + \frac{m_0\beta_1c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} a_1 = \frac{h\nu_2}{c} p + \frac{m_0\beta_2c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} a_2,$$

$$\frac{m_0 \beta_1 c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} b_1 = \frac{h\nu_2}{c} q + \frac{m_0 \beta_2 c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} b_2,$$

$$\frac{m_0 \beta_1 c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} c_1 = \frac{h\nu_2}{c} r + \frac{m_0 \beta_2 c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} c_2.$$

Если из этих уравнений исключить косинусы  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  (пользуясь соотношением  $a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 = 1$ ), а также величину  $\beta_2$ , и ввести обозначения  $a_1 = \cos \theta_1$ ,  $p = \cos \theta$  и  $a_1 p + b_1 q + c_1 r = \cos \varphi$  ( $\varphi$  — угол между  $\frac{h\nu_2}{c}$  и  $v_1$ ), то получится следующая формула:\*

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 - \beta_1 \cos \theta_1}{1 - \beta_1 \cos \varphi + 2\alpha \sqrt{1 - \beta_1^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}}, \quad (6)$$

где для краткости положено

$$\alpha = \frac{h\nu_1}{m_0 c^2}.$$

В случае покоящегося электрона ( $\beta_1 = 0$ ) предыдущая формула превращается в известную формулу Дебая—Комптона

$$\nu_2 = \nu_1 / (1 + 2\alpha \sin^2 \theta/2). \quad (6a)$$

Пренебрегая величиной  $\alpha$ , которая характеризует эффект Комптона, мы получаем изменение частоты, обусловленное двойным эффектом Доплера, ибо электрон как бы одновременно поглощает свет и вновь его испускает:

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 - \beta_1 \cos \theta_1}{1 - \beta_1 \cos \varphi}. \quad (6б)$$

Мы должны упомянуть еще об одном применении эйнштейновской теории излучения, а именно, о применении ее к вопросу о тепловом равновесии между материей и излучением. Взаимодействие между атомами материи и атомами света должно быть таково, чтобы первые даже при отсутствии столкновений между собой имели в среднем кинетическую энергию  $\frac{3}{2} kT$ , где  $T$  — абсолютная температура.

\* См L de Broglie These, Annales de Physique, 3, 22, 1925



Действительно, расчет, который мы не имеем возможности воспроизвести в этой статье,\* показывает, что толчки, испытываемые атомами при испускании или поглощении световых квантов, сообщают им кинетическую энергию вышеуказанной величины. При этом необходимо исходить из спектрального распределения световой энергии, определяемого известной формулой Планка.

#### § 4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ

Мы видели (§ 2), что механические свойства световых квантов — энергия, масса, количество движения — присущи также и электромагнитным волнам, которые они в известном смысле заменяют. Однако эти механические величины являются, так сказать, лишь вторичными, производными свойствами электромагнитных волн. Основными величинами, которыми эти волны характеризуются, являются электрическое и магнитное напряжения. Что же соответствует этим напряжениям в случае световых квантов? Нетрудно видеть, что этот вопрос может быть перефразирован следующим образом: какими свойствами необходимо наделить кванты для того, чтобы они могли выполнять функции поляризованных световых лучей?

Представим себе сначала, что мы имеем дело с прямолинейно поляризованным светом. В этом случае, согласно волновой теории, электрический и магнитный векторы колеблются в двух неизменных направлениях, перпендикулярных как друг к другу, так и к самим лучам. Эти направления могут быть обнаружены экспериментально, например, по направлению, в котором выбрасываются фотоэлектроны. Как известно, максимальное количество последних приходится на направление, соответствующее электрическому вектору. Если мы хотим трактовать фотоэлектрический эффект как результат поглощения световых квантов, мы должны наделить последние некоторым векторным свойством, соответствующим электрическому напряжению. Простейшим свойством этого рода является электрический момент.

---

\* См замечательную работу Эйнштейна, опубликованную в *Phys Zs (A Einstein Phys Zs 18, 121, 1917)*<sup>2</sup>

Естественно поэтому предположить, что световой квант ведет себя как элементарный диполь, т. е. совокупность двух электрических зарядов противоположного знака.\* Электрический момент кванта, характеризующего прямолинейно поляризованный свет, мы будем трактовать как постоянный вектор, а не как колеблющуюся величину, подобно электрическому напряжению, которое или, вернее, амплитуду которого он, так сказать, «представляет». Численное значение этого вектора  $p$  мы оставим пока неопределенным.

Точно так же магнитное напряжение световой волны может быть представлено в квантовой теории света магнитным моментом кванта  $\mu$ , перпендикулярным к электрическому и численно ему равным. Оба вектора  $p$  и  $\mu$  должны быть перпендикулярны к направлению движения кванта. Причем это движение происходит в ту сторону, куда движется правый винт, вращаемый от  $p$  к  $\mu$ .

Оставляя вопрос о том, каким образом наличие электрического и магнитного моментов сообщает световому кванту способность к направленному (по отношению к одному из них) действию на материальные частицы, мы попытаемся вкратце осветить другой, чисто формальный, вопрос — о совместимости предыдущего представления с требованиями теории относительности.

В теории относительности электрическое и магнитное напряжения объединяются в единую четырехмерную величину с 6 различными составляющими («шестивекторы»)  $F_{\alpha\beta} = -F_{\beta\alpha}$  ( $\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4$ ) по следующей схеме:

$$\begin{matrix} F_{23} \\ H_1 \end{matrix} \left| \begin{matrix} F_{31} \\ H_2 \end{matrix} \right| \begin{matrix} F_{12} \\ H_3 \end{matrix} \left| \begin{matrix} F_{14} \\ -iE_1 \end{matrix} \right| \begin{matrix} F_{24} \\ -iE_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} F_{34} \\ -iE_3 \end{matrix} \right|$$

где значки 1, 2, 3 относятся к трем взаимно перпендикулярным пространственным осям, а 4 — к оси времени, умноженного на  $c\sqrt{-1} = ic$ . При этом электрическое и магнитное напряжения не являются сами по себе инвариантными величинами; они зависят от выбора координатной системы, в которой определяются. Предположим, например, что в некоторой «покоящейся» координатной системе  $K^0$  магнитное напряжение равно нулю, а электрическое —  $\mathbf{E}^0$ . Рассматривая то же самое поле

\* Эта задача была сформулирована проф. П. Эренфестом.

с точки зрения другой системы  $K$ , по отношению к которой  $K^0$  движется с постоянной скоростью  $\mathbf{v}$ , наряду с некоторым электрическим полем  $\mathbf{E}$ , слегка отличным от  $\mathbf{E}^0$ , мы получаем магнитное поле, определяемое формулой

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{E}.$$

В первом приближении, т. е. с точностью до величины порядка  $\frac{v}{c}$ ,  $\mathbf{E}$  совпадает при этом с  $\mathbf{E}^0$ .

Если, наоборот, в системе  $K^0$  магнитное напряжение  $\mathbf{H}^0$  отлично от нуля, а электрическое равно нулю, то в движущейся системе  $K$  мы получаем

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H}$$

при  $\mathbf{H}$ , совпадающем в первом приближении с  $\mathbf{H}^0$ .

Мы видим, следовательно, что электрическое и магнитное напряжения являются некоторой реальностью не сами по себе, но лишь взятые вместе: одно из них не может существовать без другого.

То же самое относится к тем величинам (электрическому и магнитному моменту), которые в атомной теории света представляют собой электрическое и магнитное напряжения. Электрический и магнитный моменты не образуют самостоятельных реальностей, но имеют определенный инвариантный смысл лишь взятые вместе. Если в покоящейся системе  $K^0$  рассматриваемая частица представляет собой электрический диполь с моментом  $\mathbf{p}^0$ , то с точки зрения движущейся системы она ведет себя как комбинация электрического диполя с приблизительно тем же моментом  $\mathbf{p}$  и магнитного диполя с моментом

$$\boldsymbol{\mu} = -\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{p} \quad (7)$$

Наоборот, если в системе  $K^0$  частица ведет себя как магнитный диполь с моментом  $\boldsymbol{\mu}^0$ , то в системе  $K$  она приобретает, кроме того, свойства электрического диполя с моментом

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{v}}{c} \times \boldsymbol{\mu}, \quad (7a)$$

где  $\boldsymbol{\mu} \approx \boldsymbol{\mu}^0$ .

Представим себе теперь, что рассматриваемая частица движется со скоростью  $c$ . В этом случае соотношения (7) и (7а), которые, вообще говоря, т. е. при  $v < c$  — несовместимости друг с другом, могут быть выполнены одновременно. Для этого, как нетрудно убедиться, необходимо и достаточно, чтобы векторы  $\mathbf{p}$  и  $\boldsymbol{\mu}$  были численно равны друг другу, взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению движения. Мы получаем, таким образом, основываясь на теории относительности, то самое соотношение между электрическим и магнитным моментом световых квантов, которое необходимо для того, чтобы обеспечить соответствие между ними и волнами электромагнитной теории света.

Мы не будем углубляться здесь в исследование этого вопроса. Заметим лишь, что электрически поляризованный свет может быть представлен квантами с комплексными значениями векторов  $\mathbf{p}$  и  $\boldsymbol{\mu}$ . Во всяком случае можно думать, что все свойства света, не связанные с его колебательным характером, могут быть интерпретированы в терминах теории световых квантов. Что же касается колебательных свойств, т. е. характеризующей свет периодичности во времени и пространстве, то здесь квантовая теория является, по-видимому, бессильной и должна быть дополнена волновыми представлениями, как это сделано в теории Л. де Бройля, или даже, быть может, совершенно заменена ими в соответствии с волновой механикой Шредингера.

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

### І. ПРЕРЫВНОСТЬ МАТЕРИИ И МЕХАНИЧЕСКОЕ МИРОВОЗЗРЕНИЕ

Среди физиков, а отчасти и не физиков, весьма распространено противопоставление современной, или новой, физики, характерной для нашего века, старой, или классической, физике двух или трех предшествующих столетий. Это противопоставление имеет отнюдь не только хронологический смысл. Оно соответствует коренному отличию как в методах, так и в объектах исследования старой и новой физики. Сущность этого отличия заключается в том, что старая физика занималась исследованием макроскопических явлений, тогда как новая интересуется преимущественно явлениями микроскопическими, или элементарными.

Под макроскопическими явлениями в физике понимаются такие, в которых участвуют большие количества материи и энергии. Постепенно уточняя методы исследования, физика все более и более сокращала эти количества и, таким образом, приближалась к непосредственному наблюдению явлений микроскопических, или элементарных. На первый взгляд между первыми и последними должна была бы существовать лишь чисто количественная разница. В действительности, однако, в микроскопических явлениях постепенно обнаруживались такие свойства, которые отсутствовали или, вернее, не замечались в явлениях макроскопических, где они были затушеваны и не играли существенной роли.

Что же это за свойства?

Прежде всего, это свойства, которые выражаются понятием прерывности как по отношению к материи, так и по отношению к действиям, производимым и испытываемым ею.

Представления о прерывности материи, ее атомистической структуре, выдвигались и разрабатывались в порядке более или менее обоснованной гипотезы и классической физикой (не говоря уже о спекулятивных гипотезах античных философов).<sup>1</sup> Однако в макроскопических явлениях, экспериментально изучавшихся этой физикой, прерывность материи не обнаруживалась непосредственно. Поэтому, несмотря на всю простоту и убедительность, атомистическая гипотеза для многих скептиков или, вернее, эмпириков, вроде Маха, Оствальда и других, оставалась гипотезой вплоть до начала XX в., когда в физике впервые удалось непосредственно наблюдать эффекты, производимые отдельными частицами материи — атомами, ионами и электронами, и фактически сосчитать число последних в данном макроскопическом количестве вещества.

Заметим, что особенно большую роль в этом отношении сыграли явления броуновского движения, ионизации газов и радиоактивности. Броуновское движение, т. е. движение микроскопических (в обычном смысле этого слова) частиц, взвешенных в прозрачной жидкости или в газе, было известно уже с давних пор. Однако лишь в 1905 г. Эйнштейну удалось выяснить его природу и показать, что оно представляет собой не что иное, как тепловое движение взвешенных частиц, которые можно рассматривать как гигантские молекулы. Таким образом, перед экспериментальной физикой открылась возможность непосредственного изучения законов теплового движения молекул, правда, не настоящих молекул, невидимых даже в самый сильный микроскоп, но все же вполне подобных им по своему поведению. Сравнивая пространственное распределение броуновских частиц в поле тяжести с распределением молекул какого-либо газа (в обоих случаях плотность убывает с высотой, однако тем быстрее, чем больше масса частиц), Ж. Перрен смог определить массу обыкновенных молекул и отсюда вычислить число их в единице массы или объема.

Еще непосредственнее удалось обнаружить отдельные молекулы и атомы в связи с изучением явлений иониза-

ции газов и радиоактивности. Здесь эти частицы обнаруживаются в виде ионов, обладающих определенным электрическим зарядом. Последний делает их несравненно более заметными. Среди огромной массы нейтральных атомов и молекул газа отдельные ионы, ввиду своей несравненно большей активности, могут быть относительно легко обнаружены путем конденсации на них капелек воды в присутствии пересыщенного водяного пара или отдачи ими своего заряда взвешенной в электрическом поле броуновской частице и т. д. Особенную же активность ионы приобретают в том случае, если они движутся с большей скоростью. Это легко достигается при электрическом разряде в разреженных газах. Еще бóльшие скорости наблюдаются у ионов гелия ( $\alpha$ -частицы), выбрасываемых радиоактивными атомами. Благодаря своей колоссальной скорости каждая  $\alpha$ -частица становится непосредственно доступной наблюдению, притом разными способами: по туманному следу, оставляемому ею в газе, содержащем пересыщенный водяной пар (в результате конденсации последнего на образуемых  $\alpha$ -частицей ионах), по «сцинтилляциям», или вспышкам, вызываемым отдельными  $\alpha$ -частицами при ударе о некоторые вещества и т. д. Таким путем Резерфорду удалось непосредственно сосчитать число  $\alpha$ -частиц, выбрасываемых в единицу времени разными радиоактивными веществами.

Аналогичным образом оказывается возможным наблюдать и отдельные электроны. Последние, как известно, были открыты (в 90-х годах прошлого века) в виде так называемых катодных лучей при разряде в разреженных газах. А затем в начале XX в. физики научились выслеживать и фиксировать отдельные электроны с помощью тех же методов, что и обыкновенные ионы (атомы, потерявшие или захватившие один или несколько электронов). Гейгером был создан прибор (названный им электронным счетчиком), позволяющий фиксировать попадание извне отдельного электрона в данный объем газа. Этот электрон благодаря наличию достаточно сильного электрического поля вызывает в газе легко измеримый электрический разряд, являясь как бы искрой, зажигающей пороховой погреб.

Существование молекул и атомов почти никем не оспаривалось уже к моменту завершения макроскопической физики (на рубеже нашего века), еще до того как на-

рождавшаяся микроскопическая физика позволила непосредственно убедиться в их реальности. Вместе с тем, воплотилась в реальность и электронная теория, явившаяся дальнейшим развитием молекулярно-кинетической и атомной теории. Здесь уместно отметить тот факт, что теоретическая мысль физиков опережала опыт, предвосхищая его результаты. Идея атомизма, прерывной структуры материи, была как бы интуитивно присуща человеческому уму — не даром еще греческие философы выдвигали ее. И появление на рубеже XX в. экспериментальной микрофизики, т. е. физики элементарных явлений, в которых участвуют мельчайшие частицы материи — отдельные атомы и электроны, явилось как бы апофеозом развития этой идеи.

Другой идеей, непосредственно связанной с прерывностью материи, всегда являлась идея механистического истолкования физических явлений как результата движения и взаимодействия элементарных частиц материи.

Мысль о том, что всякое физическое изменение сводится, в конечном счете, к изменению в положении и во взаимодействии некоторых неизменных частей материи, что качественное многообразие воспринимаемых нами явлений звука, тепла, света и т. п. обуславливается исключительно строением нашего психофизического аппарата, т. е. является субъективным, и что объективно ему соответствует лишь количественное многообразие в характере движения одних и тех же частиц, — эта мысль составляла основной стержень развития физики на протяжении XVII, XVIII и XIX вв.

Вначале физики были склонны предполагать, что различные ощущения, например тепла и света, вызываются действием особых субстанций, частицы которых столь же неизменны, как и частицы обыкновенной весомой материи. Однако в первой половине XIX в. выяснилось, что многообразие ощущений соответствует не многообразию субстанций, а многообразию форм движения. Одни и те же материальные частицы в зависимости от быстроты своего колебательного движения вызывают ощущения звука, тепла или света. Впрочем последний вызывается лишь в том случае, когда колеблющиеся частицы имеют электрический заряд. Таким образом, видимость материальных тел является наиболее непосред-



ственным и очевидным доказательством того факта, что простейшие частицы нейтральной материи (атомы) состоят из еще более мелких частиц, обладающих неизменными электрическими зарядами. Современная микрофизика показала, что этими мельчайшими частицами являются электроны и их партнеры — протоны, обладающие зарядом той же величины, как и электроны, но противоположного знака и примерно в 1800 раз большей массой.

Простейшей нейтральной системой, образованной одним протоном и одним электроном, является атом водорода. Более сложные атомы состоят из массивного ядра, образованного всеми протонами и частью электронов (играющих роль цемента); остальные электроны вращаются вокруг ядра примерно таким же образом, как планеты вращаются вокруг Солнца.<sup>2</sup> Эта «ядерная», или «планетная», теория строения атомов была выдвинута Резерфордом в 1911 г. в результате экспериментального зондирования атомов при помощи  $\alpha$ -частиц, являющихся с этой точки зрения быстро несущимися ядрами атомов гелия.

Таким образом, оказалось, что микрокосмос, которым является каждый отдельный атом, как по своему строению, так и в отношении сил, действующих между его частицами, весьма подобен макрокосмосу — солнечной системе. В этом уподоблении заключалось величайшее торжество классического механического мировоззрения: законы механики, открытые Ньютоном в применении к небесным телам, оказались применимыми к электронам и протонам с той лишь разницей, что вместо ньютоновского тяготения между последними действуют кулоновские силы притяжения и отталкивания, убывающие по тому же закону, как и силы тяготения, т. е. обратно пропорционально квадрату расстояния.

Однако мысль о тождестве макромеханики, т. е. классической механики больших, макроскопических, тел, и микромеханики, т. е. механики элементарных частиц и систем, оказалась иллюзорной. В постепенном разрушении этой иллюзии, в постепенной выработке новой микромеханики, определяющей течение элементарных физических процессов, являющихся, по существу, не чем иным, как процессами микромеханическими, и заключается основное содержание развития новой физики.

Это развитие началось на рубеже XX в. Годом рождения новой механики (если оставить в стороне ее, так сказать, «утробный» период) можно считать 1900 г., когда появилась первая работа М. Планка о теории теплового излучения. Именно с этой стороны, т. е. со стороны учения о свете, классической механике был нанесен первый сокрушительный удар.

Для того чтобы уяснить связь между развитием механики и оптики, нам придется оглянуться назад и вернуться к времени Ньютона и Гюйгенса — основоположников этих двух дисциплин. Имя Ньютона обычно связывается с корпускулярной (эмиссионной) теорией света, а имя Гюйгенса — с волновой теорией (теорией эфира). Нам нет надобности углубляться в рассмотрение этих общеизвестных теорий. Мы должны отметить лишь следующее. Обе теории основывались на принципах ньютоновской, т. е. макроскопической, или классической, механики. Ньютон применял эти принципы к поступательному движению частиц гипотетической световой субстанции, якобы испускаемой светящимися телами, а Гюйгенс — к колебательному движению частиц гипотетической упругой среды — светового эфира, якобы заполняющего все пространство. При этом Ньютон считал, что световые частицы могут двигаться в однородном прозрачном теле столь же свободно, т. е. прямолинейно и равномерно, как и в пустоте, но лишь с другой, большей скоростью. Гюйгенс же предполагал, что в эфире, заполняющем эти тела, вернее, промежутки между образующими их атомами, световые волны, т. е. упругие колебания, могут распространяться столь же хорошо, как и в «свободном» эфире межзвездного пространства, но с иной, меньшей скоростью. В результате обе эти различные теории приводили к одним и тем же законам отражения и преломления света на границе двух однородных сред, совпадающим с опытными данными. Эквивалентность обеих теорий в отношении вытекающей из них формы световых лучей, т. е. световых частиц или линий, перпендикулярных к поверхности световых волн, была доказана в начале XIX в. применительно к любой неоднородной прозрачной среде английским математиком Гамильтоном и легла в основу формулировки законов классической механики —

формулировки, явившейся исходным пунктом в новейшем преобразовании этой механики Л. де Бройлем и Э. Шредингером.

Вскоре, однако, волновая теория света получила решительное преобладание над корпускулярной. Во-первых, потому, что первой (в руках Френеля) удалось получить количественные законы, определяющие интенсивность отраженных и проходящих лучей при падении света на поверхность какого-либо прозрачного тела (согласно корпускулярной теории, все лучи должны были бы либо отражаться, либо проходить без всякого отражения). Во-вторых, непосредственное измерение скорости света в материальных телах показало, что она меньше, чем в пустоте (как этого и требовала волновая теория). В-третьих — и это главное — из-за открытия явлений интерференции и дифракции света, которые представлялись совершенно непонятными с корпускулярной точки зрения и непосредственно вытекали из волновой, давая возможность определить экспериментально длину световых волн  $\lambda$ , а следовательно, и частоту световых колебаний  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  ( $c$  — скорость света).

Дальнейшее развитие учения о свете во второй половине прошлого века (связанное с именами Фарадея, Максвелла и Герца) привело к замене представления о световых волнах как механических колебаниях в эфире представлением о них как об электромагнитных колебаниях, т. е. колебаниях электрических и магнитных сил, сначала в эфире, утратившем обычные механические свойства, а затем в пустоте. В конце прошлого века наступил момент, когда механическая теория света потерпела крушение, и казалось, что вместе с тем потерпело крушение механическое мировоззрение вообще, на смену которому явилось новое — электромагнитное. Механическое мировоззрение было, однако, спасено развитием электронной теории Лоренца и теорией относительности Эйнштейна. При этом оказалось необходимым переделать старую механику в двух отношениях. Во-первых, отказаться от представления о мгновенной передаче сил на расстояние. Электромагнитные силы, обусловленные какой-либо заряженной частицей, например отдельным электроном, распространяются в окружающем пустом пространстве с конечной скоростью  $c$ . Последняя равна скорости света по

той простой причине, что свет является лишь одним из видов электромагнитных действий (аналогичным электромагнитной индукции). Во-вторых, пришлось отказаться от представления о постоянстве массы, которая изменяется со скоростью  $v$  движения тела по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где  $m_0$  — так называемая масса покоя (при  $v = 0$ ); при этом увеличение массы, обусловленное движением, оказывается равным энергии движения, деленной на  $c^2$ , т. е. на квадрат скорости света.

В результате явления света и движения оказались снова тесно связанными друг с другом, но совсем иначе, чем во времена Ньютона и Гюйгенса.

Теория относительности возникла в 1905 г. Обычное представление о том, что она «опрокинула» старую классическую физику и, в частности, классическую ньютоновскую механику, совершенно неправильно. В действительности Эйнштейн лишь завершил дело Ньютона. Механика теории относительности является по существу механикой макроскопической. Применение ее к электронам в некоторых отношениях давало лучшие результаты, чем применение обычной механики (например, в вопросе об отклонении катодных лучей электрическим и магнитным полями), но ни в малейшей мере не устраняло тех трудностей, которые обнаружились в связи с упомянутой выше фундаментальной работой Планка.

Планк показал, что правильная формула для распределения интенсивности света в спектре теплового излучения может быть получена лишь в предположении, что свет с частотой колебаний  $\nu$  испускается или поглощается не непрерывным образом, как это предполагалось макроскопической электромеханикой, но в виде отдельных порций, или квантов (от quantum (лат.) — количество), энергии, равных произведению  $\nu$  на некоторую постоянную  $h$ . Почти одновременно с работами Планка появились новые экспериментальные исследования так называемого фотоэлектрического эффекта (открытого еще в прошлом веке Гальваксом и Столетовым), т. е. вырывания электронов металлов под действием ультрафиолетового света. Эти работы показали, что энергия, сообщаемая отдельным электронам, совершенно не зависит от интенсивности

света, определяясь исключительно его частотой, согласно закону Планка (энергия  $\varepsilon = h\nu$ ). Что же касается интенсивности света, то она влияет лишь на число электронов, вырывааемых в единицу времени.

Дело происходит так, как если бы свет с частотой колебаний  $\nu$  представлял собой поток отдельных снарядиков, обладающих энергией  $\varepsilon = h\nu$ , причем мерой интенсивности света являлось число подобных снарядиков в единице объема (или на единицу площади).

И вот Эйнштейн в 1905 г., т. е. в том же самом году, в котором была опубликована его теория относительности, имел смелость выступить с гипотезой, что световые кванты Планка не являются порциями энергии световых волн, как это думал сам Планк, но отдельными частицами — как это представлял себе Ньютон. Однако между корпускулярной теорией Ньютона и корпускулярной теорией Эйнштейна имелась существенная разница, вытекавшая из различия в соответствующей механике. Согласно механике Эйнштейна, частица, движущаяся со скоростью света, может иметь конечную энергию лишь в том случае, если ее покоящаяся масса  $m_0$  равна нулю. Это значит, что при замедлении или остановке светового кванта масса его исчезает. Таким образом, световой квант Эйнштейна, будучи поглощен («проглочен») каким-нибудь атомом, перестает существовать как частица; он как бы нацело «переваривается» атомом, сообщая ему свою энергию и свое количество движения (в виде направленного вперед толчка). Точно так же квант света, испускаемый атомом, не берется из существующего в атоме «квантового склада» в готовом виде, но образуется как бы в самом акте лучеиспускания; при этом, вылетая в определенном направлении, он сообщает атому толчок в противоположную сторону, подобный отдаче орудия при выстреле.

Наличие этих толчков составляет в экспериментальном отношении основное отличие квантовой теории Эйнштейна от менее радикальной теории Планка. Согласно Планку, свет должен был бы излучаться отдельными атомами в виде шаровых волн, не связанных с какими-либо толчками. Наличие последних, правда, не при поглощении или испускании, но при рассеянии света было сравнительно недавно (1923 г.) обнаружено экспериментально Комптоном путем изучения рассеяния рентгеновых лучей сво-

бодными или слабо связанными электронами. Оказывается, что при этом электроны получают некоторую скорость в направлении падающих лучей, тогда как рассеянные лучи имеют частоту несколько меньшую, нежели падающие. Последнее означает, что энергия светового кванта уменьшается при его столкновении с электроном. Результатом этого столкновения и является отклонение или «рассеяние» кванта. Экспериментальные результаты могут быть выведены теоретическим путем, если предположить, следуя Эйнштейну, что световой квант с энергией  $\epsilon = h\nu$  обладает массой  $m = \frac{h\nu}{c^2}$  и количеством движения  $mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , где  $\lambda$  — длина волны.

Другой особенностью эйнштейновской теории света, отличающей ее от ньютоновской, является неразрывная связь корпускулярных представлений с волновыми. Выдвинув представление о свете как о потоке квантов, или, как их ныне принято называть,<sup>3</sup> фотонов, Эйнштейн отнюдь не выбросил за борт волновые представления; наоборот, он предложил считать их другой стороной той же самой реальности, которую мы воспринимаем одновременно и как волны, и как частицы. При этом частоте колебаний  $\nu$  и длине волны  $\lambda$ , характеризующим свет по волновой теории, соответствует в корпускулярной теории энергия  $h\nu$  и количество движения  $\frac{h}{\lambda}$ . Интенсивность света измеряется квадратом амплитуды колебаний, согласно одной теории, и числом световых снарядиков,— по другой.

Мы не будем пока углубляться в сущность этого корпускулярно-волнового дуализма, которая начала проясняться лишь в самое последнее время — после того как этот дуализм со света был распространен и на материю. Этому предшествовал, однако, двадцатилетний период развития квантовой физики совсем, казалось, в другом направлении — в направлении теории строения атомов и испускаемых или поглощаемых ими спектров. Пионером этой области явился Бор. Применяя идеи Планка к атомам, вернее, к той планетарной модели атомов, которая была дана Резерфордом, Бор естественным образом пришел к мысли о том, что прерывному характеру испускания или поглощения света должен со-

ответствовать скачкообразный характер перехода атомов из одного состояния в другое.

Согласно макроскопической электромеханике, излучение атомов должно было бы происходить непрерывным образом, сопровождаясь непрерывным уменьшением размера электронных орбит, и закончиться лишь при падении электронов на ядро. В предупреждение этой катастрофы, которой в действительности, конечно, не наблюдается, Бор и выдвинул предположение, что каждый атом может находиться в дискретном ряде стационарных состояний, не сопровождающихся излучением; последнее происходит лишь при перескоке атома из одного стационарного состояния в другое с меньшей энергией. Состояние с наименьшей энергией является нормальным. Предоставленный самому себе атом может пребывать в таком состоянии неограниченно долгое время. Переход в другие возбужденные состояния может происходить лишь путем поглощения кванта света надлежащей величины или же путем электронного удара, который оказывается действительным лишь в том случае, если энергия ударяющего электрона равна или больше той, которая необходима для данного перехода.

Эти идеи Бора, получившие блестящее экспериментальное подтверждение, были уточнены Эйнштейном в 1917 г. путем введения представления о вероятности различных самопроизвольных и вынужденных переходов. Понятие вероятности фигурировало и в макроскопической физике XIX в., когда дело касалось описания поведения громадного числа одинаковых частиц. Но там оно имело совсем иной смысл, нежели в микрофизике Планка—Бора—Эйнштейна. Раньше, исследуя поведение молекул газа, полагали, что в принципе движение отдельных молекул могло бы быть определено со сколь угодно степенью точности. Вводя понятие вероятности для характеристики того или иного элементарного процесса, например самопроизвольного перехода атома из возбужденного состояния в нормальное с испусканием света, Эйнштейн поставил крест на всякие попытки проследить детали этого переходного движения и тем самым определить его как вполне закономерный механический процесс. По Эйнштейну, одни и те же причины, поскольку мы в состоянии их точно установить, например один и тот же свет, действующий на данный атом, могут вызывать раз-

ные следствия, например переход атома в то или иное возбужденное состояние (в случае смешанного света), причем мы не имеем решительно никаких оснований судить о том, какое именно из числа возможных следствий должно осуществиться. При наличии, однако, большого числа одинаковых атомов мы можем вычислить количество атомов, которые при данных условиях совершают тот или иной переход. Таким образом, развитие новой микроскопической физики, происходившее под знаменем планковской идеи квантов света, привело к полному подрыву классической, т. е. макроскопической, механики, или электромеханики, даже в форме, исправленной в соответствии с теорией относительности. Непосредственное изучение микрофизических процессов раскрыло в них не только ту прерывность, которая мерещилась еще греческим философам и которая в конце XIX в. оформилась в виде атомно-молекулярно-кинетической теории, — прерывность в строении материи; оно раскрыло прерывность совершенно иного сорта, о которой ранее никто не подозревал, — прерывность в состояниях материи и в переходах из одного состояния в другое, а вместе с тем и в действиях, связанных с этими переходами. Новая корпускулярная теория света, предложенная Эйнштейном, не разрешала противоречий, которые вытекали из сопоставления этой прерывности с требованиями макромеханики, но лишь усугубляла их, тем более, что она не порывала с волновой теорией света, но являлась лишь своего рода дополнением последней. И, наконец, эта новая квантовая прерывность подрывала представление об однозначной обусловленности или детерминированности микрофизических явлений, приводя к представлению о господстве в них случайности, ограниченном лишь понятием определенной вероятности, или, другими словами, к представлению о статистическом характере физических закономерностей.

Физика, казалось, зашла в тупик. Выход из этого тупика был немислим без радикального изменения основных принципов классической механики и подлинно революционной перестройки всех связанных с ней физических и философских представлений.

В течение нескольких лет (1918—1924 гг.) физика билась в этом тупике, тщетно ища выхода, пока, наконец, он не был найден, с одной стороны, де Бройлем и Шредингером в направлении развития идей Эйнштейна,



а с другой — Гейзенбергом, отчасти вместе с Борном, Иорданом и другими, в направлении развития формального общего принципа сходства или соответствия, который был установлен Бором путем сравнения результатов квантовой теории с классической. Об этом принципе соответствия мы не будем здесь распространяться, так как первый путь, найденный де Бройлем, оказался гораздо более прямым и физически содержательным.

### III. ВОЛНЫ МАТЕРИИ И ПРИНЦИПЫ МИКРОМЕХАНИКИ

Как уже упоминалось выше, основная идея де Бройля заключалась в распространении корпускулярно-волнового дуализма, введенного Эйнштейном в учение о свете, на материю. В простейшей своей форме материя наблюдается в виде отдельных, свободных электронов или же в виде потока катодных лучей, исходящих от отрицательного полюса при электрическом разряде в разреженных газах. Само название лучей указывает на сходство со светом. Однако это сходство, которое первоначально выражалось лишь в прямолинейном распространении как световых, так и катодных лучей, было скоро заслонено множеством различий — сначала отклонением катодных лучей в электрическом и магнитном поле, а затем обнаружением их корпускулярной структуры. Оно вновь было восстановлено, когда оказалось, что подобную корпускулярную структуру обнаруживают и световые лучи. И вот Л. де Бройль в 1924 г. в своей докторской диссертации высказал мысль, за которую в 1929 г. он получил Нобелевскую премию, что катодные лучи так же, как и световые, имеют дуалистическую природу, являясь одновременно и частицами, и особого рода волнами.

Заметим, что до этого момента введенный Эйнштейном дуализм представлялся всем физикам в высшей степени удручающим. Было не мало попыток объяснить двойственный характер световых действий путем сведения квантовых (корпускулярных) действий к волновым. Никогда, однако, в истории науки не бывало, чтобы по-настоящему новое можно было свести к старому. Наоборот, это новое зачастую представлялось непонятным лишь до тех пор, пока оно оставалось изолированным островком в океане старого, и сразу приобретало понятность,

т. е. естественность, когда выяснялось, что оно в скрытом виде таилось всюду. Так было и в данном случае. Де Бройль не ограничился, впрочем, постулированием существования катодных волн. Он прежде всего связал характеризующие их величины, т. е. частоту колебаний  $\nu$  и длину волны  $\lambda$ , с величинами, характеризующими катодные лучи в рамках корпускулярной теории, а именно, энергией  $h\nu$  и количеством движения  $\frac{h}{\lambda}$ , и притом с помощью тех самых формул  $\epsilon = h\nu$  и  $mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , кото-

рые 20 годами раньше были введены Эйнштейном для световых лучей (с той же самой планковской постоянной в качестве переводного множителя от корпускулярных представлений к волновым). При этом оказалось, что катодным лучам, обычно получающимся в разрядных трубках под действием ускоряющей разности потенциалов в несколько тысяч или десятков тысяч вольт, соответствуют катодные волны, длина которых равна примерно  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  см, т. е. длине волны обычно применяемых рентгеновых лучей. Напомним, что рентгеновские лучи по природе своей тождественны лучам видимого света, отличаясь от них примерно в 10 000 раз меньшей длиной волны. Волновой характер рентгеновых лучей, а также и длина их волн были, как известно, установлены экспериментально (Лауэ, Брэггом и др.) путем наблюдения явлений интерференции и дифракции, обнаруживаемых этими лучами при отражении от кристаллов или при прохождении через последние. Кристаллы при этом действуют совершенно таким же образом, как искусственные дифракционные решетки по отношению к видимым лучам, благодаря тому, что расстояние между соседними кристаллическими плоскостями (постоянная кристаллической решетки) того же порядка, что и длина волны рентгеновских лучей.

Примерно за два года до появления работы де Бройля, Дэвиссон (США) наблюдал более или менее аналогичные явления при отражении катодных лучей от поверхности металлов. Повторение опытов Дэвиссона им самим, а также рядом других экспериментаторов (в более тщательных условиях) блестяще подтвердило гениальную догадку де Бройля. При этом получились совершенно такие же дифракционные картины, как если бы вместо катодных лучей применялись рентгеновы

лучи с длиной волны  $\lambda$ , определяемой соотношением Эйнштейна—де Бройля  $m\nu = \frac{h}{\lambda}$  ( $m$  — масса электронов;  $\nu$  — их скорость). Более того, в 1928 г. немецкому ученому Руппу удалось наблюдать дифракцию катодных лучей и измерить их длину с помощью обыкновенной (оптической) дифракционной решетки при почти касательном падении лучей на плоскость последней. В итоге получились результаты, вполне согласные с теорией или, вернее, с формулой де Бройля.

Таким образом, как бы мы ни смотрели на сущность корпускулярно-волнового дуализма, наличие его, как в случае света, так и в случае катодных лучей, является ныне экспериментальным фактом.

Что касается сущности этого дуализма, то и де Бройль понимал его неправильно. Он пытался связать введенные им волны с отдельными электронами, рассматривая каждый электрон как нечто вроде «гребня» соответствующей ему системы волн. Эта точка зрения завела его в тупик, в котором физика простояла около двух лет, до появления работ Шредингера.

Заметим, что де Бройль не ограничился введением понятия катодных или электронных волн, но попытался применить его к объяснению существования боровских «стационарных состояний» атомов. До сих пор эти состояния определялись лишь на основании особых рецептов, найденных ощупью и не имевших ясного физического смысла. Де Бройль показал, что в простейшем случае круговых движений электрона они могут быть сведены к следующему простому требованию: длина орбиты (окружности) должна равняться целому кратному длины волны электрона, т. е. последняя должна укладываться в первой целое число раз.

Смысл этого утверждения был не вполне ясен, так как оставался совершенно открытым вопрос о длине и вообще о характере электронных волн в остальном пространстве. т. е. вне орбиты электрона.

Этот вопрос был решен Э. Шредингером. В качестве исходной точки своей теории Шредингер воспользовался идеями де Бройля и в особенности той аналогией между корпускулярной и волновой оптикой, о которой мы упоминали уже выше и которая была разработана в начале XIX в. Гамильтоном, а затем почти совсем забыта.

Эта аналогия обнаруживается в том случае, если рассматривать движение не одной определенной световой частицы, но бесчисленного множества экземпляров ее, заполняющих сплошным образом пространство. При таких условиях в случае бесконечно коротких волн перпендикулярные к их поверхностям лучи можно отождествить с путями (траекториями) различных экземпляров данной частицы, определяемыми законами классической механики.

Если же вместо бесконечно коротких волн рассматривать волны конечной длины, то движение соответствующих им частиц нельзя определить по законам классической механики. Та механика, которой определяется это движение, — механика, соответствующая законам распространения волн, — и была названа де Бройлем, который ее предчувствовал, и Шредингером, который ее открыл, волновой механикой. Это и есть та микромеханика, которая должна была явиться на смену старой макроскопической механике в применении к элементарным частицам материи.

Заметим, что по формуле де Бройля длина материальных волн  $\lambda$  равна  $\frac{h}{mv}$ , т. е. при данной скорости  $v$  она тем меньше, чем больше масса частицы  $m$ . У обыкновенных макроскопических частиц эта масса столь велика, что длина соответствующих волн практически исчезает. Вот почему к этим частицам применима с достаточной точностью обыкновенная макромеханика. В случае же электронов, а также протонов, атомов или отдельных молекул масса так мала, что длина волны  $\lambda$  приобретает заметную величину. Соответственно этому обыкновенная механика становится неприменимой к ним и должна быть заменена волновой.

В чем же заключаются основные черты последней?

Во-первых, в том, что, оперируя с волнами, описывающими поведение бесчисленного множества экземпляров одной частицы, она исключает возможность проследить движение какого-либо определенного экземпляра этой частицы. Другими словами, зная в точности волновой процесс, соответствующий интересующему нас движению, мы совершенно не можем установить детали самого движения. Мы не только не можем сказать, в какой именно точке находится исследуемая частица в данный момент

времени, но и в какой точке она будет находиться через некоторое время, если положение ее в данный момент времени считается известным.

Причина этой неопределенности станет нам ясной, если мы примем во внимание, что соответствие, о котором идет речь, связывает два совершенно различных представления — дискретную (прерывную) частицу и непрерывный волновой процесс. Ту же самую неопределенность мы имеем и в лучистых явлениях, например, при сопоставлении фотонов в пучке световых лучей с соответствующими волнами. При достаточной интенсивности лучей вопрос о том, в каких именно точках пространства находятся фотоны в каждый момент времени, не имеет практического значения. Их так много, что неопределенность в их положении затушевывается, и мы вполне удовлетворяемся констатированием того факта, что число их вблизи каждой точки пропорционально энергии, т. е. квадрату амплитуды световых колебаний в этой точке. Неопределенность эта оказывается, однако, крайне неприятной, когда мы переходим к световым лучам чрезвычайно малой интенсивности — настолько малой, что один фотон должен приходиться на весьма большой объем. В этом случае, если мы только хотим сохранить представление о корпускулярно-волновом дуализме света, мы должны отказаться от попытки точной локализации фотонов и удовольствоваться определением вероятности встретить их в той или иной точке пространства.

То же самое относится и к катодным лучам малой интенсивности и, в частности, к тем чрезвычайно слабым катодным волнам, которые соответствуют движению электронов в отдельных атомах.

Мы видим, таким образом, что понятие вероятности, заменяющей классическую достоверность, естественным образом проникает в описание микрофизических явлений. Мы увидим, что оно здесь пышно распускается, пронизывая решительно все наше физическое мировоззрение. Возвращаясь к вопросу о движении отдельного электрона, мы можем, следуя Гейзенбергу, взглянуть на присущую этому движению неопределенность следующим образом. Для того чтобы определить движение макроскопической материальной частицы по формулам классической механики, необходимо точно знать не только ее начальное положение, но и начальную скорость (в классической меха-

нике непосредственно определяется лишь ускорение, т. е. быстрота изменения скорости). Описывая движение материальной частицы с помощью волновой механики, мы можем построить так называемый «волновой пакет», т. е. такую систему волн, в которой амплитуда колебаний имеет заметную величину лишь вблизи какой-нибудь определенной точки. Если измерять вероятность нахождения частицы в данной точке квадратом амплитуды колебаний, то мы можем локализовать ее таким образом, по крайней мере мысленно, со сколько угодно степенью точности.

При этом, однако, оказывается, что волновой пакет, изображающий положение частицы в данный момент, с течением времени расплывается, и тем быстрее, чем он был концентрированнее. Это значит, что с увеличением точности в определении положения частицы уменьшается точность в определении ее скорости. Положение и скорость не могут быть определены одновременно. А при таких условиях исключается возможность точного определения движения частицы по заданным начальным условиям. Заметим, что произведение неточностей в определении положения и скорости равно приблизительно  $\frac{h}{m}$ ,

т. е. обратно пропорционально массе. Для обыкновенных макроскопических тел эта величина практически совершенно незаметна. Напротив, для элементарных частиц, особенно для электронов (и в еще большей степени — фотонов), она становится очень большой. Вот почему к движению элементарных частиц материи обычная макромеханика неприменима.

Причина невозможности одновременного (точного) определения положения и скорости элементарной частицы коренится, согласно Гейзенбергу, в самих условиях физического эксперимента. Всякий эксперимент, всякое наблюдение какой-нибудь частицы связано с тем или иным воздействием на эту частицу, хотя бы самым деликатным, в виде, например, освещения ее. Но подобное воздействие является деликатным только в отношении макроскопических частиц. Если, желая увидеть отдельный электрон, мы направим на него сбоку луч света, то при рассеянии последнего происходит комптоновский эффект, т. е. резкое изменение скорости электрона. Это изменение тем более резко, чем меньше длина волны лучей. Таким образом,

уменьшая последнюю, мы можем увеличить точность локализации электрона (благодаря дифракции, мы можем определять положение рассматриваемого объекта лишь с точностью до длины волны света), но тем самым уменьшаем точность определения его скорости.

Вернемся теперь к рассмотрению того волнового процесса, который, по Шредингеру, соответствует движению электрона вокруг положительного ядра в атоме водорода. Этот процесс приобретает особенную простоту, если рассматривать ядро не как движущийся объект, но как неподвижный центр. В таком случае совершающиеся вокруг него шредингеровские колебания можно сравнить с упругими колебаниями струны или, еще лучше, круглой мембраны с закрепленными краями. Различные стационарные состояния теории Бора соответствуют различным простым колебаниям струны или мембраны; при этом нормальное состояние соответствует основному колебанию с наиболее низким тоном, а возбужденные состояния — обертонам. Частота тех или иных колебаний является мерой энергии соответствующего им состояния. Роль закрепленных краев мембраны играют бесконечно удаленные точки; фактически, однако, амплитуда колебаний быстро убывает с увеличением расстояния от ядра, сохраняя заметную величину лишь на таких расстояниях, которые сравнимы с размерами орбит электрона в стационарных состояниях теории Бора. От этих орбит в теории Шредингера не остается никакого следа, поскольку точная характеристика движения электрона оказывается принципиально невозможной. Мы должны довольствоваться той символической характеристикой, которая вытекает из рассмотрения волнового процесса и выражается в терминах корпускулярно-волнового дуализма, т. е. эйнштейн—дебройлевскими соотношениями, связывающими частоту колебаний и длину волн с энергией и скоростью (количеством движения) электрона, а квадрат амплитуды колебаний — с вероятностью нахождения его в том или ином месте.

Заметим, что теория Бора ограничивалась рассмотрением лишь таких (круговых или эллиптических) движений электрона, при которых последний оставался связанным с ядром. Волновая механика не знает подобного ограничения; она столь же хорошо (в том же символическом смысле) описывает движения гиперболические, относя-

щиеся к ионизованным состояниям атома. Этим гиперболическим движениям соответствуют волны, напоминающие расходящиеся или сходящиеся волны в неограниченной однородной среде.

Естественно возникает вопрос: в чем же заключается сущность дебройль—шредингеровских волн? Что именно колеблется в пространстве, окружающем ядро атома водорода? Не следует ли представить себе, что это пространство заполнено какой-то вибрирующей материальной средой, вроде прежнего светового эфира? Эта точка зрения, выдвигаемая, в частности, одним из последних могикан старой классической школы физиков — Дж. Дж. Томсоном, не имеет, однако, решительно никаких оснований, кроме укоренившейся привычки нашего ума связывать всякое колебание с движением. Если световые колебания мы представляем себе в настоящее время не как колебательное движение, но как колебание электрических и магнитных сил в пустом пространстве, то аналогичным образом следует представлять и те колебания, которые символически связаны с движением электронов. Эти колебания сами по себе нематериальны, так сказать, «бесплотны», и воплощаются в материю только путем символического соответствия между образуемыми ими волнами и частицами. Мы имеем здесь соотношение, до некоторой степени аналогичное символическому соответствию между психическими и физиологическими процессами, совершающимися в нашем мозгу.

Вопрос о природе дебройлевских волн является пока спорным. В современной (отнюдь еще не окончательной) стадии развития волновой механики представляется наиболее простой и удобной точка зрения Борна, согласно которой эти волны не имеют непосредственной реальности, представляя собой лишь вспомогательные образы, служащие для определения вероятности различных реальных событий, объектами которых являются обыкновенные материальные частицы. В этом отношении корпускулярно-волновой дуализм, по крайней мере в применении к материи, не утрачивает смысла. Материя, как мы всегда до сих пор и предполагали, представляет собой лишь совокупность материальных частиц — электронов и протонов. Сущность новой микромеханики, с точки зрения Борна, заключается вовсе не в вводимых ею волнах, а в замене детерминистического описания событий описанием «веро-



ятностным», т. е. таким, в котором определяются не самые события, но лишь их вероятности.

В соответствии с этим соотношение между классической макромеханикой и новой микромеханикой может быть представлено следующим образом. Старая механика знала лишь две вероятности, а именно: нуль, т. е. невозможность, и единицу, т. е. достоверность. Соответственно этому она ставила себе целью определение тех событий, вероятность которых равна единице, т. е. неизбежных, достоверным образом вытекающих из точно, достоверно известных начальных условий.

Новая механика не знает этих предельных случаев. Для нее все события являются возможными, но лишь неодинаково вероятными. Соответственно этому задача ее заключается не в определении того, какие именно события должны произойти при той или иной ситуации, но в определении вероятности всех событий, которые при этой ситуации являются мыслимыми. При экспериментальном исследовании вопроса мы должны наблюдать и фактически наблюдаем все эти события: чаще всего — наиболее вероятные, реже — наименее вероятные.

В макроскопических процессах, слагающихся из бесчисленного множества процессов элементарных, эта неопределенность практически совершенно исчезает. Здесь проявляется закон больших чисел, действием которого объясняются статистические закономерности, наблюдаемые нами в биологических и социальных процессах, охватывающих очень большое число сходных индивидуумов. Таким образом, закономерность макроскопических физических процессов, которая раньше противопоставлялась этой статистической закономерности (как «естественная», непреложная), на самом деле оказывается тождественной с ней.

Для иллюстрации этих общих соображений рассмотрим, например, каким образом в волновой механике определяется действие света на атом водорода. Прежде всего, вместо одного атома мы принимаем во внимание очень большое число его экземпляров. Предположим, что все они в начальный момент находятся в одном и том же (стационарном) состоянии, например в нормальном. Это состояние всей рассматриваемой совокупности экземпляров мы описываем при помощи некоторого простого колебательного процесса, аналогичного основному колебанию

струны (или мембраны). Соответственно этому свет рассматривается нами также согласно волновой теории, т. е. как некоторый колебательный электромагнитный процесс. Действие световых волн на атомы оказывается при этом аналогичным действию звуковых волн на колеблющуюся струну. В последнем случае у струны возбуждаются различные обертоны, накладывающиеся на основной ее тон. Нечто в этом роде происходит и в нашем случае. Через некоторое время после начала действия света состояние рассматриваемой совокупности экземпляров атома водорода описывается сложным колебательным процессом, слагающимся из исходного колебания и обертонов, соответствующих возбужденным состояниям атома. Квадрат амплитуды каждого из этих колебаний представляет собой меру вероятности того, что за означенное время атом водорода перейдет из нормального состояния в соответствующее ему возбужденное. Если последнее представляет собой ионизованное состояние атома, то мы получаем, таким образом, вероятность фотоэлектрического эффекта. Эта вероятность имеет заметную величину лишь в том случае, если электрону или, вернее, атому сообщается энергия  $h\nu$  (где  $\nu$  — частота световых колебаний), так, как если бы вырывание электронов обуславливалось не действием световых волн, но действием соответствующих последним фотонов. Зависимость этой вероятности от интенсивности света, а также от других факторов находится в полном согласии с той, которая наблюдается на опыте (если судить о вероятности по числу электронов).

Точка зрения Борна о чисто формальном значении дебройль—шредингеровского колебательного процесса является еще более плодотворной при рассмотрении более сложных процессов, в которых участвуют несколько элементарных частиц, действующих друг на друга.

Здесь представление о волнах обычного типа, т. е. в обычном трехмерном пространстве, оказывается невозможным и должно быть заменено, как показал еще Шредингер, представлением о волнах в «конфигурационном» пространстве, т. е. пространстве  $3n$  измерений, определяемом совокупностью координат всех  $n$  рассматриваемых частиц.

Оперируя в этом многомерном конфигурационном пространстве, введенном еще сто лет тому назад Гамильто-

ном в его формулировке классической механики, современная микромеханика описывает поведение бесчисленного множества экземпляров рассматриваемой системы частиц одним колебательным процессом, определяя стационарные состояния или вероятности переходов между ними таким же образом, как и в случае одной частицы. При этом одинаковость или различие последних не играют существенной роли.

Такое решение вопроса не следует, однако, считать исчерпывающим и вполне удовлетворительным. Наоборот, оно является, несомненно, лишь провизорным, причем уже в настоящее время намечаются контуры будущего и, по всей вероятности, окончательного решения проблемы материи и света.

Неудовлетворительность современной трактовки задачи о сложной системе частиц заключается в следующем. Во-первых, она не в силах учесть того запаздывания, которое характеризует силы взаимодействия между частицами материи, т. е. конечную скорость распространения этих сил. Во-вторых, она порывает с аналогией между материальными и световыми лучами и не дает взамен сколько-нибудь удовлетворительной картины испускания света материей. И, наконец, в-третьих, она не дает никакого истолкования тому фундаментальному факту, что материя не состоит из необозримо пестрого многообразия элементарных частиц, но из частиц только двух сортов — протонов и электронов. Все электроны совершенно тождественны друг другу, так что их можно было бы рассматривать как разные экземпляры одного и того же электрона и соответственно этому изображать дебройлевскими волнами в обыкновенном трехмерном пространстве, подобно тому как это делается для фотонов, если бы электроны, в противоположность фотонам, не взаимодействовали друг с другом. Задача заключается в том, чтобы учесть это взаимодействие, сохранив представление о трехмерных электронных волнах, как аналоге волн световых, дополнив их волнами протонными и объединив протоны с электронами, что представляется необходимым и возможным ввиду соотношения между их зарядами. С ее решением была бы полностью выяснена и проблема о связи между светом и материей, при этом трехмерные материальные волны можно было бы рассматривать как источники световых волн. Первые шаги к решению этой

проблемы уже были сделаны в последние 2—3 года, особенно Иорданом и Дираком. Их работы связаны с коренным преобразованием теории волн в том же духе, в котором в первой стадии развития волновой механики была преобразована теория частиц. Волны — световые или материальные, способные описывать в трехмерном пространстве поведение дискретных частиц, в особенности действующих определенным образом друг на друга, должны существенным образом отличаться от тех волн, которые рассматривались в классической механике сплошных сред и даже в классической электродинамике. Ныне мы находимся накануне последнего решительного штурма проблемы материи и вскоре, по всей вероятности, сможем торжествовать окончательную победу.

## ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ

### I. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И СТАТИСТИКА

**К**лассическая механика ставила себе задачей определение движения отдельной частицы или системы частиц при заданных начальных условиях. В простейшем случае отдельной частицы, движущейся в определенном внешнем силовом поле, эти условия сводятся к заданию координат частицы  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и слагающих ее скорости  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  в некоторый начальный момент времени  $t=t_0$ . Так как сила определяет ускорение частицы, т. е. быстроту изменения ее скорости, и в свою очередь определяется ее положением, то по этим данным можно определить путем вычисления всю предыдущую и последующую историю частицы.

Если мы будем непрерывно варьировать начальные условия, т. е. начальные значения величин  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ , то получим непрерывное многообразие движений одной и той же частицы, или, если все эти движения рассматривать вместе, «континуум экземпляров» одной и той же частицы. Само собой разумеется, что всякое взаимодействие между этими экземплярами исключается. Задачи, в которых нам приходится иметь дело с большим (или бесконечным) числом экземпляров одного и того же объекта, называются статистическими. Соответственно этому механика множества экземпляров одной и той же частицы или в общем случае системы частиц называется статистической механикой, или просто статистикой.

Континуум экземпляров представляет собой, конечно, вымышленный, фиктивный объект. В действительности, однако, нам приходится иметь дело на каждом шагу со сложными объектами, образованными конечным, но чрезвычайно большим числом тождественных частиц. Такими объектами являются все обычные материальные тела.\* Существенным отличием их от континуума экземпляров, помимо дискретности, является наличие сил взаимодействия между отдельными частицами (экземплярами). Эти силы не играют роли вследствие своей малости лишь в случае разреженных газов. Игнорируя их, мы получаем идеальный газ, отличающийся от континуума экземпляров статистической механики лишь конечностью числа частиц и в связи с этим конечной величиной различия в начальных условиях их движения. Однако в случае очень большого числа частиц это обстоятельство практически не имеет значения.

В некоторых случаях представление об идеальном газе может быть сохранено и при учете сил взаимодействия между рассматриваемыми частицами, а именно, путем замены этих внутренних сил более или менее эквивалентным им внешним силовым полем. Так, например, поступают при изучении движения электронов в атоме, металле и т. д. (см. ниже).

Основная задача статистической механики идеального газа заключается в исследовании распределения частиц по различным состояниям. При этом состояние отдельной частицы определяется значениями ее координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и слагающих скорости  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  в рассматриваемый момент времени. Распределение характеризуется числом частиц  $dN$ , для которых эти величины заключаются в определенных, весьма малых интервалах, а именно, между  $x$  и  $x + dx$ ,  $y$  и  $y + dy$  и т. д. Число  $dN$ , очевидно, должно быть пропорционально всем этим интервалам, т. е., следовательно, их произведению

$$d\omega = dx dy dz dv_x dv_y dv_z, \quad (1)$$

и может быть представлено в виде

$$dN = f(x, y, z; v_x, v_y, v_z) d\omega, \quad (2)$$

---

\* Если отвлечься от внутренней структуры их молекул, т. е. рассматривать последние как материальные точки.

где  $f$  — коэффициент пропорциональности, называемый плотностью распределения в протяженности шести измерений, образуемой совокупностью величин  $x, y, z, v_x, v_y, v_z$ . Эту протяженность обычно называют фазовым пространством.

Плотность  $f$  зависит не только от этих шести величин, но и от времени  $t$ . В том случае, если она от времени не зависит, распределение называется стационарным, или равновесным. При этом величина  $f$  должна представлять собой функцию полной энергии  $W$  частицы, находящейся в соответствующем состоянии, т. е. суммы кинетической энергии  $\frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$  и потенциальной энергии  $U(x, y, z)$ . Вид этой функции  $f(W)$  остается произвольным. Если, однако, потребовать, чтобы рассматриваемое равновесное распределение не нарушилось при включении слабых сил взаимодействия между частицами, например сил, проявляющихся при столкновениях атомов газа друг с другом, то для плотности получается следующее выражение, впервые предложенное Максвеллом и обобщенное Больцманом:

$$f(W) = C e^{-\frac{W}{kT}}. \quad (3)$$

Здесь  $C$  представляет собой коэффициент пропорциональности, не зависящий от  $x, y, z$  и т. д.;  $k$  — так называемую постоянную Больцмана, равную  $1.3 \times 10^{-16} \frac{\text{эрг.}}{\text{град.}}$ , а  $T$  — абсолютную температуру. Последняя связана со средним значением кинетической энергии одной частицы  $\frac{1}{2} m \bar{v}^2$  известной формулой кинетической теории газов:

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT. \quad (4)$$

## II. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ Н. БОРА И КВАНТОВАЯ СТАТИСТИКА

Перенесение законов классической механики и связанной с ней статистики на элементарные процессы и прежде всего на движение электронов в атомах натолкнулось, как известно, на непреодолимые противоречия. Эти противоречия нашли свое первое оформление в квантовой

теории Бора, выдвинувшей принцип существования прерывного ряда «избранных» движений, подчиняющихся законам классической механики и могущих переходить друг в друга скачкообразно. Эти избранные движения, соответствующие определенным дискретным значениям энергии, а также другим постоянным (например, моменту количества движения), называются стационарными, или квантованными. В простейшем случае частица, свободно движущаяся в прямоугольном ящике при отсутствии внешних сил, кроме тех, которые вызывают правильное отражение ее при ударе о стенки, имеет постоянное численное значение каждой из трех слагающих скорости  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  вдоль прямых, параллельных ребрам ящика  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . В случае квантованных движений эти постоянные определяются формулами

$$v_x = \frac{hn_1}{2ma}, \quad v_y = \frac{hn_2}{2mb}, \quad v_z = \frac{hn_3}{2mc}, \quad (5)$$

где  $m$  — масса частицы;  $h$  — так называемая постоянная Планка, равная  $6.55 \times 10^{-27}$  эрг. сек.;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  — произвольные целые неотрицательные числа. Соответственно этому для (кинетической) энергии частицы  $W = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$  получается выражение

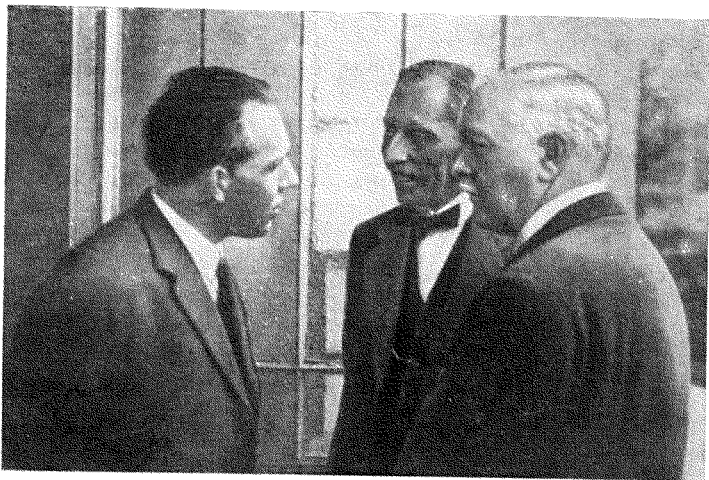
$$W = \frac{h^2}{8m} \left( \frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right). \quad (6)$$

Аналогичными формулами характеризуются квантованные движения частицы в любом (внешнем) силовом поле, способном удерживать ее на конечном расстоянии. Аналогия заключается в том, что во всех этих случаях мы имеем три квантовых условия, в каждое из которых входит (произвольное) целое число, и что энергия частицы выражается в функции этих трех квантовых чисел. Так, например, в случае движения электрона вокруг положительного ядра, притягивающего его по закону Кулона, энергия может принимать следующие значения:

$$W = - \frac{A}{(n_1 + n_2 + n_3)^2} \quad (A — постоянная),$$

где число  $n_1$  характеризует радиальную составляющую движения, а числа  $n_2$  и  $n_3$  — угловые составляющие.





*Слева направо: Н. Бор, Ф. Пашен и Д. Мак-Леннан.  
Италия, г. Комо, 1927 г. (фото Я. И. Френкеля).*

Сумму  $n_1 + n_2 + n_3 = n$  называют главным квантовым числом, а сумму  $n_2 + n_3 = l$ , характеризующую момент количества движения (секториальную скорость), — угловым квантовым числом. То обстоятельство, что разным типам движения, т. е. разным тройкам чисел  $n_1, n_2, n_3$ , при одинаковости их суммы соответствует одна и та же энергия, называется вырождением.

В то время как в классической механике состояние частицы характеризуется шестью величинами, а именно ее координатами  $x, y, z$  и слагающими скорости  $v_x, v_y, v_z$ , в квантовой теории Бора под состоянием подразумевается определенное (стационарное) движение, характеризующее совокупностью трех квантовых чисел  $n_1, n_2, n_3$ . Таким образом, стационарное состояние, по теории Бора, объемлет непрерывное многообразие состояний, соответствующее классической механике.

Объем той части фазовой протяженности, которая приходится на одно стационарное состояние теории Бора, имеет для всех этих состояний одну и ту же величину, равную  $\left(\frac{h}{m}\right)^3$ , если выразить ее как сумму величин  $d\omega$  (1).

Подобную часть фазовой протяженности называют обычно элементарной фазовой клеткой. Следует заметить, что вопрос о форме этих клеток остается совершенно открытым и практически не играет роли.

Квантовая статистика отличается от классической прежде всего тем, что она рассматривает каждое стационарное состояние как нечто целое, не анализируя его на многообразии состояний в смысле классической механики. Соответственно этому при изучении идеального газа, образованного большим числом экземпляров одной и той же частицы, квантовая статистика фиксирует их распределение заданием среднего числа экземпляров  $N_i$ , находящихся в  $i$ -м стационарном состоянии ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ).<sup>\*</sup> В случае распределения, не зависящего от времени (равновесного), число  $N_i$  оказывается, так же как и в классической статистике, функцией энергии соответствующего состояния. Однако функция эта отличается от максвелл—больцмановской функции (3).

В настоящее время различают два вида квантовой статистики, а именно, статистику Паули—Ферми и статистику Бозе—Эйнштейна. Первая из них приводит к распределению, выражаемому формулой

$$N_i = \frac{1}{\frac{1}{A} e^{W_i/kT} + 1}, \quad (7)$$

а вторая — к распределению

$$N_i = \frac{1}{\frac{1}{A} e^{W_i/kT} - 1}. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что одно квантовое состояние соответствует фазовому объему  $\left(\frac{h}{m}\right)^3$ , часто полагают  $N_i = f_i \left(\frac{h}{m}\right)^3$ , где  $f_i$  обозначает плотность распределения в классическом смысле, т. е. в фазовом пространстве,

---

<sup>\*</sup> Фактическое число экземпляров в  $i$ -м состоянии  $N_i$  может в каждый момент времени отклоняться от среднего в ту или другую сторону.

и переписывают предыдущие формулы в виде

$$f_i = \left(\frac{m}{h}\right)^3 \frac{1}{\frac{1}{A} e^{W_i/kT} \pm 1}, \quad (9)$$

где знак (+) соответствует статистике Паули—Ферми, а знак (—) — статистике Бозе—Эйнштейна. Постоянные  $A$  имеют в обоих случаях разные значения, зависящие от общего числа частиц (экземпляров) и от температуры.

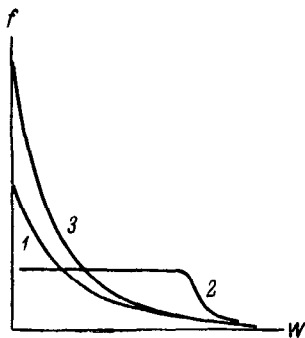


Рис. 2.

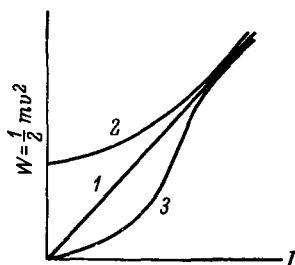


Рис. 3.

При достаточно высоких температурах выражения  $\frac{1}{A} e^{\frac{W_i}{kT}}$  становятся очень большими в сравнении с единицей, так что обе формулы (9) сводятся практически к классической формуле Максвелла—Больцмана (4), причем  $A \left(\frac{m}{h}\right)^3 = C$ .

С понижением температуры квантовые распределения все более и более отклоняются от классического и притом в противоположные стороны. Эти отклонения могут быть иллюстрированы кривыми (рис. 2), а также зависимостью от температуры средней кинетической энергии частиц идеального газа, изображенной графически на рис. 3. В обоих случаях кривые 1 соответствуют классической статистике, кривые 2 — статистике Паули—Ферми, а кривые 3 — статистике Бозе—Эйнштейна. В случае статистики Паули—Ферми средняя кинетическая энергия

при абсолютном нуле температуры  $W_0$  оказывается отличной от нуля и притом тем большей, чем больше число частиц газа в данном объеме. С повышением температуры различие значений средней энергии, даваемых всеми тремя статистиками, постепенно уменьшается.

### III. ИСТОЛКОВАНИЕ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

Выше мы изложили лишь основные результаты квантовой статистики, совершенно не касаясь ни области применения того и другого ее варианта, ни ее обоснования с какой-либо общей физической стороны. Следуя историческому развитию физики за последние 30 лет, мы должны были бы пройти довольно сложный и извилистый путь, что потребовало бы слишком много места и слишком много труда со стороны читателя. Мы выберем поэтому другой, более простой, путь, связанный с новейшим развитием теории квантов в виде так называемой волновой механики.

Согласно волновой механике, поступательному движению всякой материальной частицы соответствует распространение ряда волн, длина которых  $\lambda$  связана с количеством движения частицы  $mv$  формулой де Бройля

$$mv = \frac{h}{\lambda}. \quad (10)$$

При колебательном движении частицы мы получаем вместо бегущих волн волны стоячие, которые можно рассматривать как результат интерференции волн, бегущих в противоположных направлениях. Для частицы, движущейся между двумя стенками, перпендикулярными направлению ее скорости и находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга, длина волн должна быть такова, чтобы на этом расстоянии умещалось целое число  $n$  полуволн, — совершенно так же, как это имеет место в случае колебаний струны, закрепленной на обоих концах. Мы получаем, таким образом, следующее условие «стационарности» движения:

$$d = n \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Заменяя здесь  $\lambda$  скоростью движения частицы согласно (10), мы находим для численного значения этой скорости выражение  $v = \frac{nh}{2md}$ , совпадающее с одним из квантовых условий (5).

Совокупность этих трех квантовых условий определяет в волновой теории длину и направление распространения волн, могущих образовать стоячие колебания внутри прямоугольного ящика с ребрами  $a, b, c$ .

Таким образом, квантованным состояниям теории Бора соответствуют по волновой теории стоячие волны определенной длины и направления.

При этом интенсивность волн, т. е. квадрат амплитуды колебаний, определяет число экземпляров соответствующей частицы, находящихся в характеризуемом этими волнами состоянии. Если энергия последнего равна  $W$ , то при наличии в нем  $N_i$  экземпляров энергия рассматриваемых волн равна  $N_i W_i$ .

Из этих представлений легко получить квантовое распределение (7) или (8), если предположить, во-первых, что для волн каждого типа вероятность энергии  $N_i W_i$  пропорциональна выражению  $e^{-\frac{N_i W_i}{kT}}$  или, вернее,

$$e^{-\frac{N_i(W_i - W_0)}{kT}} \quad (12)$$

в соответствии с классическим распределением Максвелла—Больцмана, где  $W_0$  представляет собой некоторую постоянную, от которой следует отсчитывать значения энергии, и, во-вторых, что число  $N_i$  может принимать: а) либо все значения, не превышающие общего числа частиц  $N$  (статистика Бозе—Эйнштейна), б) либо только значения  $N_i = 0$  и  $N_i = 1$  (статистика Паули—Ферми).

Среднее значение  $N_i$ , которое мы обозначим через  $\overline{N_i}$ , определяется в обоих случаях формулой

$$\overline{N_i} = \frac{\text{сумма } N_i e^{-\frac{N_i(W_i - W_0)}{kT}}}{\text{сумма } e^{-\frac{N_i(W_i - W_0)}{kT}}}, \quad (13)$$

причем в случае (а) сумма распространяется на все целые значения  $Ni$ , начиная от нуля и кончая практически бесконечностью, а в случае (б) — на значения  $Ni=0$  и  $Ni=1$ . В результате получается

$$\overline{Ni} = \frac{1}{e^{\frac{W_i - W_0}{kT}} \pm 1}, \quad (14)$$

где знак (+) соответствует случаю (б), а знак (—) — случаю (а), т. е. формулам (7) или (8), причем величина  $W_0$  связана с постоянной  $A$  соотношением  $A = e^{W_0/kT}$ .

#### IV. ЗАПРЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ (ПРИНЦИП ПАУЛИ) И СТАТИСТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА

Условие, ограничивающее значения  $Ni$  числами 0 и 1, называется принципом Паули, или, по терминологии самого Паули, «запретом эквивалентности». При этом под эквивалентностью двух частиц подразумевается нахождение их в одном и том же стационарном состоянии. Принцип Паули не связан непосредственно с волновой механикой и был сформулирован еще до ее появления исходя из анализа распределения электронов в атоме на основе теории Бора.

Боровская теория периодической системы элементов приводит, как известно, к тому выводу, что в сложных атомах электроны располагаются вокруг ядра в виде отдельных колец, или групп, соответственно разным значениям главного квантового числа  $n$ . При этом в первой, ближайшей к ядру, группе содержится максимум 2 электрона, во второй, образующейся после заполнения первой, — максимум 8, в третьей — максимум 18, в четвертой — максимум 32; вообще в  $n$ -й группе — максимум  $2n^2$  электронов. Более детальное исследование этой открытой Бором закономерности привело Стонера и Паули к тому выводу, что на каждую тройку квантовых чисел, из которых складывается главное квантовое число, т. е. на каждое мыслимое стационарное состояние, или, другими словами, на каждую квантованную электронную орбиту в сложном атоме приходится максимум 2 электрона. Вскоре выяснилось, что электрон имеет не только определенный электрический заряд, но вместе с тем является

как бы маленьким магнитиком, ось которого во внешнем магнитном поле может принимать лишь два противоположных направления — по полю и против поля. Таким образом, фиксируя ориентацию электрона, можно сказать, что каждое квантованное состояние в сложном атоме может быть представлено максимум одним электроном. В этом утверждении и заключается принцип Паули, сформулированный им в 1924 г.

Первоначально этот принцип применялся только к отдельным атомам, причем движение каждого электрона описывалось таким образом, как если бы оно происходило в некотором постоянном внешнем силовом поле, зависящем от ядра и среднего распределения заряда, образуемого остальными электронами. Другими словами, совокупность электронов трактовалась как некоторый идеальный газ, тяготеющий к ядру с его эффективным силовым полем. В последнее время это представление было с успехом применено Ферми к приближенному вычислению свойств сложных атомов. Введенное Ферми упрощение заключалось в замене квантованных состояний теории Бора фазовой протяженностью классической статистики; при этом принцип Паули сводился к тому условию, чтобы на каждую элементарную клетку фазовой протяженности [с объемом  $\left(\frac{h}{m}\right)^3$ ] приходился либо один электрон, либо ни одного. Далее расчет можно производить в предположении, что абсолютная температура электронного газа равна нулю, т. е. атом находится в нормальном состоянии, соответствующем минимуму его энергии.\*

Вскоре, однако, после появления работы Паули, Ферми попытался распространить высказанный им принцип на любой одноатомный газ, находящийся в произвольном (внешнем) силовом поле и притом при любой температуре. Именно учет последней и привел к построению на основе принципа Паули новой статистики Паули—Ферми. Однако вслед за этим выяснилось, что принцип Паули применим не к любому газу, как это первоначально думал Ферми, но, строго говоря, только лишь к электронному (а также к протонному) газу.

---

\* При этом фазовые клетки, соответствующие минимальным значениям энергии, заполнены, а все остальные — совершенно пусты.

В применении к электронам справедливость статистики Ферми была вскоре подтверждена работами Паули и Зоммерфельда о металлах. Своим отличительным свойством — способностью проводить электричество — металлы, как известно, обязаны присутствию в них подвижных, т. е. не связанных с определенными атомами, электронов. Эти электроны называются свободными. Свобода их, конечно, относительная, так как они прочно связаны со всеми атомами, образующими данный металл и потому при обычных условиях не могут вырваться наружу, т. е. за пределы ограничивающей его поверхности. В грубом приближении можно себе представить, что внутри металла свободные электроны движутся совершенно свободно, так, как если бы на них не действовали никакие силы, и что последние появляются лишь в поверхностном слое металла. Таким образом, металл можно представлять себе как ящик с непроницаемыми стенками, наполненный определенным количеством свободных электронов, практически вовсе не действующих друг на друга, поскольку это действие в среднем компенсируется действием атомных остатков (положительных ионов). В этой до пределов упрощенной форме квантово-статистическая теория электронного газа оказывается все же способной объяснить ряд свойств металлов, представляющих собой непреодолимые затруднения для классической теории (Друде—Лоренца). Так, например, согласно последней, свободные электроны должны были бы участвовать в тепловом движении наравне с атомами, и, следовательно, теплоемкость металлов должна была бы быть значительно больше, чем теплоемкость неметаллических одноатомных тел. В действительности теплоемкость тех и других, отнесенная к одному и тому же числу атомов, оказывается практически одинаковой по крайней мере в области не слишком высоких температур. Это обстоятельство непосредственно объясняется статистикой Паули—Ферми. Если мы взглянем на кривую 2 (рис. 2), то увидим, что наклон ее к горизонтальной оси, определяющий теплоемкость, очень мал при  $T=0$  и приобретает нормальную (классическую) величину лишь при более высокой температуре. Эта температура тем выше, чем больше концентрация электронного газа, т. е. число свободных электронов в единице объема металла (см. ниже). Считая, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону, мы получаем для



этой температуры значения порядка нескольких десятков тысяч градусов. Средняя энергия электронов при абсолютном нуле температуры имеет при этом такую величину, которую по классической статистике она имела бы при температурах только что указанного порядка.

Заметим, что в области не слишком высоких температур, в которой имеют место значительные отклонения статистики Паули—Ферми от классической, электронный газ называется «вырожденным», ввиду того что присутствие его не проявляется в тепловом отношении. Степень вырождения, которая может быть измерена средним значением кинетической энергии электронов при абсолютном нуле, тем больше, чем больше число электронов в единице объема. Это обстоятельство явствует из следующих соображений. При построении элементарных фазовых клеток мы должны комбинировать некоторый пространственный объем  $V_i$  с некоторым «скоростным объемом», т. е. протяженностью в пространстве скоростей, так чтобы их произведение равнялось  $\left(\frac{h}{m}\right)^3$ . Ввиду того что энергия электронов не зависит от их положения внутри объема  $V$ , занимаемого металлом, в качестве объемного множителя  $V_i$  можно воспользоваться для всех фазовых клеток  $i$  этим объемом  $V$ . Если бы не было запрета Паули, то все электроны расположились бы в первой фазовой клетке, соответствующей минимуму кинетической теории, т. е. неподвижности. Это, однако, столь же невозможно, как сосредоточение всех электронов в сложном атоме в одной лишь самой внутренней группе (кольце). На самом деле в упомянутой «низшей» фазовой клетке при абсолютном нуле температуры мы находим всего лишь два электрона, в следующей еще два и так далее, пока не будут размещены все электроны. Так как приращение скорости от одной клетки к следующей тем меньше, чем больше объем  $V$ ,\* то максимальная скорость, а следовательно, и средняя величина скорости должны быть тем больше, чем больше число электронов (клеток) и чем меньше объем  $V$ . Расчет показывает, что соответствующая этой

---

\* Ибо произведение  $V$  на интервал скорости должно равняться определенной величине.

средней скорости длина волны, по формуле де Бройля  $mv = \frac{h}{\lambda}$ , близка к среднему расстоянию между соседними

электронами, если их расположить на равных расстояниях друг от друга. В рассматриваемом нами случае эта скорость имеет порядок  $10^8$  см/сек., т. е. 1000 км в секунду.

Оба электрона, находящиеся в одной и той же фазовой клетке, должны иметь, по принципу Паули, противоположные ориентации. Если поместить металл в магнитном поле, то последнее стремится сориентировать все электроны в одном и том же направлении. Подобная ориентация может, однако, иметь место лишь при условии «развода» отдельных электронных пар, т. е. перехода одного из партнеров, имевшего ранее неблагоприятную ориентацию, к раздельному жительству в ближайшей свободной квартире (клетке) в одном из верхних этажей, где он принимает надлежащую ориентацию. Таким образом, намагничение металла, поскольку оно обуславливается ориентацией свободных электронов, связано с частичным увеличением кинетической энергии последних. Степень намагничения, определяемая условием минимума общей энергии (магнитной и кинетической), при абсолютном нуле температуры имеет весьма малую величину и тем меньшую, чем больше «степень вырождения» газа. Расчет показывает, что эта величина, так же как и средняя кинетическая энергия, очень мало зависит от температуры, пока газ остается вырожденным.

Заметим, что рассматриваемая нами модель металла должна была бы обладать бесконечной электропроводностью, т. е. не должна оказывать никакого сопротивления прохождению электрического тока. Это сопротивление может быть учтено, если принять во внимание то обстоятельство, что на самом деле электроны внутри металла не вполне «уравновешены», но испытывают силы, неправильным образом изменяющиеся как в пространстве, так и во времени. Эти силы, связанные с тепловым движением атомов металла, вызывают рассеяние электронных волн или, исходя из корпускулярной теории, резкие изменения в направлении движения электронов, причем совершенно такие же, как в случае столкновений атомов какого-либо газа между собой. Чем чаще происходят эти отклонения, тем большее сопротивление оказывает металл прохождению электрического тока.

Почти одновременно с работой Ферми о статистике идеального газа появилась работа Эйнштейна на ту же тему. Не вводя запрета эквивалентности Паули, Эйнштейн получил для стационарного распределения газа формулу (8), являющуюся обобщением знаменитой формулы Планка для распределения энергии в спектре теплового излучения. Согласно формуле Планка, средняя энергия осциллятора, способного совершать гармонические (маятниковобразные) колебания частоты  $\nu$ , при температуре  $T$  равна

$$\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Эта формула была получена Планком в 1900 г. полуэмпирическим путем. Затем, уже при ее истолковании, Планк предложил рассматривать величину  $h\nu$ , в ней фигурирующую, как элементарную порцию энергии, которую способен иметь осциллятор. Именно таким путем возникла теория квантов. Принимая во внимание, что энергия осциллятора может принимать лишь значения, кратные  $h\nu = W$ , Планк вынужден был допустить, что при взаимодействии осциллятора с излучением последнее может поглощаться или испускаться только лишь в виде целых порций, или квантов  $h\nu$ .

Несколько позже (в 1905 г.) Эйнштейн предложил трактовать световые кванты Планка как своего рода частицы, движущиеся прямолинейно и равномерно с энергией  $h\nu$  и количеством движения  $h/\lambda$  ( $\lambda$  — длина соответствующих им световых волн), впервые введя в физику корпускулярно-волновой дуализм, приведший в последнее время к созданию волновой механики. В 1912 г. Дебай упростил вывод Планка, предложив рассматривать в качестве планковских осцилляторов стоячие световые волны в пустом пространстве, замкнутом в оболочке с абсолютно отражающими стенками. Наконец, в 1924 г. Бозе вывел формулу Планка столь же непосредственным образом, заменив, однако, представление о световых волнах эйнштейновским представлением о световых квантах, т. е. рассматривая тепловое излучение не как совокупность световых осцилляторов, а как совокупность световых

квантов, или, другими словами, как квантовый газ. При этом он показал, каким образом должны быть видоизменены принципы классической статистики идеального газа, для того чтобы вместо формулы Больцмана получилась формула Планка, т. е. чтобы среднее число квантов величины  $h\nu = W$ , было бы пропорционально не  $e^{-W/kT}$ , но выражению

$$\frac{1}{e^{W/kT} - 1} \quad (15)$$

Наконец, в 1925 г. Эйнштейн обобщил вывод Бозе на случай обыкновенного газа, состоящего из конечного числа частиц, и получил формулу

$$N_i = \frac{1}{e^{(W_i - W_0)/kT} - 1}$$

[ср. (14)], которая при  $W_0 = 0$  обращается в формулу Планка. Статистика Бозе—Эйнштейна так же, как и статистика Паули—Ферми, приводит к своеобразным явлениям «вырождения» газов, т. е. отклонения их от классических законов идеальных газов. Эти отклонения выражаются в том, что при достаточно низких температурах частицы газа начинают постепенно выходить из игры, образуя как бы твердый комок (при отсутствии каких бы то ни было сил сцепления между ними). Если бы концентрированный электронный газ в металлах следовал статистике Бозе—Эйнштейна, то предсказываемые ею явления было бы легко заметить. Для всякого же другого газа, кроме квантового, т. е. излучения, вследствие сравнительно малой концентрации, а также большой массы частиц, определяющей размеры фазовых клеток  $\left(\frac{h}{m}\right)^3$ , отклонения от классических законов как в случае статистики Бозе—Эйнштейна, так и в случае статистики Паули—Ферми слишком незначительны, чтобы их можно было по крайней мере при современном состоянии экспериментальной физики обнаружить на опыте.

Имеются, однако, убедительные основания в пользу предположения, что обыкновенные газы, образованные нейтральными атомами, а не электронами или ионами, следуют именно статистике Бозе—Эйнштейна, а не статистике Паули—Ферми.

**VI. СУЩНОСТЬ КВАНТОВЫХ СТАТИСТИК;  
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ  
МЕЖДУ ОДИНАКОВЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Как уже указывалось в части I, классическая формула распределения Максвелла—Больцмана может быть выведена из рассмотрения столкновений между частицами газа. Сущность вывода заключается в следующем. Примем во внимание столкновения между частицами, находящимися, соответственно, в состояниях 1 и 2. Число подобных столкновений в единицу времени пропорционально произведению  $f_1 f_2$ , где  $f_1$  и  $f_2$  — значения плотности распределения для рассматриваемых состояний. В результате каждого из этих столкновений частица, находившаяся в состоянии 1, переходит в некоторое состояние 3, а частица, находившаяся в состоянии 2, — в некоторое состояние 4. Рассмотрим теперь обратные столкновения, при которых две частицы из состояний 3 и 4 переходят, соответственно, в состояния 1 и 2. Число подобных столкновений в единицу времени пропорционально произведению  $f_3 f_4$ . Можно показать, что коэффициент пропорциональности имеет в обоих случаях одно и то же значение. При наличии статистического равновесия среднее число частиц в каждом состоянии должно оставаться неизменным во времени, причем противоположно направленные процессы (в данном случае прямые и обратные столкновения) должны попарно компенсировать друг друга. Это соответствует так называемому принципу детального равновесия. Это условие выражается равенством

$$f_1 f_2 = f_3 f_4.$$

Но мы знаем, что плотность распределения должна зависеть только от энергии соответствующего состояния. Таким образом, предыдущее равенство может быть переписано в виде

$$f(W_1) f(W_2) = f(W_3) f(W_4). \quad (16)$$

При этом в силу закона сохранения энергии имеем равенство

$$W_1 + W_2 = W_3 + W_4. \quad (17)$$

Легко видеть, что это равенство может быть согласовано с условием равновесия (16) в том и только в том

случае, если функция  $f(W)$  имеет вид

$$f(W) = Ce^{\alpha W},$$

где  $C$  и  $\alpha$  — постоянные. Полагая  $\alpha = -\frac{1}{kT}$ , мы получаем распределение Максвелла—Больцмана (3).

Каким же образом необходимо видоизменить предыдущие рассуждения, для того чтобы получить формулы квантовой статистики? Рассмотрим сначала случай статистики Паули—Ферми. Здесь в качестве путеводной нити мы можем руководствоваться принципом Паули. Последний утверждает, что при столкновении между частицами, находящимися в состоянии 1 и 2, переход их в состояние 3 и 4 возможен только в том случае, если элементарные фазовые клетки, которые соответствуют состояниям 3 и 4, до столкновения были свободными. Для простоты исключим возможность помещения двух частиц (электронов) в одну и ту же клетку. Это упрощение является вполне законным, если мы будем рассматривать электроны разной ориентации просто как различные частицы.

Для большей наглядности вывода мы объединим в понятие «состояния» совокупность большого числа  $g$  квантованных состояний по теории Бора, т. е. фазовых клеток. Таким образом, состояния 1, 2, ... содержат  $g_1, g_2, \dots$  клеток. Среднее число частиц, находящихся в этих сводных состояниях, т. е. в каждой из этих групп клеток, мы обозначим через  $Q_1, Q_2$  и т. д.; введенные нами выше значения  $N_i$  равны, очевидно, отношениям  $\frac{Q_i}{g_i}$ . Число переходов типов  $(1, 2) \rightarrow (3, 4)$  в единицу времени, согласно предыдущему, должно быть пропорционально не только числу частиц, находящихся до столкновения в состояниях 1 и 2, т. е. произведению  $Q_1 Q_2$ , но, кроме того, числу свободных мест, имеющихся до столкновения в состояниях 3 и 4, т. е. произведению  $(g_3 - Q_3)(g_4 - Q_4)$ . Точно так же число обратных переходов  $(3, 4) \rightarrow (1, 2)$  должно быть пропорционально не только произведению  $Q_3 Q_4$ , но, кроме того, числу свободных клеток первой и второй группы, т. е.  $(g_1 - Q_1)$  и  $(g_2 - Q_2)$ . Таким образом, условие детального равновесия выразится в этом случае равенством

$$Q_1 Q_2 (g_3 - Q_3) (g_4 - Q_4) = Q_3 Q_4 (g_1 - Q_1) (g_2 - Q_2),$$

или

$$\frac{Q_1}{g_1 - Q_1} \frac{Q_2}{g_2 - Q_2} = \frac{Q_3}{g_3 - Q_3} \frac{Q_4}{g_4 - Q_4}. \quad (18)$$

В связи с условием сохранения энергии (17) отсюда следует точно так же, как и раньше,

$$\frac{Q_i}{g_i - Q_i} = A e^{\alpha W_i}$$

( $A$  и  $\alpha$  — постоянные), или

$$\frac{Q_i}{g_i} = \frac{1}{\frac{1}{A} e^{-\alpha W_i} + 1},$$

что ввиду  $\frac{Q_i}{g_i} = \bar{N}_i$  совпадает с формулой (7) при  $\alpha = -\frac{1}{kT}$ . Для того чтобы аналогичным путем получить формулу (8), выражающую закон распределения Бозе—Эйнштейна, в предыдущих рассуждениях разности  $g_i - Q_i$  необходимо заменить суммами  $g_i + Q_i$ , т. е. условие равновесия (18) заменить следующими:

$$Q_1 Q_2 (g_3 + Q_3) (g_4 + Q_4) = Q_3 Q_4 (g_1 + Q_1) (g_2 + Q_2). \quad (19)$$

Смысл его заключается, очевидно, в том, что вероятность перехода некоторой частицы из данного состояния в какое-либо другое тем больше, чем больше частиц того же рода уже находится в этом состоянии. Мы имеем здесь, следовательно, некоторый новый принцип, диаметрально противоположный запрету эквивалентности Паули, — принцип, который можно было бы назвать «поощрением эквивалентности». Это поощрение приобретает категорический характер приказания лишь при абсолютном нуле температуры. В этом случае все экземпляры рассматриваемой частицы должны сосредоточиться в одном и том же состоянии, соответствующем минимуму энергии (например, в состоянии покоя). При более высоких температурах некоторая доля частиц, притом тем большая, чем выше температура, оказывается переброшенной в состояния с большей энергией.

Качественно этот результат не отличается от того, который вытекает из классической статистики. Между ними, однако, существует количественное различие, вытекающее из вышеуказанного принципа «поощрения экви-

валентности», т. е. тяготения частиц к одному и тому же состоянию. Как уже, впрочем, упоминалось выше, в случае обыкновенных газообразных тел это количественное отличие слишком мало, чтобы его можно было установить экспериментальным путем.

Заметим, что формулы распределения как в классической, так и в квантовой статистике выводятся обычно не из приведенных нами кинетических соображений, относящихся к скорости тех или иных переходных процессов, а из подсчета вероятности различных распределений. Равновесное распределение определяется, следуя Больцману, как наиболее вероятное при заданном числе частиц и заданной общей их энергии. При этом, однако, вероятность данного распределения оказывается необходимым определить по-разному в зависимости от того, имеем ли мы дело с частицами, подчиняющимися классической статистике, статистике Паули—Ферми или статистике Бозе—Эйнштейна. Так, например, вероятность нахождения  $Q$  частиц в  $q$  состояниях (фазовых клетках) какой-нибудь данной группы оказывается пропорциональной следующим выражениям:

1)  $g^Q$ , т. е.  $Q$  раз взятому произведению числа  $g$  на самого себя, — в случае классической статистики;

2) произведению  $g(g-1)\dots(g-Q+1)$ , т. е.  $Q$  множителей, начинающихся с  $g$  и убывающих последовательно на 1, — в случае статистики Паули—Ферми;

3) произведению  $g(g+1)\dots(g+Q-1)$  — в случае статистики Бозе—Эйнштейна.

Первое из этих выражений получается исходя из обычного представления о том, что разные частицы одного и того же сорта, так же как частицы разного сорта (поскольку они не оказывают друг на друга никаких сил взаимодействия), как бы совершенно не считаются друг с другом в отношении выбора своего состояния. При распределении частиц по  $g$  клеткам мы получаем, таким образом, для каждой частицы  $g$  возможностей, для двух частиц —  $gg = g^2$  возможностей, для  $Q$  частиц —  $g^Q$  возможностей, причем все эти возможности являются равно вероятными.

В случае квантовых статистик одинаковые частицы, даже не действуя друг на друга механически, все же оказываются в своеобразной статистической связи, влияя друг на друга посредством своего распределения по состояниям.



Так, например, в случае статистики Паули—Ферми при распределении одинаковых частиц по клеткам мы имеем  $g$  возможностей лишь для первой частицы,  $g - 1$  возможностей — для второй, поскольку она не может попасть в клетку, уже занятую первой, и т. д.; для  $Q$ -й частицы получается  $g - (Q - 1)$  возможностей, а для всех  $Q$  частиц —  $g(g - 1) \dots (g - Q + 1)$  возможностей.

Наконец, в случае статистики Бозе—Эйнштейна взаимное статистическое воздействие одинаковых частиц выражается в еще более парадоксальной форме. А именно, при размещении  $Q$  частиц между  $g$  клетками мы получаем  $g$  возможностей для первой частицы,  $g + 1$  — для второй,  $g + 2$  — для третьей и т. д. Таким образом, выходит, что каждая частица занимает как бы «отрицательное» место, увеличивая на единицу емкость соответствующей клетки для других частиц такого же рода. Это толкование, при котором статистика Бозе—Эйнштейна характеризуется увеличением, а статистика Паули—Ферми уменьшением емкости каждой фазовой клетки (стационарного состояния) на единицу, принадлежит Л. Бриллюену.

## VII. ОБЩАЯ ВОЛНОВО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ (ДИРАК)

Изложенные выше соображения, помимо своей парадоксальности, отличаются еще значительной неполнотой и вызывают ряд сомнений.

Во-первых, не ясно, в каких случаях, т. е. по отношению к каким частицам (помимо электронов), нужно применять статистику Паули—Ферми и к каким (помимо световых квантов) — статистику Бозе—Эйнштейна.

Во-вторых, не понятно, почему своеобразная статистическая связь между частицами имеет место лишь в случае тождественных частиц, совершенно исчезая в случае частиц разного рода.

И, наконец, в-третьих, представляется сомнительной возможность примирения этой статистической связи с законами механики. Эту связь можно рассматривать как нечто вроде взаимного отталкивания или взаимного притяжения, но не в геометрическом, а в фазовом пространстве. Действительно, если допустить, что в некоторый начальный момент времени распределение частиц в фазовом пространстве удовлетворяет принципу «запрещения»

или «поощрения» эквивалентности, то будет ли оно ему удовлетворять во все последующие (или предыдущие) моменты времени, если предположить, что каждая частица движется независимо от других, под действием данных внешних сил, согласно основным законам механики?

Всего легче ответить на последний вопрос.

Согласно основной теореме классической статистической механики, так называемой теореме Лиувилля, фазовый объем, занимаемый некоторым количеством экземпляров какой-либо частицы, остается неизменным при движении этих экземпляров в любом силовом поле. Отсюда легко вывести, что при соблюдении условий одного из вариантов квантовой статистики в какой-нибудь момент времени эти условия в силу самих законов механики должны оставаться соблюденными во все времена.

Что касается второго вопроса, то в рамках классической механики он не находит себе ответа. Последний, однако, легко получается, если исходить из волновой механики в той элементарной форме, которая была набросана нами выше и согласно которой совокупность одинаковых невзаимодействующих частиц, находящихся в одном и том же квантовом состоянии, может быть изображена определенной системой стоячих дебройлевских волн с надлежаще выбранной амплитудой. Ясно, что для неодинаковых частиц подобное волновое изображение невозможно.

Однако для решения первого вопроса эти элементарные представления оказываются также недостаточными. Искомое решение может быть получено, если мы перейдем от них к несколько более сложным, но зато и более общим представлениям волновой механики, позволяющим трактовать любую систему частиц как одинаковых, так и различных с учетом их взаимодействия. Сущность этих представлений сводится к следующему. Данная система, состоящая, скажем, из  $N$  частиц, рассматривается прежде всего как одна частица (материальная точка) в протяженности  $3N$  измерений, образуемой совокупностью координат всех  $N$  частиц, т. е. величинами

$$x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_N, y_N, z_N.$$

Заметим, что этим приемом пользуется и классическая механика. Однако волновая механика не останавливается на этом и вводит далее для характеристики поведения (движения) рассматриваемой сборной частицы некоторый

волновой (колебательный) процесс, происходящий в том же  $3N$ -мерном конфигурационном пространстве. При этом квадрат амплитуды колебаний в каждой точке интерпретируется как вероятность соответствующей конфигурации.

Подобное волновое описание оказывается пригодным как для различных, так и для одинаковых частиц. В последнем случае, однако, представляется естественным выдвинуть добавочное требование, которое выражало бы факт тождественности, неразличимости рассматриваемых частиц, отбросив, как не имеющие физического смысла, все те решения волново-механической задачи, которые этому требованию не удовлетворяют.

Амплитуда колебаний должна, очевидно, представлять собой некоторую функцию координат всех рассматриваемых частиц и времени. Мы запишем ее для краткости в виде  $\psi(1, 2, \dots)$ , где цифры  $1, 2, \dots$  заменяют тройки координат  $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2$  и т. д.

Принцип тождественности частиц может быть выражен математически тем обстоятельством, что квадрат этой функции, определяющий вероятность соответствующей (характеризуемой соответствующими значениями координат) конфигурации, не должен меняться при различных перестановках частиц между собой. Другими словами, вероятность  $[\psi(1, 2, \dots, N)]^2$  должна быть симметрической функцией переменных  $1, 2, \dots$ .

При этом предполагается, что вероятность того или иного состояния (симметричного или антисимметричного) всей системы частиц при данной температуре  $T$  выражается через ее полную энергию  $E$  обычной (классической) формулой Максвелла—Больцмана, т. е. она пропорциональна выражению  $e^{-\frac{E}{kT}}$ . Это предположение может быть, впрочем, легко доказано путем рассмотрения слабого взаимодействия данной системы с какой-нибудь другой на основании условия статистического равновесия.

#### VIII. СТАТИСТИКА СЛОЖНЫХ ЧАСТИЦ И НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ

Данное Дираком оформление квантовой статистики строго решает не только третий и второй из поставленных в начале предыдущей части вопросов, но дает также весьма простое решение первого.

Представим себе, что рассматриваемые частицы имеют сложное строение, т. е. состоят из нескольких электронов и протонов. При этом оказывается, что если общее число тех и других нечетное, то наши частицы подчиняются статистике Паули—Ферми; если же оно четно, — то статистике Бозе—Эйнштейна. Предполагается далее, что электроны, а также и протоны в отдельности подчиняются принципу Паули, т. е. их поведение описывается антисимметричными волновыми функциями.

Действительно, переставляя, например, две сложные частицы, мы тем самым переставляем сразу все электроны и протоны, их образующие; при перестановке каждой пары электронов или протонов волновая функция должна изменять свой знак. Если, следовательно, число этих пар нечетное, то в результате перестановок получится перемена знака; в противном случае последний остается неизменным.

Эта симметрия может иметь место только в двух случаях: если сама амплитуда  $\psi$  (1, 2, ...,  $N$ ) представляет собой также симметричную функцию координат, либо, наоборот, функцию антисимметричную, т. е. такую, которая при перестановке любых двух переменных (частиц) меняет свой знак на противоположный. Легко показать, что волновое уравнение Шредингера, определяющее функцию  $\psi$ , всегда имеет подобные решения. Переходя к частному случаю совокупности  $N$  одинаковых частиц, не действующих друг на друга, нетрудно убедиться, что антисимметрические функции (амплитуды) соответствуют «запрещению», а симметричные, наоборот, — «позощрению» эквивалентности в указанном выше смысле, т. е. принципам, которые лежат в основе статистики Паули—Ферми, с одной стороны, и Бозе—Эйнштейна — с другой.

В самом деле, например, если две какие-нибудь частицы, скажем 1 и 2-я, находятся в одном и том же квантовом состоянии, то функция  $\psi$ , очевидно, не должна изменяться от их перестановки. В случае симметричности  $\psi$  это требование выполняется автоматически. В случае же антисимметричности оно приводит к равенству  $+\psi = -\psi$ , т. е.  $\psi = 0$ . А это равенство означает, что при условии нахождения двух частиц в одном и том же состоянии вероятность любой конфигурации рассматриваемой системы равна нулю, т. е., другими словами, находя-

дение двух частиц в одном и том же состоянии невозможно.

Приведенная уточненная формулировка «запрета» Паули принадлежит Дираку,<sup>1</sup> который дал весьма простое доказательство того факта, что антисимметричные функции (амплитуды) приводят к статистике Паули—Ферми, а симметричные — к статистике Бозе—Эйнштейна.

Таким образом, например, атомы водорода и вообще нейтральные атомы и молекулы, поскольку дело касается их поступательного движения, должны подчиняться статистике Бозе—Эйнштейна. Так как световые кванты являются нейтральными частицами, то представляется естественным распространить эту статистику и на них. Следует заметить, что сложные частицы, независимо от своего поступательного движения, могут находиться в ряде различных внутренних квантовых состояний, соответствующих различной внутренней энергии той системы элементарных частиц (электронов и протонов), которую они собой представляют.

При этом каждая сложная частица под влиянием взаимодействия с другими частицами или с излучением, т. е. со световыми квантами, может переходить из одного внутреннего квантового состояния в другое. Легко показать, что в состоянии статистического равновесия распределение сложных частиц по различным внутренним состояниям определяется классической формулой Больцмана, т. е. среднее число частиц данного сорта, находящихся в  $i$ -м внутреннем состоянии с энергией  $W_i$ , пропорционально выражению  $e^{-\frac{W_i}{kT}}$ .

При этом взаимодействие между разными частицами должно быть настолько слабым, чтобы оно не отражалось существенным образом на внутренних состояниях. Поскольку число (среднее) частиц данного сорта в различных внутренних состояниях остается неизменным, распределение их по различным состояниям поступательного движения для различных внутренних состояний происходит совершенно так же, как если бы последним соответствовали частицы разного сорта.

Последнее соображение относится до некоторой степени и к элементарным частицам (электронам и протонам), поскольку они могут иметь две различные (проти-

воположные) ориентации. Возможность этих двух ориентаций учитывается проще всего путем прибавления к трем координатам электрона (или протона) четвертой координаты, способной принимать лишь два значения. При формулировке условия антисимметричности волновой функции (амплитуды колебаний)  $\psi(1, 2, \dots, N)$  мы должны теперь под символами 1, 2 и т. д. подразумевать не тройки, но четверки координат.

Остается нерешенным последний вопрос: почему электроны и протоны характеризуются антисимметричными (а не симметричными) функциями, т. е. подчиняются принципу запрещения (а не поощрения) эквивалентности?

На этот вопрос пока не существует вполне ясного и убедительного ответа, так как он может быть решен лишь совместно с общим вопросом о том, почему материя состоит из электронов и протонов.

В своей последней работе Дирак дал чрезвычайно интересную попытку решения этих вопросов, основывающуюся на предположении, что масса, а следовательно, и энергия электронов может принимать не только положительные, но и численно им равные отрицательные значения. Следует, впрочем, заметить, что этот результат непосредственно вытекает из основного уравнения волновой механики электронов, установленного самим же Дираком. Если бы электроны следовали статистике Бозе—Эйнштейна, т. е. если бы поведение их описывалось симметрическими функциями, то все они перешли бы в состояние отрицательной энергии или связанной с ней отрицательной массы. Подчиняясь же статистике Паули—Ферми, они более или менее плотно заполняют все клетки отрицательной энергии (массы); при этом сравнительно очень малая часть их попадает в клетки с положительной энергией, образуя обычно наблюдаемые нами электроны, оставляя в почти непрерывном множестве электронов с отрицательной энергией (массой) равное число «дырок», которые наблюдаются нами в виде протонов (между тем как электроны с отрицательной энергией непосредственно не наблюдаются).<sup>2</sup>

Переход электрона из обычного положительного состояния в отрицательное должен восприниматься нами как аннигиляция электрона и протона, сопровождающаяся

испусканием двух фотонов. При этом процессе выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Эта замечательная по своей глубине и остроумию теория, сводящая с помощью «запрета эквивалентности», как фундаментального принципа, дуалистическую концепцию материи к монистической, пока наталкивается на ряд весьма существенных затруднений. Мне думается, однако, что дальнейшее развитие волновой механики позволит устранить эти затруднения.

## II. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



### МИСТИКА МИРОВОГО ЭФИРА

**М**истицизм, т. е. вера в сверхъестественное, наименее уместен, казалось бы, в естественных науках. В действительности, однако, не только биология, но и физика не вполне свободны от мистических элементов.

В области физических наук очагом, или средоточием, мистицизма является, по нашему мнению, понятие мирового эфира. Это понятие до сих пор многими учеными рассматривается как основание физического строения мира. В этом смысле роль эфира вполне сравнима с ролью божества в религиозном понимании Вселенной. Можно без преувеличения сказать, что для физиков и натур-философов старой школы эфир является тем же, чем божество для верующих. Сравнение развития эволюции этих понятий выявляет поразительное сходство между ними — сходство, доходящее порой до тождества.

В обоих случаях эта эволюция завершается полным отрицанием, полным упразднением эфира, с одной стороны, и божества — с другой. Однако подобный финал оказывается неприемлемым для лиц, воспитавшихся в соответствующих традициях, и одни из них, рассудку вопреки, наперекор фактам, пускаются в богоискательство, другие — в эфироискательство.

#### 1. ЭФИР ГЮЙГЕНСА И ФРЕИЕЛЯ

Примитивному человеку, незнакомому с законами природы, было совершенно чуждо противопоставление естественного и сверхъестественного, т. е. допускаемого и не-



допускаемого этими законами. Все явления природы мыслились им как деятельность живых существ, непосредственно видимых — в форме людей и животных, или способных скрываться от человеческого взора; последние назывались им богами. Впрочем, невидимость богов объяснялась отнюдь не их бестелесностью. При желании боги могли открываться людям в форме людей же (или животных) отличавшихся от прочих подобных же существ лишь большей силой или ловкостью и вообще большим развитием тех или иных свойств.

Если от этой первобытной анимистической \* космогонии мы обратимся к примитивной физической космогонии, которая начала формироваться как точная наука лишь после пробуждения человечества от средневековой спячки, то мы увидим совершенно аналогичную картину.

Как ни величественна натур-философия Ньютона, как ни широка она по своему объему, она все же была крайне ограничена по содержанию, которое сводилось главным образом к движению и взаимодействию небесных тел. Природа же этих тел, природа самой материи и совершавшихся в ней процессов оставалась почти неизвестной.

Поэтому при распространении принципов ньютоновской механики на все физические явления пионеры физической науки, и в том числе сам Ньютон, нисколько не поколебались присоединить к обыкновенной видимой весомой материи целый ряд невидимых или невесомых веществ с совершенно особенными свойствами. Сюда относятся, например, световые частицы Ньютона, тепловые частицы, образующие особое невесомое вещество — флогистон, электрические и магнитные флюиды Кулона и т. д.

Все эти особенные вещества относились к обычным примерно так же, как первобытные боги к обыкновенным людям. Но, подобно тому, как по мере развития анимистического мировоззрения все эти боги были вынуждены уступить место единому богу, поглотившему или подчинившему их всех, точно так же, по мере развития физи-

---

\* Эпнтет «анимистический» (анима (лат) — душа) определяет главные представления первобытных народов, одухотворявших явления природы.

ческой концепции мира, различные «божественные вещества» были отчасти вытеснены, отчасти поглощены одним из них — световым эфиром Гюйгенса.

Основываясь на многочисленных аналогиях между световыми и звуковыми явлениями, голландский физик Гюйгенс предложил в начале XVIII в. новую теорию света, до сих пор излагаемую в большинстве учебников как последнее слово современной науки. В противоположность Ньютону, который предполагал, что свет зависит от частиц особой «световой» материи, «истекающей» во все стороны от светящихся тел, Гюйгенс высказал мысль, что свет представляет собой особую форму колебательного движения материальных частиц, передающегося от одного тела к другому через особую упругую среду, заполняющую пространство, которое нам кажется абсолютно пустым и которое соединяет друг с другом как отдаленнейшие небесные тела, так и соседние частицы этих тел. Новое божественное вещество, открытое или, вернее, изобретенное Гюйгенсом, отличалось от обыкновенных упругих тел лишь своей невидимостью и невесомостью, а также и более тонким строением, позволявшим частицам эфира внедряться в промежутки между частицами весомой материи.

Теория Гюйгенса давала возможность весьма просто объяснить явления отражения и преломления света, но оставляла совершенно открытым вопрос о характере световых колебаний и о свойствах эфира как упругой среды вне и внутри весомых тел. В первой четверти XIX в. этот вопрос старался выяснить известный французский ученый Френель.

Прежде всего, Френелю удалось доказать, что световые колебания, в противоположность звуковым, имеют не продольный, а поперечный характер, т. е. сводятся к упругим сдвигам, направление которых перпендикулярно световым лучам. Подобные упругие сдвиги могут, очевидно, происходить лишь в твердых (несжимаемых) телах, а потому эфир пришлось рассматривать не как газ, подобный воздуху, но как твердое тело (безграничных размеров). То обстоятельство, что световые колебания имеют чисто поперечный характер, свидетельствовало о том, что эфир не способен испытывать изменения объема, т. е. в отличие от обыкновенных твердых тел он является абсолютно несжимаемым. Что же касается сте-

пени его твердости, то о ней можно было судить по скорости распространения света. Принимая во внимание, что последняя равна 300 000 километров в секунду, т. е. примерно в сто тысяч раз больше, чем скорость распространения колебаний в обычных твердых телах, можно было заключить, что эфир обладает либо колоссальной твердостью, либо необычайно малой плотностью. Установленные Френелем формулы в точности соответствовали экспериментальным фактам.

Таким образом, в реальном существовании светового эфира — невесомого, твердого и несжимаемого посредника между обыкновенными материальными телами и частицами — не должно было, казалось, оставаться ни малейшего сомнения.

## II. ЭФИР ФАРАДЕЯ И МАКСВЕЛЛА

Однако развитие идеи эфира не остановилось на этом «световом» этапе. Из малого бога, светового Меркурия физического Олимпа, ему суждено было превратиться в великого и единого бога, не только наполняющего, но и составляющего собой материальную вселенную.

Это превращение произошло в течение второй и третьей четверти XIX в. благодаря главным образом работам гениальных английских физиков — Фарадея, который высказал основные идеи, положившие начало дальнейшему возвеличению эфира, и Максвелла, который воплотил эти идеи в точную количественную теорию.

Идеи Фарадея выросли из экспериментального изучения электромагнитных явлений. Наблюдая взаимодействие наэлектризованных и намагниченных тел, Фарадей пришел к мысли, что сила, которую каждое из этих тел оказывает на остальные, не передается непосредственно через разделяющую их пустоту, но что посредником, осуществляющим эту передачу, является тот самый световой эфир, которым как будто бы так хорошо объяснялись все световые явления.

Мысль Фарадея о передаче электромагнитных действий через световой эфир оказалась необычайно плодотворной. Истинное значение ее заключается, однако, вовсе не в логической конструкции, а в физическом сближении электромагнитных явлений, с одной стороны, и световых — с другой. Отсюда вытекала прежде всего однородность

этих явлений, считавшихся в то время совершенно различными. Передаваясь через ту же среду, что и световые колебания, электромагнитные волны должны распространяться в пространстве со скоростью света; что же касается световых колебаний, то они, очевидно, должны иметь электромагнитную природу, т. е. обуславливаться электромагнитными колебаниями.

Предчувствия Фарадея блестяще оправдались. Уточняя его основные идеи и облекая их в математическую форму, Максвелл в 60-х годах прошлого века пришел к своей знаменитой электромагнитной теории света, открывшей, можно сказать, новую эру в физике.

Соображения Максвелла отнюдь не являлись точными выводами из представлений Фарадея.

Расширение роли эфира в физической концепции Вселенной являлось фактически победой его над другими божественными субстанциями физики и прежде всего над таинственными электрическими флюидами Кулона. Если электрические силы представляют собою упругие напряжения в эфире, окружающем наэлектризованные предметы, то сущность электризации должна сводиться к смещению эфира в ту или иную сторону от этих тел, например, наружу, в случае положительной электризации, и внутрь — в случае отрицательной (или наоборот).

Таким образом, с точки зрения Максвелла, электричество совершенно утрачивало свой прежний субстанциальный характер; электрические заряды превращались в центры положительного или отрицательного смещения эфира, расходящегося от них или сходящегося к ним в направлении электрических силовых линий.

Что касается магнитных субстанций, то они еще в начале XIX в., т. е. до Фарадея и Максвелла, превратились в математическую фикцию. Магнитные действия электрических токов, изученные французским физиком Ампером, давали возможность рассматривать магнетизм как следствие вращательного движения электрических зарядов в отдельных частицах железа и других магнитных веществ, а магнитные силы — как дополнительные «электрокинетические силы» между движущимися зарядами (отсутствующие в случае их покоя).

С «дематериализацией» электрических зарядов и перенесением центра тяжести электрических явлений в эфир,

последний сделался также средоточием магнитных явлений, которые сводились Максвеллом к особого рода вихревым движениям в эфире.

Поскольку все электрические и магнитные свойства обыкновенных (весомых) материальных тел определялись свойствами заполняющего их эфира, все эти тела можно было рассматривать как эфир, измененный определенным образом в отношении своей плотности или упругих свойств. При этом в соответствии с атомистической теорией отдельные атомы необходимо было трактовать как центры особых вихревых возмущений в эфире («вихревые атомы» лорда Кельвина). Так или иначе, превратившись из передатчика световых явлений и средоточие явлений электромагнитных, поглотив электрические и магнитные субстанции, а вслед за ними и обыкновенную материю, эфир становился тем самым единственной материальной основой Вселенной. «Пространством бесконечный и течением времени предвечный» мировой эфир получил все атрибуты единого бога, который «все собою заполняет, объемлет, зиждет, составляет» и которого, кстати сказать, «никто постичь не мог».<sup>1</sup> Ибо, как мы сейчас увидим, новые свойства эфира, вытекающие из его электромагнитных функций, совершенно не поддавались последовательной механической интерпретации. Установив культ мирового эфира как материального вседержителя, физика превратилась в учение об эфире, в своего рода теологию, которая обратила все свои усилия к согласованию и взаимному примирению различных свойств этого особого божества.

### III. ЭФИР ЛОРЕНЦА

Нам нет надобности рассматривать те внутренние противоречия, которые таятся в понятии того единого, всемогущего, вездесущего бога, который является завершением развития религиозного мировоззрения. Одно из них, общее для всех монотеистических учений, заключается в несовместимости божественного произвола и естественного закона, открываемого изучением явлений природы. Пытаясь устранить это коренное противоречие без ущерба для «верховного существа», религиозно настроенные умы просвещенного человечества вынуждены были установить «принцип невмешательства» в земные дела, как основу божественной политики, «Создавший все

единым словом» единый бог «просвещенных» религиозных мыслителей дал материальному миру определенный свод законов, предоставив ему в дальнейшем жить совершенно самостоятельно на основании этой конституции и раз и навсегда отказавшись от каких-либо «интервенций». Таким образом, роль бога в материальном мире была сведена к сотворению последнего; после этого творческого акта бог «удалился на покой», превратившись из ваятеля в зрителя, и притом совершенно бесстрастного.

Совершенно очевидно, что этот пассивный бог просвещенных теистов не имеет ничего общего, кроме названия, с живым и человекообразным богом иудейства, христианства и всех прочих примитивных монотеистических учений. Утратив живую связь с человечеством, отказавшись от всякого влияния на его дальнейшие судьбы, а равно и на судьбы материального мира вообще, этот нейтральный бог теперь сделался совершенно неуязвимым для придиричливой критики, но вместе с тем и никому не нужным, кроме просвещенных мистиков, для которых самый туманный и в полной мере бессодержательный теизм представляется все же более приемлемым, чем полное отрицание бога, т. е. атеизм.

Механические свойства эфира, которые были необходимы для обоснования электромагнитной теории Максвелла, являлись не только совершенно непонятными, но и находились в непримиримом противоречии друг с другом. Одно из этих противоречий заключается в невозможности вихревых движений, необходимых для объяснения магнетизма в твердом теле, которым должен являться эфир (в виде поперечности световых колебаний); подобные вихревые движения возможны лишь в жидкостях. Не останавливаясь на других, менее очевидных, но не менее разительных противоречиях, заметим, что многочисленные попытки их разрешения, несмотря на усилия самого Максвелла и других физиков, потерпели полную неудачу. Таким образом, эфир оказался неспособным к выполнению той мировой роли, к которой он был призван Фарадеем и Максвеллом. Превратившись в сплетение несовместимых друг с другом свойств, он, подобно единому богу религиозных учений, оказался под угрозой полного опразднения.

Для освобождения эфира от внутренних противоречий основоположник современной электронной теории гол-

ландский физик Лоренц был вынужден преобразовать это понятие в духе, совершенно аналогичном вышеупомянутым теистическим теориям. Для этого ему прежде всего пришлось восстановить материальность электричества в соответствии с новыми фактами, открытие которых относится к концу прошлого века. Оказалось, что нейтральные атомы содержат более мелкие частицы, обладающие определенными, неизменными электрическими зарядами. При известных условиях эти частицы могут отделяться от атомов и, таким образом, подвергаться непосредственному исследованию. Подробное исследование показало, что отрицательно наэлектризованные частицы совершенно одинаковы, из каких бы атомов они ни происходили, и что при этом они в 2000 раз легче атомов водорода. Эти частицы, которые можно рассматривать как атомы отрицательного электричества, были названы электронами. Наряду с ними в атомах находятся более массивные и прочно связанные частицы с положительными зарядами и массой, равной массе водородных атомов, — так называемые положительные электроны, или протоны.

Нейтральный атом водорода представляет собой не что иное, как комбинацию одного протона и одного электрона. Все прочие атомы состоят из тех же самых протонов и электронов, находящихся, однако, в более или менее прочном соединении друг с другом.<sup>2</sup> Такова сущность современных представлений о строении материи. В начале девяностых годов прошлого века, т. е. в момент появления теории Лоренца, они находились еще в зачаточном состоянии. Тем более существенным является первый шаг, выразившийся в признании материальной природы и атомистического строения электричества, или, вернее, первичности и неизменности электрического заряда как свойства элементарных частиц материи — электронов.

Не пытаясь рассматривать электроны как центры упругих деформаций эфира, Лоренц предположил, что эфир существует сам по себе как динамический посредник между ними, совершенно, однако, не участвуя в их движении, т. е. оставаясь абсолютно неподвижным. Никаких деформаций или вихрей в эфире, которые соответствовали бы электрическим или магнитным силовым линиям, теория Лоренца не предполагает. Подвижность является основным свойством материи. Представляя себе эфир как нечто абсолютно неподвижное, теория Лоренца, очевидно,

отнимала у него все свойства (кроме неподвижности) и в том числе материальность, которая возвращалась электричеству в форме электронов.

Нематериальный и неподвижный эфир Лоренца, за который ухватились физики в чаянии спасти «верховное божество» от окончательной гибели, не имеет, очевидно, ничего общего с материальным и упругим эфиром Гюйгенса и Френеля, Фарадея и Максвелла, кроме, разве, названия. Но — такова власть слова над понятиями — слово «эфир» было сохранено. Все, казалось, обстоит если не совсем по-старому, то, во всяком случае, вполне благополучно. И, подобно просвещенным теистам нашего времени, отвергнувшим живого бога своих предков и погруженным в мистическое созерцание нового «нейтрального» бога, которому до них нет никакого дела и до которого, в сущности говоря, им также нет никакого дела, современные физики заменили конкретный и вещественный эфир мифической туманностью, ничем, по существу, не отличающейся от неподвижного пустого пространства, которым в свое время оперировал Ньютон.

#### IV. ЭЙНШТЕЙН И АТЕИЗМ В ФИЗИКЕ

Падение эфира точно так же, как и падение божества, не могло, конечно, остановиться на этой ступени. В мыслящей части человеческого общества теизм давно уже начинает сменяться атеизмом — полным отрицанием бога. Аналогичным образом заканчивается и эволюция понятия об эфире. Последний удар этому понятию был нанесен теорией относительности Эйнштейна, отнявшей у лоренцовского эфира существенное его свойство — неподвижность. Из этой неподвижности вытекала возможность фактического измерения абсолютной скорости различных тел, т. е. скорости их по отношению к эфиру. Так, например, совершенно ясно, что распространение света может происходить с одной и той же скоростью по всем направлениям лишь в том случае, если источник света и материальное тело, на котором исследуется его распространение, неподвижны по отношению к эфиру. Таким образом, измеряя скорость распространения света в различных направлениях вдоль земной поверхности, можно было бы установить истинное движение Земли, совпадающее с тем направлением, в котором световые волны, догоняя зем-



ной шар, распространяются по отношению к последнему с наименьшей скоростью. Подобного рода опыты, поставленные с необыкновенной тщательностью американским физиком Майкельсоном, дали отрицательный результат: не только «абсолютное» движение Земли, но даже движение ее вокруг Солнца ни в малейшей степени не отражаются на распространении световых колебаний, исходящих от земных источников (по отношению к земной поверхности). Наоборот, если свет испускается внешним источником, движение Земли легко обнаруживается в периодическом смещении кажущегося положения звезд на небесном своде (так называемая абберрация света). Таким образом, течение физических явлений зависит не от «абсолютного», а от относительного движения, т. е. движения материальных тел по отношению к той системе, с которой связан наблюдатель. При таких условиях неподвижный эфир Лоренца совершенно утрачивает всякий физический смысл и вместе с тем всякое право на дальнейшее существование. Из «всего», чем он представлялся в эпоху расцвета теории Максвелла, он катастрофическим образом и вместе с тем почти незаметно, благодаря неизменности своего названия, превратился в «ничто», в синоним пустого пространства.

Кризис эфира в конце XIX в. представлялся кризисом всего механического мировоззрения, которое, казалось, базировалось на нем, как на фундаменте. В действительности, однако, эфир оказался не фундаментом величественного здания современного электромеханического мировоззрения, а теми «лесами», которые были необходимы при его возведении и которые убираются долой по окончании постройки. Аналогичную роль в развитии сначала физических, а затем этических и социальных понятий человечества играло и продолжает играть понятие божества. Выполнив свою историческую миссию, оно точно так же, как и понятие эфира, должно сойти со сцены.

Но старые привычки мышления имеют необычайную силу над человеческими умами. Эти привычки оказываются сплошь и рядом сильнее логики и даже фактов, препятствуя не только правильному истолкованию, но и простому уяснению последних.

Крушение эфира поставило многих, если не большинство, физиков в положение верующих, которых убеждают стать атеистами и перестроить свое мировоззрение на по-

зитивных началах, но которые, подобно верующим наших дней, бьются в последних попытках сохранить и логически обосновать любимые заблуждения привычного мировоззрения.

Начинается настоящий мистический культ мирового эфира, своеобразное эфирискательство, схожее, как две капли воды, с не менее распространенным в верхушках как русского, так и западноевропейского общества течением — богоискательством и богостроительством.

Некоторые физики, закрывая глаза перед очевидными фактами, пытаются вернуться к привычным представлениям об эфире времен Фарадея и Максвелла, восстановить настоящего живого бога, каким эфир являлся в доброе старое время. К этой группе принадлежит, между прочим, маститый английский физик О. Лодж,<sup>3</sup> который, будучи убежденным спиритом, тесно связывает эфир с материализацией духов. Другие с фанатическим рвением пытаются построить новый эфир, состоящий не из материальных атомов, а из атомов энергии (квантов). Такова теория известного немецкого физика Ленарда,<sup>4</sup> который, не ограничиваясь ординарным эфиром, изобретает два эфира, проникающих друг в друга. Показательно, что соответствующая книга Ленарда «О принципе относительности, эфире, тяготении», вышедшая впервые в 1919 г., уже успела выдержать несколько изданий (переведена и на русский язык). Таким образом, излагаемый в ней миф о происхождении обыкновенного эфира из первичного, весьма напоминающий древнегреческий миф о рождении богов Хроносом, встречает, очевидно, если не сочувствие, то во всяком случае интерес в широких кругах немецких физиков.

Было бы бесполезно перечислять другие примеры. Изложенного достаточно для доказательства того положения, что физики еще не вполне освободились от мистического тумана в области своей науки и что неспособность значительной части просвещенного человечества перейти к атеизму, а значительной части современных физиков отказаться от эфирискательства имеют один и тот же корень и кроются в традициях и инертности приемов человеческого мышления.

## ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

**В** 1930 г. исполнилось 25 лет с момента появления двух революционных физических теорий, связанных с именем Эйнштейна — теории относительности и квантовой теории света. Именно эти две теории выдвинули Эйнштейна на первое место в ряду современных физиков, сделав его Ньютоном XX века. Одновременное появление их (в 1905 г.) отнюдь не является случайностью, как это может показаться на первый взгляд. Теория относительности сблизила механику и оптику, обнаружив фундаментальное значение скорости света для механических явлений, т. е. явлений движения материальных частиц, и тем самым открыла путь новому механическому истолкованию световых явлений как явлений корпускулярных. Правда, по этому пути теория относительности могла идти лишь рука об руку с появившейся за пять лет до нее теорией квантов, созданной М. Планком. Рассматриваемая же независимо от теории квантов теория относительности завершила тот долгий путь, по которому шла классическая физика XIX в., закончив эмансипацию последней от мирового эфира и подведя простую рациональную базу под электромагнитную и электронную теории, создание которых является одним из главных достижений физики XIX в.

Таким образом, теория относительности стоит как бы на рубеже старой и новой физики, венчая первую и указывая путь второй. Именно поэтому первый и, быть может, наиболее решительный шаг на этом пути был сде-

лан самим автором теории относительности в форме выставленной им квантовой теории света.

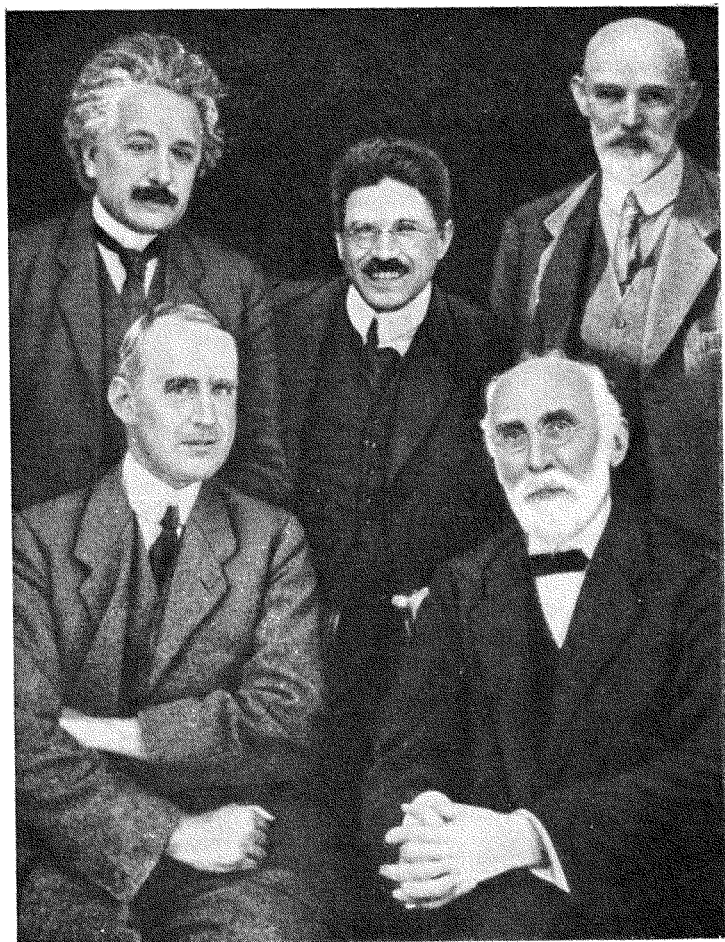
Одним из весьма распространенных предрассудков, связанных с теорией относительности, является представление о том, что, согласно этой теории, все относительно. Такое представление глубоко ошибочно.

Теория Эйнштейна утверждает, что многие события, многие свойства, считающиеся абсолютными, в действительности являются относительными; но, с другой стороны, она разрушает старые понятия абсолютного лишь для того, чтобы заменить их новыми. Правильнее, быть может, было бы назвать ее теорией абсолютности, а не теорией относительности. Она вводит в рассмотрение относительные величины лишь для того, чтобы с их помощью построить величины абсолютные и установить правила, связывающие эти величины, правила, являющиеся абсолютными и выражающие физические законы.

Другим предрассудком является мнение, согласно которому теория относительности полностью создана Эйнштейном. В действительности она была подготовлена работами Ньютона. Понятие относительности пространства содержалось уже в работах Ньютона. Эйнштейн обобщил это понятие, дополнив его понятием относительности времени.

В своих знаменитых «Принципах» Ньютон утверждает, что пространство абсолютно и пребывает в состоянии покоя, время также абсолютно и течет равномерно, вне какой бы то ни было связи с остальными событиями. Оставляя пока в стороне вопрос о времени, выясним, что имел в виду Ньютон, говоря, что пространство абсолютно и находится в состоянии покоя.

Из результатов, установленных самим Ньютоном, вытекает физическая невозможность обнаружения и даже определения этого состояния покоя. Если некоторая система координат покоится, а другая система координат движется равномерно и прямолинейно по отношению к первой, то все события с позиций второй, движущейся, системы будут протекать точно таким же образом, как и с позиций первой системы, предполагаемой в состоянии покоя. Насколько можно судить исходя из рассмотрения физических явлений, между этими системами координат нет никакого различия — обе они с одинаковым правом могли бы считаться покоящимися.



*Сидят (слева направо): А. Эддингтон, Г. Лоренц.  
Стоят: А. Эйнштейн, П. Эренфест, В. де Ситтер  
Голландия, г. Лейден, 26 сентября 1923 г.*

Это подтверждает факт, хорошо известный всем по опыту езды в трамвае, поезде или на пароходе.

Вы чувствуете себя в равномерно движущемся поезде или на корабле столь же удобно, как в комнате, на твердой земле. Равномерное движение остается незаметным.

В равномерно движущемся вагоне все события протекают точно так же, как если бы они происходили по отношению к Земле; поэтому у нас нет никаких оснований говорить, что Земля находится в состоянии покоя, а вагон движется.

Этот же результат может быть получен математически из законов движения, установленных Ньютоном. Тем самым он опровергает первоначальное утверждение Ньютона, согласно которому абсолютное пространство пребывает в состоянии покоя. Первое релятивистское понятие, которое мы должны ввести в рассмотрение — относительность равномерного прямолинейного движения. Если заданы две системы, движущиеся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, то любая из них может рассматриваться как покоящаяся. Следствием этой относительности движения, или, точнее, следствием относительности равномерного и прямолинейного движения является относительность расстояний между точками пространства постольку, поскольку эти точки соответствуют событиям, относящимся к разным моментам времени.

Скажем более конкретно. Предположим, что вы едете поездом и переходите из своего купе в вагон-ресторан; в некоторый момент времени вы начинаете двигаться и через несколько минут приходите в вагон-ресторан. Какое расстояние прошли вы при этом? Ответ на этот вопрос зависит от способа измерения расстояния. Если вы будете измерять его по отношению к поезду, оно окажется весьма коротким, скажем, 150—200 м. Если вы будете измерять пройденное вами расстояние по отношению к Земле, то получите совсем другую величину, зависящую от скорости поезда. Совсем не обязательно, однако, ограничиваться движением Земли. Вы могли бы принять во внимание также и движение Земли в пространстве. Можно было бы, например, рассматривать движение Земли в системе координат, связанной с центром тяжести солнечной системы. При этом оказалось бы, что пройденное вами расстояние составляет не 200 м или несколько километров, пройденных за то же самое время поездом по отношению к Земле, а равняется нескольким сотням или даже тысячам километров, так как Земля двигалась по отношению к системе координат, закрепленной в центре тяжести солнечной системы.

Впрочем у вас нет никаких оснований пользоваться именно этой системой координат. Вы могли бы рассмат-

ривать движение солнечной системы по отношению к любой другой координатной системе, причем оказалось бы, что пройденное вами расстояние является совершенно неопределенной величиной: оно могло бы равняться 100 м, 100 км и т. д.

Эта неопределенность является результатом того обстоятельства, что в пустом пространстве положение точки не может быть определено однозначным образом. Оно может быть определено только по отношению к некоторой системе координат. Если имеются две движущиеся относительно друг друга координатные системы, то расстояние между точкой, из которой вы вышли, и точкой, в которую вы пришли, будет различно для обеих систем. Предположим, например, что одна из координатных систем движется вместе с вами. По отношению к этой системе вы всегда будете находиться в состоянии покоя, и пройденное вами расстояние будет равняться нулю.

Мы видим, таким образом, что если равномерное движение является относительным движением, то расстояние между точками пространства также относительно, или, вернее, неопределенно.

В этот принцип следует, однако, внести существенное дополнение: он справедлив только при рассмотрении расстояния между точками, относящимися к неодновременным событиям. Расстояние между двумя точками, рассматриваемыми в один и тот же момент времени, в теории Ньютона считается абсолютным, т. е. независимым от выбора покоящейся системы координат. Определение покоя в этом случае было бы несущественным. Поскольку понятие одновременности рассматривается как абсолютное, т. е. независящее от определения покоя или движения, последнее не может оказать влияния на наше определение расстояния между двумя точками, наблюдаемыми в один и тот же момент времени, так как расстояние, пройденное нами (или нашей системой координат) в равный нулю промежуток времени, равно нулю.

Здесь следует предостеречь читателей от возможного недоразумения. Когда говорят о расстоянии между двумя предметами, имеется в виду точки пространства, с которыми эти два предмета совпадают в соответствующие моменты времени. Расстояние между двумя предметами или точками пространства, которые они занимают в один и тот же момент времени, согласно теории Ньютона, не

должно зависеть от того, какую именно систему координат мы предполагаем покоящейся. Мы видим, таким образом, что расстояние между двумя точками относительно, поскольку они относятся к неодновременным событиям, но оно абсолютно, если они относятся к событиям одновременным.

В теории Ньютона этот абсолютный характер расстояния между точками, относящимися к одновременным событиям, был связан с абсолютным характером одновременности.

Понятие одновременности в теории Ньютона считалось абсолютным, понятие промежутка времени между двумя событиями — однозначным, в противоположность пространственному расстоянию между ними. При этом предполагалось, что можно говорить об определенном моменте времени для всей Вселенной и соответственно этому определить промежуток времени одним и тем же образом для всей Вселенной, независимо от координатной системы, которую мы предполагаем покоящейся и в которой мы определяем место всех наблюдаемых событий.

Теория Ньютона была, таким образом, лишь полурелятивистской. Она была релятивистской по отношению к пространству и расстоянию в пространстве лишь постольку, поскольку не принималось в рассмотрение время. При рассмотрении различных точек в один и тот же момент времени считалось, что расстояния между ними являются абсолютными, так как одновременности приписывался абсолютный смысл.

Выясним теперь, каким образом в теории Ньютона допускалась возможность однозначного определения некоторого момента времени для всей Вселенной. Я убежден, что в этом отношении многие из читателей являются верными последователями теории Ньютона, полагая, что есть все основания для определения одновременности подобным абсолютным образом. В теории Ньютона имелось также физическое основание в пользу предположения о возможности однозначного определения одновременности для всего мира. Это физическое основание заключалось в ньютоновской концепции силы как действия на расстоянии. Действительно, каким образом можно установить, что два события, происходящие в различных местах, например, на двух разных планетах, являются одновременными? Только с помощью некоторого действия,



передающегося с этих планет, причем это действие не обязательно должно быть световым. Достаточно предположить, что имеется некоторое действие, которое может мгновенно передаваться с этих двух планет на Землю. Если подобного рода действие существует, то теоретически мы должны были бы иметь возможность установить однозначным образом понятие одновременности в применении к событиям, осуществляющимся в разных точках пространства.

Именно таково было ньютоновское и посленьютоновское представление о передаче сил на расстояние. Вплоть до второй половины XIX столетия предполагалось, что силы могут мгновенно передаваться через пространство. Мы так привыкли к подобному представлению, что даже не замечаем, как оно проскальзывает в наши рассуждения. Когда физик говорит о силе взаимодействия между двумя телами, как об определяющей относительным положением этих тел, он даже не упоминает при этом, что имеется в виду одновременное положение обоих тел. Эту одновременность он рассматривает как нечто само собой разумеющееся.

Когда он говорит, например, о действии, испытываемом Землей со стороны Солнца, Луны и других планет, он предполагает обычно, что это действие зависит от одновременного положения всех рассматриваемых небесных тел. Он предполагает тем самым, что это действие мгновенно передается через все пространство. Именно это представление о действии на расстоянии, распространяющемся в пространстве с бесконечной скоростью, и составляет основу предположения, согласно которому одновременность может быть определена однозначным образом. Если можно представить себе теоретически, что весь мир в некоторый момент времени может быть охвачен действием, исходящим от какого-либо тела, то вполне естественно говорить об одновременности как о чем-то определенном, не зависящем от выбора системы координат. Это представление о силе, мгновенно распространяющейся в пространстве, было развито в ньютоновской теории тяготения. Предполагалось, что тяготение представляет собой силу, действующую на расстоянии в пустом пространстве и передающуюся с бесконечной скоростью. Ньютон не пытался понять природу тяготения. Он удовлетворился констатированием того обстоятельства, что

силы тяготения сходны с силами инерции, связанными с ускоренным движением, так как те и другие пропорциональны одной и той же величине, определяемой как масса тела.

Ньютон не пошел дальше этих представлений. Заметим также, что в теории Ньютона принцип относительности движения не мог быть обобщен на случай движения неравномерного, т. е. движения, связанного с ускорением. Предполагалось, что ускорение, т. е. быстрота изменения скорости, абсолютно и что понятие относительности к ускоренному движению неприменимо.

Мы видим, таким образом, что теория относительности содержалась уже в старой физике, созданной Ньютоном, но что она ограничивалась одним лишь пространством, не затрагивая вопроса о времени, и, далее, ограничивалась рассмотрением одного лишь прямолинейного и равномерного движения.

Посмотрим теперь, как изменила эти представления теория Эйнштейна и что послужило основой для этого изменения?

Появление теории Эйнштейна было подготовлено развитием физики во второй половине XIX столетия.

Основные сведения, полученные в результате этого развития, заключались в том, что 1) все физические силы, за исключением сил тяготения, могут быть сведены к электрическим силам, обусловленным неизменными электрическими зарядами элементарных частиц материи — электронов и протонов, и что 2) электрические силы распространяются в пустом пространстве с конечной скоростью, тогда как силам тяготения приписывалась вначале бесконечная скорость передачи через пустое пространство.

Поскольку все физические силы имеют электрическое происхождение, скорость их распространения должна равняться скорости света, так как свет представляет собой явление электрическое. В наше время электричества и радио каждый знает, что электромагнитные силы распространяются в пространстве в форме электромагнитных волн с той же скоростью, что и свет; световые колебания отличаются от этих радиоклебаний только частотой и длиной волны. Длина волны световых колебаний примерно в миллиард раз меньше длины радиоволн, причем это различие обусловлено малыми размерами атомов ма-

терии, играющих роль передающих станций для световых волн.

Совпадение скорости света со скоростью распространения электрических сил является, таким образом, выражением того обстоятельства, что свет представляет собой одно из проявлений электричества. Если в дальнейшем я буду говорить о скорости света, то это лишь будет означать, что подчеркивается оптическая сторона физических явлений.

Оставляя пока в стороне вопрос о силах тяготения, предположим, что все физические силы распространяются с конечной скоростью — скоростью света. Как повлияет это предположение на определение одновременности? Я напому еще раз, что абсолютный характер одновременности в теории Ньютона был связан с представлением о том, что все пространство может быть охвачено в один и тот же момент времени физической силой, обусловленной некоторым материальным телом. Мы видим теперь, что это представление ошибочно. Физическая сила, обуславливаемая любым материальным телом, распространяется с конечной скоростью. Тот фундамент, на котором основывалось представление об одновременности как о чем-то абсолютном, оказывается, таким образом, разрушенным. Тем самым создается предпосылка для релятивизации понятия времени.

Относительность времени вытекает из невозможности объединения (путем физического действия) во времени того, что разделено в пространстве. Этот принцип мог бы служить исходным пунктом теории Эйнштейна. Путь, которым идут пионеры науки, зачастую оказывается значительно более сложным, нежели тот, по которому мы можем следовать, когда нам уже известна его конечная цель. Путь, которым шел Эйнштейн при построении своей теории, гораздо сложнее намеченного мной; поэтому в дальнейшем мы будем придерживаться этого более краткого пути.

Итак, у нас нет никаких оснований предполагать, что события, разделенные в пространстве, могут быть объединены во времени. Нет никаких причин, по которым «расстояние» во времени между двумя событиями, имеющими место на разных планетах, должно было бы быть вполне определенной величиной, т. е. величиной, не зависящей от выбора системы координат, предполагаемой

в состоянии покоя. Оно может быть столь же неопределенным, как и расстояние между точками пространства, в которых эти две планеты находились в рассматриваемый момент времени.

Вполне возможно, что расстояние во времени между двумя событиями, происходящими на Юпитере и на Марсе, казалось бы различным наблюдателю, находящемуся на Земле, и наблюдателям, находящимся на какой-нибудь другой планете, если бы таковые там имелись.

У нас нет, таким образом, никакого критерия для сравнения промежутков времени между двумя событиями, определенными наблюдателями, которые связаны с двумя различными системами координат. Я должен, однако, предостеречь читателей от следующей ошибки. Иногда говорят, что теория Эйнштейна радикальным образом изменяет наши представления о времени и пространстве, особенно наши представления о времени. Однако, поскольку мы рассматриваем события по отношению к какой-либо определенной системе координат (находящейся в состоянии покоя), например по отношению к Земле, теория Эйнштейна не вносит никаких изменений в наши понятия о времени и пространстве. Теория Эйнштейна позволяет проводить сравнение пространственных и временных интервалов между данными событиями, измеренных в различных координатных системах, движущихся относительно друг друга прямолинейно и равномерно, причем каждая из этих систем может считаться покоящейся.

Как же должны быть определены промежутки времени между двумя определенными событиями наблюдателями, связанными с различными системами координат, движущимися по отношению друг к другу? Ответ на этот вопрос может быть дан с помощью того же самого основного принципа, который приводит нас к относительности времени, а именно, принципа конечности скорости распространения физических действий. Это обстоятельство нуждается в более подробном рассмотрении.

Первоначальная (специальная) теория Эйнштейна основывалась на относительности пространства, поскольку эта относительность связана с относительностью равномерного прямолинейного движения, т. е. движения с постоянной скоростью. Если движение является относительным, то скорость всякого движения так же, как и скорость

распространения силы, должна иметь относительный смысл. Эта скорость должна, таким образом, зависеть от выбора покоящейся системы координат. Мы установили, однако, с другой стороны, что физические действия распространяются в пустом пространстве с вполне определенной скоростью, равной скорости света, т. е. 300 000 км/сек. Эта скорость относительна, т. е. может быть определена только по отношению к некоторой покоящейся системе координат, но она должна в то же время иметь вполне определенное значение, не зависящее от выбора этой координатной системы. Эти рассуждения на первый взгляд содержат внутреннее противоречие.

Из относительности скорости вытекает как будто ее неопределенность, т. е. зависимость ее величины от выбора покоящейся координатной системы, причем это должно иметь место для любых скоростей, в том числе и для скорости света. Если бы, однако, это было так, то исследование распространения света и вообще физических сил должно было бы дать нам возможность провести существенное различие между двумя системами координат, движущимися относительно друг друга. Если бы свет распространялся по отношению к двум таким системам различным образом, то мы наверняка могли бы сказать, что эти системы находятся в различных состояниях движения, т. е. обладают различными скоростями по отношению к пустому пространству. Координатная система, по отношению к которой свет распространяется во всех направлениях со стандартной скоростью 300 000 км/сек., могла бы быть определена как действительно покоящаяся, а все остальные системы, по отношению к которым скорость света имела бы различные значения по разным направлениям, могли бы быть определены как действительно движущиеся. Однако понятия действительного движения, действительного покоя, действительной скорости означают, что покой, движение и скорость могут быть определены в абсолютном смысле по отношению к пустому пространству, т. е. по отношению к основной системе координат, предполагаемой в состоянии покоя. Это означало бы отказ от принципа относительности движения.

Но как мы можем отказаться от этого принципа, если пространство действительно пусто, если оно не заполнено материальной средой? Как можно говорить о движении в абсолютном смысле слова? Говоря о том, что простран-

ство абсолютно и находится в состоянии покоя, Ньютон не придавал этим словам серьезного значения. Мы, очевидно, не можем определить истинную скорость тела по отношению к пустому пространству.

Если, таким образом, принцип относительности движения справедлив, то все скорости должны быть относительными, включая, конечно, и скорость света; последняя, однако, должна быть абсолютной в том смысле, что она должна иметь одно и то же значение, независимо от выбора покоящейся координатной системы, по отношению к которой она измеряется. Нет ли, однако, противоречия между предположением об относительности скорости в том смысле, что она может быть определена только по отношению к координатной системе, произвольным образом полагаемой покоящейся, и утверждением, что она в то же время абсолютна в смысле своей независимости от выбора этой системы?

Между этими двумя положениями нет никакого противоречия, так как термин «относительный» (в первом случае) и «абсолютный» (во втором) применяются в совершенно различном смысле. Я предпочел бы в обоих случаях пользоваться двумя различными терминами. Термин «относительный» следовало бы применять к скорости в том смысле, что она приобретает определенную величину только по отношению к некоторой координатной системе, которая предполагается покоящейся; скорость света не представляет в этом смысле исключение. Она также приобретает определенное значение только по отношению к той или иной системе координат, которую мы считаем находящейся в состоянии покоя. При рассмотрении какой-либо другой скорости не только само ее определение, но также и ее численное значение зависит от выбора покоящейся координатной системы. Такие скорости являются, таким образом, переменными, или неопределенными. Скорость света, или, точнее, скорость распространения всех физических действий, занимает исключительное положение в том смысле, что, будучи относительной, она в то же время является определенной, неизменной, или, как обычно говорят математики, инвариантной, что ни в коей степени не означает ее абсолютного характера. Инвариантность скорости света была установлена экспериментально Майкельсоном, безуспешно пытавшимся обнаружить различие между скоростями распространения

световых лучей по отношению к Земле (учитывая ее движение в пространстве) в различных направлениях

Не отрицая ни в коей мере исторической важности опытов Майкельсона, мы можем сказать теперь, что они были ненужными. Если бы физики не были предубеждены представлением об эфире — материальной среде, через которую якобы происходит распространение световых колебаний, то они пришли бы к основным представлениям теории относительности без помощи каких бы то ни было опытов над распространением света по отношению к Земле. Действительно, теперь, после ликвидации теории эфира, мы знаем, что в случае распространения света по отношению к Земле с разными скоростями в разных направлениях мы имели бы право говорить об абсолютной скорости Земли по отношению к пустому пространству. Подобного рода понятие не имело бы, как мы знаем, никакого физического смысла.

Посмотрим теперь, каковы следствия этих двух принципов — относительности любой скорости и инвариантности скорости света (инвариантность скорости света не исключает ее относительного характера; все остальные скорости должны зависеть от выбора системы координат).

Рассмотрим для примера распространение радиосигнала от одного корабля к другому, причем первый из них стоит на якоре, а второй движется по отношению к нему. Предположим, что с корабля, стоящего на якоре, посылается радиосигнал движущемуся кораблю. Каково расстояние, пройденное сигналом, и время, необходимое для прохождения этого расстояния? Расстояние между точкой пространства, из которой радиосигнал передается, и точкой пространства, в которой он принимается, зависит от выбора системы координат, предполагаемой в состоянии покоя. Если эта система связана с кораблем, стоящим на якоре, то точкой приема сигнала является та точка пространства, в которой находится второй корабль в момент прихода сигнала, причем эта точка смещена по отношению к его положению в момент передачи сигнала с первого корабля на расстояние, пройденное вторым кораблем за время распространения сигнала.

Если же система координат связана со вторым кораблем, предполагаемым в состоянии покоя, тогда как находящийся на якоре корабль движется вместе с Землей

В противоположном направлении, то точкой отправления сигнала будет та точка пространства, в которой стоящий на якоре корабль находился в момент передачи сигнала, а точка приема сигнала может быть отождествлена с той точкой пространства, в которой второй корабль находился в тот же самый момент времени, так как предполагается, что он остается в покое. Таким образом, расстояние, пройденное радиосигналом, должно быть различным для наблюдателей на первом и втором кораблях.

Но будет ли время, прошедшее между передачей сигнала и его приемом, также зависеть от выбора покоящейся системы координат? Согласно старой теории, на этот вопрос следует ответить отрицательно, так как она утверждает, что это время представляет собой нечто совершенно определенное и должно иметь одно и то же значение для любой системы координат. Это означало бы, что скорость распространения радиосигнала неопределенна, что величина ее должна зависеть от выбора системы координат, предполагаемой в состоянии покоя.

Мы знаем, однако, что это не так. Скорость световых или радиоволн должна быть одной и той же по отношению к любой системе координат. С другой стороны, расстояние должно быть различным исходя из координатных систем, движущихся по отношению друг к другу, поэтому мы вынуждены прийти к заключению, что интервал времени между двумя определенными событиями, например, между передачей и приемом сигнала в нашем случае, также должен иметь различную величину в разных координатных системах. Мы должны, таким образом, отказаться от старой догмы абсолютности и инвариантности времени. Этот отказ представлялся бы большой жертвой, если бы мы упорствовали в представлении о том, что время может быть определено абсолютным образом для всего пространства, т. е. мы могли бы в один и тот же момент времени охватить все пространство некоторым мгновенно распространяющимся физическим действием.

Мы знаем теперь, что то, что разделено в пространстве, не может быть объединено во времени. Поэтому нет никаких препятствий к тому, чтобы перестать считать длительности, т. е. промежутки времени между двумя определенными событиями, одинаковыми, если эти промежутки определены двумя различными наблюдателями, движущимися относительно друг друга. Мы охотно отка-



жемся от этих представлений. Спрашивается, однако, как мы будем находить соотношения между различными временами, определяемыми различными наблюдателями? Легко показать, что именно та инвариантность скорости света, из-за которой мы вынуждены пожертвовать абсолютностью времени, дает нам возможность установить вышеупомянутые соотношения, т. е. сравнить измерения времени, произведенные различными наблюдателями. Можно сказать, что интервалы времени между двумя определенными событиями — передачей радиосигнала с первого корабля и приемом его вторым кораблем, определенные по отношению к двум различным координатным системам, должны относиться друг к другу так же, как и соответствующие расстояния, чтобы отношение расстояния ко времени, равное скорости света, в обоих случаях было одинаковым.

При отсутствии принципа инвариантности скорости света у нас не было бы абсолютно никакого способа сравнения определений времени различными наблюдателями. Только этот принцип дает нам возможность сравнивать различные оценки времени. Здесь следует подчеркнуть, что теория относительности допускает инвариантность только одной скорости — скорости света. Невозможно было бы построить последовательную теорию пространства и времени, если бы мы считали инвариантными две или больше различных скоростей.

Теория относительности Эйнштейна основывается, таким образом, на особом, исключительном характере скорости света. Предыдущие результаты могут быть иллюстрированы графически, что поможет нам понять их. Проведем две взаимно перпендикулярные оси  $Ox$  и  $Oy$  (рис. 4). Расстояние будем откладывать вдоль первой оси, а время\* — вдоль второй. Точка  $P$  на такой диаграмме будет характеризовать событие, место которого определяется расстоянием этой точки вдоль оси  $Ox$ , а время — расстоянием ее вдоль оси  $Oy$ . Проекция линии  $PQ$ , где точки  $P$  и  $Q$  характеризуют два различных события, будут представлять пространственное и временное расстояние между этими событиями. Непрерывный ряд точек, т. е. линия, графически характеризует движение. Прямая

---

\* Время при этом умножено на надлежаще выбранный коэффициент, который имеет размерность скорости

линия соответствует равномерному движению (в определенном направлении). Вертикальная линия характеризует движение со скоростью, равной нулю, т. е. движение «во времени» (без какого бы то ни было изменения положения). Мы можем сказать, таким образом, что вертикальная линия характеризует покой, тогда как наклонная линия — движение, причем угол наклона является мерой скорости этого движения.

Относительность движения на подобной диаграмме может быть интерпретирована как относительность на-

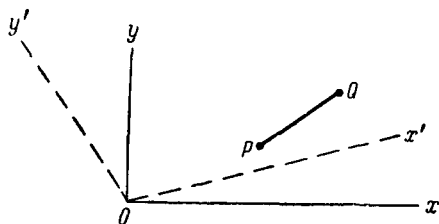


Рис. 4.

клона прямой, характеризующей движение. Мы можем с одинаковым успехом предположить, что линия  $Oy$  вертикальна, характеризую состояние покоя, тогда как наклонная линия  $Oy'$  характеризует движение, или же  $Oy'$  вертикальна, а  $Oy$  наклонна, характеризую движение в противоположном направлении.

Сейчас, в XX столетии, очень легко понять эту относительность направлений, в частности вертикального направления. Вертикальное направление различно в различных точках земной поверхности, например, для обитателей Москвы или Парижа. Оно отнюдь не является определенным направлением в пространстве, как это мы представляли себе. В действительности оно совершенно неопределенно, так что любое направление может считаться вертикальным. Понятие наклона, таким образом, также должно быть относительным. Оно зависит от выбора вертикального направления; эта относительность наклона представляет графически относительность равномерного движения или скорости.

Рассмотрим теперь точки  $P$  и  $Q$ , представляющие два события (рис. 5). Как было упомянуто выше, расстояние между местами этих двух событий и «расстояние» между их временем (промежуток времени) будут измеряться

проекциями линии  $PQ$  на координатные оси. В координатной системе  $xOy$  ( $Oy$  — ось времени, характеризующая покой) эти расстояния будут равняться, соответственно,  $PC$  и  $CQ$ .

Выберем теперь другую систему координат  $x'Oy'$ , где ось времени, или «покоя», представлена наклонной линией  $Oy'$ . Проекции  $PQ$  на эти новые оси будут равняться  $P'C'$  и  $C'Q'$ ; они будут отличны от  $PC$  и  $CQ$  и будут представлять другое расстояние в пространстве и другой промежуток времени. Что касается пространственных расстояний, то различие их являлось вполне естественным уже и в «теории относительности» Ньютона. Различие же между определениями времени, измеряемого отрезками

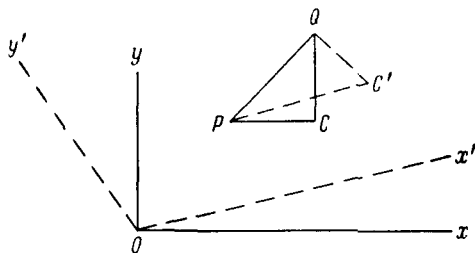


Рис 5.

$CQ$  и  $C'Q'$ , составляет характерную черту новой релятивистской теории Эйнштейна.

Существует ли, однако, какая-либо величина, остающаяся инвариантной при переходе от одной системы координат к другой и имеющая одно и то же значение в обеих системах? Такой величиной является пространственно-временное расстояние  $PQ$ ; оно остается неизменным независимо от того, в какой системе координат его определяют. Мы видим, таким образом, что, разрушая абсолютный характер понятий, считавшихся абсолютными, теория относительности вводит взамен новые абсолютные понятия, не зависящие от выбора системы координат, предполагаемой покоящейся.

Я должен сказать теперь несколько слов об измерении пространственных расстояний между событиями, предполагаемыми одновременными. В качестве примера можно было бы привести определение длины некоторого стержня, движущегося в продольном направлении. В популярных изложениях теории относительности часто

утверждается, что такой стержень должен испытывать продольное сокращение. Почему движущийся предмет должен сокращаться и как можно говорить об определенном сокращении, если движение относительно? На самом деле он вовсе не должен сокращаться. Это представление о продольном сокращении является предрассудком и недо-разумением. Следует ясно представлять себе, что мы имеем в виду, говоря о длине движущегося тела. Эта длина, т. е. длина стержня, определяется как расстояние между точкой пространства, в которой один конец его находился в определенный момент времени, и той точкой пространства, в которой второй его конец находился в тот же самый момент времени. Расстояние между двумя различными точками пространства, с которыми совпадают концы стержня в один и тот же момент времени, и определяется как длина движущегося стержня.

Что означает выражение «один и тот же момент времени»? Это понятие не является вполне определенным. События, кажущиеся одновременными в одной системе координат (предполагаемой в состоянии покоя), не будут одновременными в другой системе координат. Расстояние между двумя точками пространства, в которых концы стержня находились «в одно и то же время», будет различно в зависимости от выбора покоящейся координатной системы. Если в системе координат, по отношению к которой стержень движется, это расстояние оказывается меньшим, нежели в той системе координат, по отношению к которой он покоится, то это отнюдь не свидетельствует о фактическом уменьшении его длины, означая лишь вполне естественную изменчивость расстояний в пространстве, связанную с относительным характером определения одновременности.

Это положение может быть иллюстрировано следующим примером. Предположим, что мы хотим измерить высоту Исаакиевского собора в Ленинграде. Мы могли бы определить эту высоту, сказав, что она равняется расстоянию от основания до его верхушки. Будет ли такое определение правильным? Оно, несомненно, верно с точки зрения ленинградского наблюдателя. Попробуем стать теперь на точку зрения, например, московского наблюдателя. Для этого совсем не обязательно переезжать из Ленинграда в Москву и оттуда рассматривать Исаакиевский собор в телескоп; достаточно просто заменить ле-

нинградскую вертикаль московской. Какова при этом будет высота собора? Она уже не будет равняться расстоянию от его основания до вершины, а будет проекцией этого расстояния на московскую вертикаль, являющуюся с точки зрения ленинградского наблюдателя наклонной. Мы видим, таким образом, что с точки зрения московских наблюдателей ленинградские здания обладают меньшей высотой; вместе с тем ленинградские вертикальные линии обладают некоторой длиной, равной их проекции на московскую горизонтальную плоскость. Пересечем теперь Атлантический океан, направляясь, например, в Нью-Йорк. Московская вертикаль будет параллельна нью-йоркской горизонтали, а московская горизонталь — нью-йоркской вертикали. Таким образом, с точки зрения нью-йоркского наблюдателя ленинградское высокое здание вовсе не будет обладать высотой, а только одной лишь длиной. В этом нет никакой мистики, никакого фокуса; эти результаты являются непосредственным следствием самого определения высоты как проекции на вертикальную линию в связи с относительностью вертикального направления. Предположим, что телеграфный столб упал на землю. Какова будет его высота? Расстояние между концами столба представляло бы собой высоту в том случае, если бы столб стоял вертикально, но при горизонтальном положении столба это расстояние является его длиной. То же самое можно сказать об определении расстояния во времени и в пространстве. Первое, или «длительность», может быть сравнено с высотой, второе — с длиной. Обе величины являются проекциями некоторого пространственно-временного расстояния; они зависят от выбора координатной системы, предполагаемой в состоянии покоя, т. е. от определения покоя. В связи с относительностью высоты и длины и возможностью приписывания одному и тому же телеграфному столбу различных высот, та высота, которая может быть отождествлена с расстоянием от верхушки столба до его основания и которая соответствует системе координат, где столб имеет вертикальное положение и обладает длиной, равной нулю, рассматривается обычно, если не как истинная, то как наиболее естественная.

То же самое может быть сказано относительно определения расстояний во времени и расстояний в пространстве между двумя событиями. При рассмотрении двух

различных событий можно поступать одним из следующих двух способов. Можно в одних случаях выбрать координатную систему таким образом, чтобы оба события казались происходящими в одной и той же точке пространства (соответствующие точки на диаграмме  $xOy$  должны лежать на одной и той же вертикали); пространственно-временное расстояние сводится при этом к расстоянию во времени. Последнее может быть трактовано как истинное, т. е. наиболее удобное или наиболее естественное определение интервала времени в том же смысле, в каком высота Исаакиевского собора, определенная в Ленинграде, является наиболее удобной или естественной мерой его высоты.

В других случаях можно выбрать координатную систему таким образом, чтобы по отношению к ней оба события казались одновременными, но происходящими в различных точках пространства. Расстояние между последними может быть определено как наиболее естественная мера пространственного расстояния между ними (например, определение длины стержня).

Я хотел бы еще раз указать, в чем заключается основное значение теории относительности для физики. Существенную роль играет не только «релятивизация» понятий, которые мы считали абсолютными. Значительно более существенной является другая сторона теории — установление новых абсолютных понятий, или инвариантных величин и инвариантных соотношений между «вариантными» величинами, так как физические законы должны быть неизменными, или «инвариантными» соотношениями, справедливыми независимо от определения состояния покоя, т. е. независимо от выбора системы координат, по отношению к которой мы рассматриваем различные физические явления.

Принцип относительности играет для физики ту же роль, что и компас для мореплавателя. Сам по себе он не дает нам возможности делать новые открытия подобно тому, как наличие компаса не является достаточным для открытия новых земель. Если же, однако, у мореплавателя есть некоторое представление о направлении, в котором может лежать новая земля, то с помощью компаса он безошибочно сможет достичь ее. Так же обстоит дело и с теорией относительности: если физик обладает хорошей интуицией, если он знает в общих чертах, к чему он

хочет прийти, то теория относительности укажет ему дорогу. Следуя пути, указываемому теорией относительности, он не сможет заблудиться. Этот метод продемонстрировал свою силу в эйнштейновской теории тяготения, связанной с общей теорией относительности, и позднее в развитии новой квантовой теории.

Следует сказать теперь о запаздывающем распространении физических сил. Именно на этом представлении основывались все вышеизложенные соображения.

Возникновение теории относительности обычно связывается с отрицательным результатом опыта Майкельсона, который должен был обнаружить влияние движения Земли на распространение света по отношению к ее поверхности. Основываясь на представлении о свете, как о колебательном (волнообразном) движении эфира, и полагая, что последний не увлекается Землей, Майкельсон пытался показать, что свет от земных источников распространяется по отношению к Земле с неодинаковой скоростью по разным направлениям. В действительности, скорость света оказалась одинаковой для всех направлений. В соответствии с теорией эфира приходилось заключать, что эфир увлекается Землей, принимая участие в ее движении в мировом пространстве. Это заключение противоречит, однако, тому, которое вытекало из учета влияния движения Земли на распространение света от небесных источников (абберация звезд — кажущееся изменение направления соответствующих световых лучей, явление Допплера — кажущееся изменение частоты световых колебаний, т. е. смещение спектральных линий). Для объяснения этого противоречия Фитцджералдом была предложена *ad hoc*\* придуманная гипотеза, согласно которой все обыкновенные тела испытывают при движении в эфире продольное сокращение, зависящее от отношения скорости движения Земли  $v$  к скорости света  $c$  в (неподвижном) эфире. Предполагая, что это сокращение равно  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , можно было объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона, сохранив представление о движении Земли в эфире.

Г. А. Лоренцу удалось найти некоторое обоснование для гипотезы Фитцджералда в электромагнитной теории

---

\* *Ad hoc* (лат.) — для этой цели.

Максвелла. Он показал, что элементарные частицы материи (электроны) благодаря взаимодействию элементов образующего их электрического заряда должны сокращаться (в направлении своего движения) в том самом отношении, которое было указано Фитцджералдом.

На этом, казалось, и можно было успокоиться. Многие физики, в том числе и сам Майкельсон, так и сделали.

Тут-то и выступил еще совсем молодой 26-летний Эйнштейн со своими гораздо более радикальными и глубокими идеями. Эйнштейн понял, что вся проблема о движении Земли в эфире со всеми вытекающими из нее следствиями является фиктивной, схоластической проблемой, подобной множеству схоластических проблем, над решением которых немало потрудились ученые, философы и теологи средневековья. Эти проблемы характеризуются вымышленностью своего объекта. Примером их может служить проблема о том, имеется ли у черта хвост или нет. Когда-то люди представляли себе черта как вполне реальное существо, так что проблема эта являлась весьма актуальной. Одни решали ее в положительном смысле, другие — в отрицательном. Для примирения обеих точек зрения можно было допустить, что черт, хотя и имеет хвост, но прячет его, так что люди его не замечают.

Совершенно аналогичный характер имеет проблема движения Земли в эфире или эфира по отношению к Земле. Приняв существование эфира за неоспоримое данное, физики и астрономы спорили друг с другом лишь относительно его свойства. Астрономы уверяли, что Земля движется в эфире, или, другими словами, что эфир движется по отношению к Земле, чем и обуславливаются астрономическое явление аберрации и явление Доплера. Физики же в лице Майкельсона и многих других доказывали, что эфир неподвижен по отношению к Земле. Фитцджералд и Лоренц примирили тех и других, показав, что эфир, хотя и движется, но так ловко прячет это движение (благодаря создаваемому им продольному сокращению движущихся тел), что мы его не замечаем.

Эйнштейн впервые вскрыл фиктивный характер всей проблемы движения эфира, или движения в эфире, показав, что неподвижный или движущийся эфир столь же фиктивен, как бесхвостый или хвостатый черт, и что физические явления, в частности явление распространения



света, могут и должны описываться без помощи какого бы то ни было эфира.

Следует заметить, что в этом отношении Эйнштейн явился не абсолютным новатором, сокрушившим могущественное божество физики. Он явился скорее могильщиком эфира, чем его сокрушителем.

Я приведу несколько строк из написанной 120 лет назад оды Державина, относящейся как будто бы к эфиру:

О ты, пространством бесконечный,  
Течением времени предвечный,  
Кого никто постичь не мог,  
Кто все собою заполняет,  
Объемлет, виждет, составляет,  
Кого мы называем... бог.

Эта ода, посвященная богу и содержащая определение его свойств, полностью применима к эфиру; эфир поистине был божеством физиков XIX столетия.

Физикам начала и середины XIX в. описание световых и электромагнитных явлений без помощи промежуточной среды, заполняющей якобы пустое пространство, представлялось невысказанным. Именно исходя из тождественности этой среды как для световых, так и электромагнитных явлений, Фарадей пришел к мысли о внутреннем единстве этих явлений — об электромагнитной природе световых явлений и о распространении электромагнитных сил в пространстве с конечной скоростью, равной скорости света. Эта мысль получила блестящую математическую разработку и ряд количественных подтверждений у Максвелла. Однако все попытки Максвелла и других ученых, в особенности Больцмана, дать строгое обоснование законов электромагнетизма, в частности оптики (как учения об электромагнитных волнах), исходя из механических свойств эфира потерпели неудачу.\*

Развивавшаяся при помощи эфира электромагнитная теория не только не нуждалась в нем для дальнейшего своего существования, но, оставаясь в эфирной оболочке, испытывала ряд затруднений, одним из которых являлась

---

\* Так, например, лорд Кельвин предложил теорию, согласно которой атомы представляют собой вихри в эфире. Известный немецкий физик Друде опубликовал в 1890 г. книгу об электромагнитной теории под названием «Физика эфира».

указанная выше проблема о движении Земли в эфире. Эфир сыграл для развития физики такую же роль, какую скорлупа яйца играет для развития цыпленка. Развившись, неблагодарный цыпленок разбивает защищавшую его скорлупу и выходит на свободу. Так же было и с физикой. И в то время, как старые физики все еще пытались рассуждать о свойствах эфира, молодой Эйнштейн предложил совершенно выбросить это отныне бесполезное понятие и описывать электромагнитные (и, в частности, световые) явления как процессы, протекающие в пустом пространстве.

Основное возражение против этого нового описания (часто выдвигаемое и поныне) заключается в том, что его невозможно себе представить, ибо, как говорят поклонники эфира, если свет есть колебательное движение, то должно же быть что-то, совершающее это движение. Но дело в том, что световые колебания вовсе не являются колебательным движением. В электромагнитной теории они представляют собой колебания электрических и магнитных сил в каждой точке пространства. Эти силовые колебания вызываются колебательным движением электронов в радиоантенне или в отдельных атомах материи и в свою очередь могут вызывать колебательное движение заряженных частиц там, где подобные частицы находятся (радиоприемник, глаз), но сами по себе они не являются механическим движением. Что же касается их волнообразного распространения в пространстве, то оно обуславливается тем, что электромагнитные силы, исходящие от отдельных заряженных частиц (электронов), распространяются в окружающем пространстве (пустоте) не мгновенно, а с конечной скоростью  $c = 300\,000$  км/сек. В теории эфира это обстоятельство объяснялось мгновенной передачей силы от каждой частицы эфира к соседним, к ней чрезвычайно близким, в связи с быстрым ослаблением сил взаимодействия по мере увеличения расстояния между этими частицами, а также запаздыванием перемещения частиц по отношению к силе, поскольку перемещение является не причиной, а следствием силы (непосредственным следствием силы, с ней одновременным, является не перемещение, а ускорение частицы; перемещение же является в свою очередь причиной изменения силы). Совершенно таким же образом объясняется конечная скорость распространения звуковых колебаний

в обыкновенных упругих телах. Теория эфира лишь кажущимся образом объясняла дальное действие, т. е. действие одной заряженной частицы, скажем, одного электрона  $A$  на другой  $B$ , сводя это дальное действие к «близкодействию», т. е. передаче действия через промежуточную среду. В действительности близкое действие оказывалось лишь дальным действием на очень маленьких расстояниях (между соседними частицами эфира), но дальным действием мгновенным. Именно с таким мгновенным дальным действием оперировала старая небесная и земная механика, созданная Ньютоном.

В этой классической механике сила, испытанная каким-либо небесным телом со стороны остальных, определялась одновременным положением всех этих тел, независимо от степени их близости или отдаленности. В новой электромеханике, вышедшей из эфирной скорлупы, вместо мгновенного действия на расстоянии мы находим запаздывающее дальное действие, выражающееся в том, что силы, исходящие от данной частицы  $A$ , действуют сначала на ближайšie к ней частицы  $B$ , затем лишь на более удаленные  $C$  и т. д. Другими словами, сила, испытываемая в момент времени  $t$  данной частицей  $B$  со стороны какой-нибудь другой частицы  $A$ , определяется положением  $A$  не в тот самый момент  $t$ , но в предшествующий момент  $t'$ , причем  $t' = t - \frac{R}{c}$ , где  $R$  — расстояние между той точкой пространства, где  $B$  находится в момент  $t$ , и той точкой пространства, где  $A$  находилась в момент  $t'$ . Отношение  $\frac{R}{c}$  равно тому времени, которое необходимо

для передачи силы, распространяющейся со скоростью  $c$  на расстояние  $R$ . Само собой разумеется, что это запаздывание силы имеет значение лишь в том случае, если частица  $A$  находится в движении. В случае покоя действие ее в каждой точке остается таким же, как если бы оно передавалось мгновенно.

Я потому так подробно остановился на разъяснении вопроса о запаздывающем дальном действии, что он является, по моему мнению, краеугольным камнем эйнштейновской специальной теории относительности.

На общей теории относительности, рассматривающей не только равномерное и прямолинейное, но и всякое движение, я останавливаюсь лишь очень кратко. Возможность

обобщения теории относительности для любого типа движения и релятивизации не только скорости, но также ускорения и т. д., обусловлено, как я уже упомянул в начале этой статьи, тем обстоятельством, что силы инерции, связанные с неравномерным движением, не могут быть отличены от сил тяготения.

Представьте себе, что вы вынуждены всю свою жизнь провести в лифте, движущемся вверх и вниз. Как будете вы при этом регистрировать свои наблюдения и интерпретировать их?

Когда лифт начинает двигаться, вам должно казаться, что вы становитесь тяжелее, а когда его подъем вверх замедляется, вы ощущаете необычайную легкость, как и в том случае, когда лифт начинает опускаться. Его остановка сопровождается ощущением увеличения веса. Это изменение веса описывается обычно, как кажущееся, обусловленное прибавлением или вычитанием из истинного веса силы инерции, пропорциональной ускорению или замедлению. Однако, если вы осуждены всю жизнь оставаться в лифте и никогда не видели ничего вне его, то вам не придет в голову, что лифт движется вверх и вниз, и вы будете отождествлять кажущийся вес с истинным, предполагая, что сила земного тяготения временами то увеличивается, то уменьшается.

Это объединение сил тяготения с силами инерции является основной идеей эйнштейновской теории тяготения, являющейся вместе с тем теорией относительности любого движения. Если мы примем, что движение относительно, то мы сможем считать, что лифт находится в покое, а Земля движется вверх и вниз. Подобное определение вполне естественно, хотя и несколько необычно. Мы думаем всегда, что двигаться должен меньший предмет, а больший должен остаться в покое. Исходя из принципа относительности движения это, однако, неверно. Будем считать, что Земля колеблется вверх и вниз, а лифт пребывает в покое; движение Земли должно вызывать изменение обуславливаемой ею силы притяжения. То же самое можно сказать и о горизонтальном движении, например, о движении трамвайного вагона. Если вагон движется очень неравномерно, то в моменты начала движения или остановки вас толкает назад или вперед; вы можете сказать, однако, что вагон остается в покое, а Земля колеблется под ним, причем сила тяготения,

создаваемая движущейся Землей, направлена уже не вниз, а по наклонной линии.

Эйнштейновская теория тяготения формулирует законы тяготения таким образом, чтобы они содержали силы инерции и оставались справедливыми независимо от выбранной системы координат (предполагаемой в состоянии покоя).

Теория тяготения Эйнштейна дает не объяснение тяготения, а только описание его, но описание более верное, нежели теория Ньютона.

В представлении многих неспециалистов теория тяготения Эйнштейна связывается часто с понятием кривизны пространства. Что же именно имеет в виду теория Эйнштейна под кривизной пространства?

Представьте себе, что находясь на корабле, вы бросаете камень. С вашей точки зрения он будет падать вертикально и прямолинейно. С точки зрения людей, находящихся на берегу, камень будет двигаться криволинейно — по кривой с вертикальной осью. Это не означает, однако, что пространство криволинейно. Это значит лишь, что понятие прямолинейности или криволинейности относительно.

Говоря о пространстве, Эйнштейн имеет на самом деле в виду не одно лишь трехмерное пространство, а четырехмерную протяженность, образуемую пространством и временем. Криволинейность, приписываемая этой пространственно-временной протяженности, является просто выражением того обстоятельства, что движение, обусловленное тяготением, неравномерно, и что эта неравномерность не может быть устранена путем выбора системы координат с прямолинейными осями. Не вдаваясь в подробное изложение теории тяготения, я отмечу лишь, что понятие кривизны пространства является понятием кинематическим, а не статическим или чисто геометрическим.

### III. ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ

\*

#### ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ

Развитие электронной теории металлов за последние 15 лет тесно связано с развитием теории квантов. Для того чтобы составить себе правильное представление о тех изменениях, которые теория квантов внесла в наши представления о металлических телах, необходимо будет вкратце изложить доквантовую, или, как ее называют, классическую теорию металлов, созданную еще в начале нашего века Друдом и Лоренцем.

#### СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ ДО РАЗВИТИЯ БОРОВСКОЙ ТЕОРИИ КВАНТОВ

##### § 1. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В МЕТАЛЛАХ

Характерной чертой металлических тел является, как известно, их способность проводить электрический ток. Они отличаются от других тел, обладающих в известной степени тем же свойством, не только в количественном, но и в качественном отношении. В то время как в электролитах (в водных растворах солей, щелочей и кислот) перенос электричества производится ионами, т. е. заряженными атомами или заряженными атомными группами, в металлах он производится электронами, которые можно рассматривать как осколки обыкновенных атомов. При нормальных условиях последние состоят из положительно заряженного ядра, окруженного некоторым количеством отрицательных электронов, вращающихся вокруг него, подобно тому как планеты или кометы вращаются

вокруг Солнца. Эта аналогия между строением атома и строением солнечной системы относится также и к распределению массы: масса атома почти полностью концентрируется в его ядре, в то время как масса окружающих электронов относительно ничтожна.

Именно этими свойствами отрицательных электронов — ничтожностью их массы и их тождественностью между собой — объясняется основная черта проводимости металлов: кажущееся отсутствие какого бы то ни было переноса материи, связанного с переносом электричества.

Металлическая проволока, через которую проходит электрический ток, остается не только внешне неподвижной, но и не испытывает никакого внутреннего изменения, независимо от количества прошедшего электричества. В противоположность этому электролиты испытывают химическое разложение, пропорциональное количеству прошедшего электричества.

Наличие электронов в атомах металлических тел, очевидно, недостаточно для объяснения их проводимости, так как электроны имеются и в атомах неметаллических тел. Электропроводность металлов обуславливается своеобразной подвижностью части электронов. Вместо того чтобы быть связанными с определенными атомами, эти так называемые свободные электроны должны обладать способностью перемещаться от одного атома к другому через весь объем, занимаемый рассматриваемым телом.

Мы должны себе представить, что твердое металлическое тело состоит, с одной стороны, из твердого каркаса, образованного положительными ионами, в которые атомы преобразуются, теряя один или несколько электронов, и, с другой стороны, из отрицательной жидкости, образованной этими потерянными, или, так сказать, освобожденными электронами.

Это общее представление о свободных электронах непосредственно подтверждается явлениями, в которых обнаруживается их масса или электрический заряд. Если, например, внезапно остановить вращающийся вокруг своей оси металлический диск, то в нем возникает очень слабый электрический ток противоположного направления, который происходит от движения по инерции свободных электронов с их отрицательным зарядом. Этот

эффект, изученный Тольманом, позволяет определить отношения заряда электронов к их массе (в соответствии с определениями для катодных лучей).

С другой стороны, если нагреть металлическое тело до высокой температуры, то свободные электроны должны покидать его, или испаряться, гораздо быстрее, чем атомы или положительные ионы, так как отрицательная жидкость, очевидно, обладает большей летучестью, чем твердый положительный каркас. Это есть не что иное, как хорошо известное явление термоэлектронной эмиссии, открытое еще Эдиссоном, а с количественной стороны изученное Ричардсоном, чье имя оно и носит. Отрицательные электроны, вылетающие из раскаленной металлической проволоки, образуют термоэлектронный ток, который используется техникой в радиолампах или рентгеновских трубках. Извлечение электронов из металлов может быть произведено с таким же успехом как теплотой, так и светом, в особенности ультрафиолетовым светом; при этом частота колебаний последнего играет такую же роль, как и температура. Минимальная частота колебаний, соответствующая порогу этого фотоэлектрического эффекта, пропорциональна энергии, необходимой для извлечения одного электрона. Эта же самая энергия может быть определена как энергия испарения электронов в эффекте Ричардсона; в обоих случаях мы получаем полное согласие результатов.

Эти результаты указывают также на то, что свобода, приписываемая электронам, от которых зависит проводимость металлических тел, ограничена их движением внутри этих тел. Поверхность последних образует некоторого рода барьер, который может быть преодолен лишь электронами, обладающими исключительно большой кинетической энергией внутреннего (тепловое движение) или внешнего (свет) происхождения.

Когда два различных металла приведены в соприкосновение один с другим, то силы, действующие в их поверхностных слоях и образующие барьеры, о которых только что была речь, имеют, очевидно, противоположные направления. Таким образом, они частично нейтрализуются, и их равнодействующая способствует переходу электронов из одного металла в другой. Именно таким образом происходит открытое Вольтом явление электризации при соприкосновении, которое так же характерно



для металлических тел, как и их проводимость. Контактная разность потенциалов между двумя металлами должна быть равна, как это легко показать, разности энергии испарения электронов из обоих рассматриваемых металлов, что, между прочим, также подтверждено опытами (в особенности опытами Милликена).

## § 2. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА

Представление об электронах, свободно движущихся в пространстве, замкнутом поверхностью металла, являет собою очевидную аналогию с хорошо известной картиной газа, замкнутого в твердых стенках какого-нибудь сосуда. Естественно поэтому, что физики прежде всего пытались углубить эту аналогию и даже довести ее до крайности, скопировав электронную теорию металлов с кинетической теории газов.

Первая попытка в этом направлении принадлежит П. Друде, который выдвинул гипотезу о том, что движение свободных электронов имеет тот же характер, что и тепловое движение частиц газа. Это означает следующее: 1) электроны движутся независимо от атомов и ионов с кинетической энергией, которая в среднем пропорциональна абсолютной температуре, и 2) путь каждого электрона складывается из прямолинейных отрезков, пробегаемых с постоянной скоростью, направления которых распределены совершенно случайным образом.

Последнее представление, справедливое в отношении разреженных газов, молекулы которых действуют друг на друга заметным образом лишь тогда, когда они приближаются друг к другу на расстояние, значительно меньшее среднего (явления столкновения), имеет, казалось бы, мало общего с электронами, движение которых в металле происходит под непрерывным влиянием очень мощных сил.

Длина прямолинейных перемещений, соответствующих среднему свободному пробегу молекул газа, оставалась, впрочем, в теории Друде совершенно неопределенной, точно так же как и плотность электронного газа, т. е. количество свободных электронов в единице объема. Но тем не менее имелись серьезные основания предполагать, что число свободных электронов, приходящихся на один атом, очень мало. В противном случае кинетическая энер-

гия электронов должна была бы обуславливать заметную часть тепловой энергии металла, а следовательно, и его теплоемкость, в то время как в действительности последняя при обычных температурах зависит исключительно от кинетической и потенциальной энергии атомных колебаний.

С другой стороны, надо было принять во внимание установленный экспериментальным путем закон Видемана и Франца, согласно которому теплопроводность различных металлов пропорциональна их электропроводности, причем отношение обеих величин одинаково для всех металлов (при данной температуре). Для объяснения этого факта необходимо было, напротив, предположить, что число свободных электронов весьма велико, т. е. приблизительно равно числу атомов: в противном случае электроны не могли бы иметь существенного значения для теплопроводности металлов.<sup>1</sup>

Способ, при помощи которого Друде вычислил обе проводимости — электрическую и тепловую, может быть сформулирован следующим образом. Представим себе кусок металла, помещенного в однородное электрическое поле внешнего происхождения. Электроны, движущиеся после какого-нибудь столкновения в направлении поля, ускоряются последним, в то время как электроны, движущиеся в противоположном направлении, замедляются. Это ускорение или замедление можно рассматривать как прибавление к нормальным скоростям, соответствующим отсутствию поля и направленным беспорядочным образом, некоторой добавочной скорости, совпадающей по направлению с полем и пропорциональной ему по величине. Это добавочное движение и образует электрический ток, причем электропроводность измеряется отношением добавочной скорости (помноженной на количество электронов и их заряд) к напряженности поля. Таким образом, коэффициент электропроводности имеет тем большее значение, чем больше средняя длина свободного пробега и чем меньше нормальная скорость (теплового движения). Последнее обстоятельство объясняется тем, что с уменьшением нормальной скорости электронов увеличивается время накопления добавочной скорости (от одного столкновения до другого). При столкновении накопленная добавочная энергия отдается атомам, проявляясь в форме тепла. Для того чтобы получить коэффи-

циент теплопроводности, достаточно заменить в предыдущих рассуждениях напряженность электрического поля падением температуры на единицу длины, а заряд электрона — его кинетической энергией.

Значения обоих коэффициентов проводимости, вычисленных таким образом, содержат неопределенный множитель, равный произведению плотности электронного газа на среднюю длину свободного пробега электронов, и поэтому они не могут быть сравнены с опытными данными. Если же взять их отношение, то этот неопределенный множитель исчезает, и мы получаем легко вычисляемое значение, которое находится в точном согласии с законом Видемана—Франца. Этот результат представлял собой главный трофей теории Друде. Не следует, однако, забывать то противоречие в отношении числа свободных электронов, т. е. величины теплоемкости металлов, ценой которого оно было куплено.

В своих вычислениях Друде рассматривал скорости электронов как равные. В действительности скорости молекул газа неодинаковы, но распределяются согласно известному закону Максвелла.

Применяя тот же самый закон Максвелла к электронному газу, Лоренц внес существенное исправление в теорию Друде, которое позволило распространить ее на ряд новых явлений, в частности на явление Ричардсона, т. е. на испускание электронов раскаленными металлами.

В теории этого явления средний свободный пробег не фигурирует вовсе. Вместо него мы имеем другую, также неопределенную величину: работу прохождения электрона через поверхностный слой металла — работу выхода. Эта величина может быть определена независимо от количества свободных электронов путем сравнения теоретической формулы с экспериментальными данными. При этом получается полное согласие с данными, относящимися к фотоэлектрическому эффекту. Что касается плотности электронного газа внутри металла, то она не поддается точному определению. Во всяком случае, отмеченное выше противоречие между очень низким значением этой плотности, требуемым теплоемкостью металлов, и очень большим значением, необходимым для теории теплопроводности, остается в силе как в теории Друде, так и Лоренца.

§ 3. БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ КВАНТОВ

Развитие боровской теории квантов непосредственно связано с вопросом о строении атомов. Тот факт, что атом можно представлять себе как планетообразную систему, в которой роль Солнца играет положительно заряженное ядро, а роль планет — электроны, был установлен еще в 1911 г. Резерфордом. Применяя к этой схеме идеи Планка о прерывном характере процессов испускания и поглощения света, в 1913 г. Бор пришел к мысли о существовании прерывной совокупности стационарных, или квантовых, движений, характеризующихся дискретными значениями энергии и других постоянных. Эти движения совершаются, по теории Бора, в согласии с законами классической механики. Новое заключалось, таким образом, лишь в отборе из всех движений, допускаемых последней, дискретной совокупности движений, удовлетворяющих особым квантовым условиям, в которых фигурируют целые, квантованные, числа.

В простейшем случае движения одного электрона вокруг положительного ядра (например, в атоме водорода) теорией Бора допускались эллиптические орбиты с дискретными квантовыми величинами больших и малых осей, а также с дискретными наклонами их плоскости. Эта картина была без существенного изменения распространена Бором и на более сложные атомы. При этом силы, испытываемые данным электроном со стороны остальных, схематически учитывались путем некоторого уменьшения эффективного заряда ядра. В результате оказалось, что каждый электрон движется как бы независимо от других по определенной квантовой орбите.

Для вопросов, относящихся к взаимодействию различных атомов и соединению их в молекулы, а также твердые (или жидкие) тела, особенное значение имеют наружные, или валентные, электроны. Эффективные размеры соответствующих атомов, т. е. расстояния, на которые они могут сближаться с другими атомами, определяются линейными размерами орбит именно этих валентных электронов. Теория Бора показывает в согласии с опытом, что эти орбиты в нормальном состоянии атома,

отвечающем минимуму его энергии, обладают линейными размерами одного и того же порядка (от одной до нескольких единиц Ангстрема), независимо от общего числа электронов в атоме. С увеличением этого числа и соответственно этому с увеличением положительного заряда и веса ядра атома орбиты внутренних электронов все более и более сжимаются; атом растет как бы внутрь, а не наружу, так что его наружные размеры меняются сравнительно незначительно (при переходе от одного атома к другому).

#### **§ 4. ПРИМЕНЕНИЕ БОРОВСКОЙ ТЕОРИИ АТОМОВ К ОБЪЯСНЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ**

Изложенные выше основные представления боровской теории атомов в 1917 г. были применены мной к объяснению некоторых свойств металлических тел, связанных с их поверхностью, в частности, контактных потенциалов и работы выхода электронов, которые внутри металла ведут себя как свободные электроны. При этом я исходил из предположения, что большинство валентных электронов остаются в связанном состоянии и движутся вокруг ядер соответствующих атомов металла так, как если бы эти атомы были совершенно изолированы друг от друга.

Если поверхность металла определить как поверхность, проходящую через центры самых наружных атомов, то связанные электроны, обращающиеся вокруг этих центров, половину времени обращения проводят с наружной стороны этой поверхности. Поскольку движение их в разных атомах не согласовано, в каждый момент времени половина их находится с наружной стороны поверхности, образуя слой отрицательного электричества, толщина которого равна радиусу валентных орбит. Легко показать, что с внутренней поверхности металла должен находиться слой положительной электризации такой же толщины, обусловленный избытком атомных ядер, или, точнее, недостатком электронов, находящихся с наружной стороны поверхности.

Поверхность всякого металлического тела представляет собой, следовательно, электрический конденсатор атомных размеров; так как внутренняя обкладка этого

конденсатора положительна, а наружная отрицательна, то он должен представлять собой непреодолимый барьер для отрицательных свободных электронов, находящихся внутри металла, поскольку эти электроны не обладают скоростью, достаточной для того, чтобы прорваться через этот поверхностный конденсатор.

К тому же самому результату можно прийти, если рассматривать изолированный атом как миниатюрный шаровой конденсатор; поверхностный конденсатор металла образуется благодаря наложению громадного числа подобных элементарных конденсаторов. Поэтому внутри металлического тела потенциал должен иметь положительное значение, равное среднему значению потенциала одного атома по отношению к объему, который он занимает в теле. Вычисление показывает, что этот потенциал составляет несколько вольт в согласии с экспериментальными данными относительно работы выхода (свободных) электронов. Теория поверхностного конденсатора позволяет вычислить поверхностную энергию (или поверхностное натяжение) металла в жидком состоянии, приводя при этом к цифрам, которые также по порядку величины согласуются с экспериментальными данными.

#### **§ 5. ВИДОИЗМЕНЕНИЕ БОРОВСКОЙ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВОБОДНЫМ ЭЛЕКТРОНАМ В МЕТАЛЛАХ**

Несмотря на это согласие, изложенная теория представляется неудовлетворительной (неполной, — В. Ф.), хотя бы уже вследствие того обстоятельства, что она не дает никакого ответа на основные вопросы, а именно, почему в металлических телах имеются свободные электроны, каково число этих свободных электронов и каким образом они движутся.

Решение этих вопросов, основанное на теории Бора, было предложено мной в 1924 г. Сущность его заключается в устранении самого противопоставления между свободными и связанными электронами и в доказательстве того обстоятельства, что все валентные электроны являются свободными по отношению к отдельным атомам, т. е. способными перемещаться от одного из них к дру-

гим, и вместе с тем связанными — по отношению к образуемому всеми атомами коллективу.

К этому результату проще всего приводит рассмотрение процесса образования подобного коллектива, т. е. процесса конденсации металлического пара в твердый или жидкий металл.

Металлический пар слагается из нейтральных атомов, которые практически изолированы один от другого (помимо столкновений, имеющих относительно короткую продолжительность).

Хорошо известно, что металлические пары представляют собой в электрическом отношении такие же прекрасные изоляторы, как и все другие газы. Это обстоятельство показывает, что электроны остаются связанными с соответствующими атомами достаточно тесным образом для того, чтобы не иметь возможности отделиться от них при обычных температурах. Связь эта, однако, слабее, чем в случае неметаллических паров; например, опыты над фотоэлектрическим эффектом показывают, что работа извлечения одного электрона из изолированного металлического атома приблизительно в два раза меньше, чем для металлоидных атомов. Этот результат на основании борховской теории может быть сведен к тому факту, что внешние электроны металлических атомов скорее напоминают кометы, нежели планеты, т. е. они вращаются на орбитах очень больших размеров и, главное, очень большого эксцентриситета. Вот почему металлические атомы так легко уступают один или несколько электронов металлоидальным атомам, когда они приближаются к последним, и именно по количеству этих легко отдаваемых электронов определяется их химическая валентность. Мы можем сказать, что химическая валентность металла равна числу кометоподобных электронов во внешней оболочке его атомов.

Во время процесса конденсации эти атомы приближаются друг к другу на расстояния того же порядка, как их собственные размеры, т. е. размеры внешних электронных орбит. Совершенно очевидно, что при таких условиях кометоподобные электроны не могут оставаться привязанными к одним и тем же атомам. Удаляясь от какого-нибудь атома по направлению к афелию своей орбиты, электрон-комета проникает в соседний атом подобно тому, как какая-нибудь комета солнечной системы

проникла бы в другую систему такого же рода, которая бы к ней сильно приблизилась. Таким образом, кометоподобные электроны, оставаясь около каждого атома лишь для того, чтобы проделать один или самое большее несколько оборотов, перебегают от одного атома к другому во всем занятом ими пространстве с почти не зависящей от температуры скоростью, не имея возможности отделиться от коллектива, образованного всеми атомами рассматриваемого металла.

Легко показать, что средняя величина работы, необходимой для извлечения одного из этих свободных электронов из недр металла в окружающую пустоту, даже больше работы, необходимой для освобождения одного электрона, привязанного к отдельному атому, причем разница приблизительно равна скрытой теплоте испарения на один свободный электрон. Однако не все электроны должны иметь одну и ту же скорость. Как мы увидим ниже, скорости свободных электронов в металле распределены по определенному закону (Ферми) так, что максимальное значение кинетической энергии превосходит среднее в отношении 5:3. Этим объясняется то обстоятельство, что минимальная работа извлечения электрона из металлического тела (измеряемая границей фотоэлектрического эффекта) оказывается меньшей, нежели соответствующая работа для отдельного атома.

Переход кометоподобного электрона от одного атома к соседнему предполагает наличие в последнем свободного места, т. е. предварительный уход из него какого-то другого электрона, который перед этим находился в его орбите. Вопрос о том, каким образом обеспечивается подобная согласованность, был оставлен мной, однако, открытым (он остается открытым и поныне). Более насущным является вопрос о том, происходит ли переход электрона одного атома к соседнему в случайном направлении или же ряд последовательных переходов совершается в одном и том же направлении.

Можно показать, что в кристаллическом теле с идеально правильным расположением атомов это направление перехода должно оставаться постоянным. Таким образом, движение электронов в этом случае может быть уподоблено движению точки на окружности колеса, катящегося по гладкой дороге. Вращательному движению



колеса соответствует обращение электрона вокруг отдельных атомов, а поступательному — переход от одного атома к другому.

В действительности расположение атомов даже в идеально чистом металле не бывает абсолютно правильным вследствие теплового движения. Последнее создает своеобразную «ухабистость» того трехмерного поля, по которому катятся электронные колеса, ухабистость, которая вызывает по временам неправильное отклонение их в сторону от первоначального пути. Подобные отклонения становятся тем чаще (прямолинейные отрезки, пробегаемые «электронными колесами» между двумя последовательными отклонениями, становятся тем короче), чем выше температура тела.

Если отвлечься от вращательного движения колес, изображающих свободные электроны в металле, и рассматривать только их поступательное движение, то получается картина, напоминающая классический электронный газ теории Друде—Лоренца. При этом длина прямолинейных перемещений (от одного «ухаба» до следующего) соответствует длине свободного пробега. Существенное отличие между старой и новой теориями электронного газа заключается в том, что, согласно новой теории, во-первых, число свободных электронов вполне определено, поскольку каждый валентный электрон изолированного атома превращается в свободный электрон в металлическом теле, и, во-вторых, свободные электроны обладают примерно такими же скоростями, как валентные электроны в изолированных атомах, т. е. гораздо большими, нежели предполагалось Друде и Лоренцем, притом практически не зависящими от температуры (при нормальных температурах средняя кинетическая энергия электрона, согласно классической теории, должна быть в 100 раз меньше, нежели энергия, вычисленная по теории Бора).

Изложенные представления о движении свободных электронов в металле были применены мной к расчету электропроводности, а также упругих его свойств. Эти расчеты оказались, однако, отчасти неполными, отчасти неверными ввиду того, что мной надлежащим образом не учитывалось то распределение скоростей между электронами (распределение Ферми), о котором я упоминал выше.<sup>2</sup>

§ 6. ТЕОРИЯ ПАУЛИ—ФЕРМИ

Хорошо известно, что в сложных атомах электроны располагаются вокруг ядра в виде нескольких слоев («этажей»), причем первый из них, т. е. наиболее близкий к ядру, состоит лишь из двух электронов. Ту же самую цифру мы получаем для внешних слоев, если считать принадлежащими к одному и тому же слою лишь тождественные электронные орбиты, т. е. орбиты одинакового размера, формы и наклона по отношению к оси симметрии атома.

Этот принцип, установленный более или менее эмпирически, был обобщен и уточнен в 1925 г. Паули следующим образом: во всякой системе, содержащей несколько электронов, каждый тип движения, точно определенный по теории квантов, может быть представлен только одним электроном. Парное число электронов в заполненных слоях соответствует, с точки зрения принципа Паули, тому факту (открытому Уленбеком и Гаудсмитом), что электрон обладает магнитной осью, которую можно было бы приписать его вращению вокруг самого себя, и что эта ось может принимать две противоположные ориентации.<sup>3</sup>

Ферми пришла в голову счастливая идея применить принцип Паули к частицам одноатомного газа. Вскоре после этого Паули и Зоммерфельд применили теорию Ферми к газу, образованному свободными электронами в металлическом теле. При равномерном распределении электронов в пространстве мы получаем ступенчатое распределение их скоростей, причем каждая скорость, допускаемая квантовыми ограничениями, является уделом одной пары электронов (максимум).

Для того чтобы лучше уяснить разницу между этим распределением и распределением, соответствующим закону Максвелла, мы рассмотрим предельный случай абсолютного нуля температуры. Согласно закону Максвелла, все электроны в этом случае должны оставаться в покое, т. е. в состоянии минимальной энергии. Согласно закону Ферми, лишь два электрона могли бы находиться в этом состоянии, два других — в следующем состоянии и так дальше, до верхней ступени энергетической лестницы,

ступени, расположенной тем выше, чем меньше объем, занятый электронным газом.

Таким образом, для средней скорости свободных электронов при абсолютном нуле температуры получаются значения порядка 1000 км/сек., т. е. очень близкие к тем, которые следуют из соображений, изложенных в § 4

Заметим, что среднее значение кинетической энергии электронного газа при абсолютном нуле температуры определяется в теории Паули—Ферми плотностью этого газа и возрастает с увеличением числа электронов в единице объема. Вышеприведенный результат соответствует той чрезвычайно большой плотности, которая получается, если считать, что на каждый атом металла приходится один или несколько свободных электронов, так что число последних в единице объема оказывается равным или кратным числу атомов (концентрация частиц в обычных газах бывает в тысячи раз меньше, чем у соответствующих твердых или жидких тел). Следует также отметить, что существенное значение имеет малость массы электронов: энергия какого-либо газа, по Ферми, при абсолютном нуле температуры оказывается обратно пропорциональной массе образующих его частиц. Таким образом, в случае обыкновенного газа, подчиняющегося закону Ферми, при той же концентрации частиц, как и в твердом теле, она была бы во много тысяч раз меньше, чем для электронного газа.

На первый взгляд может показаться, что закон распределения Ферми находится в противоречии с обыкновенной механикой. Нетрудно, однако, убедиться в том, что такого противоречия не существует. Принцип Паули, на котором основывается статистика Ферми, представляет собой такое же дополнение к обыкновенной механике системы тождественных частиц (электронов), как и квантовые условия теории Бора по отношению к механике отдельной частицы. Таким образом, несколько не изменяя законы движения электронов, принцип Паули лишь ограничивает выбор констант, характеризующих это движение. Поскольку это ограничение, характеризующее распределение скоростей по закону Ферми, является выполненным в некоторый момент времени, оно оказывается выполненным автоматически, т. е. в силу классических законов движения, во все времена, каковы бы ни были внешние силы, действующие на электроны.<sup>4</sup>

**§ 7. СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ  
СИЛЫ В МЕТАЛЛАХ<sup>5</sup>**

В теории Паули—Ферми силы, действующие на свободные электроны в металлическом теле, учитывались крайне схематически. Предполагалось, что внутри металла силы, действующие на данный электрон со стороны всех остальных электронов и со стороны положительных атомов, взаимно уравниваются, проявляясь лишь в поверхностном слое металла, где их результирующая направлена внутрь. На самом деле равновесие между силами притяжения и отталкивания, которые электрон испытывает внутри металла, имеет место лишь в среднем. В каждой отдельной точке этого равновесия нет. Именно этими не уравновешенными внутренними силами и обуславливается движение электронов в металле (при отсутствии внешних сил).

Чтобы указанное выше равновесие имело (в среднем) устойчивый характер, силы отталкивания должны с увеличением расстояния  $R$  между соседними атомами уменьшаться быстрее, чем силы притяжения, так, чтобы при  $R < R_0$  (где  $R_0$  — равновесное расстояние) перевес имели бы силы отталкивания, а при  $R > R_0$  — силы притяжения.

Нетрудно показать из самых общих соображений, что это условие оказывается выполненным.

При адиабатическом расширении обыкновенного газа последний охлаждается, а при адиабатическом сжатии — нагревается. Это означает, что при этом средняя кинетическая энергия его частиц уменьшается. В случае одноатомного газа соотношение между кинетической энергией  $E$  и объемом газа  $V$  (при адиабатических процессах) выражается известной формулой  $EV^{2/3} = \text{const.}$ \* Эта формула остается в силе и для электронного газа при абсолютном нуле температуры. В то время как в случае обыкновенного газа энергия является мерой абсолютной температуры,

---

\*Эта формула может быть выведена следующим образом. Приравняв внешнюю работу  $p dV$ , совершаемую газом при увеличении его объема на  $dV$ , уменьшению  $dE$  его кинетической энергии и выражая давление  $p$  через  $E$  и  $V$ , с помощью известной формулы

$$\text{кинетической теории газов } pV = \frac{1}{3} Nm\bar{v}^2 = \frac{2}{3} E \text{ получаем } -\frac{dE}{E} = \frac{2}{3} \frac{dV}{V}, \text{ т. е. } -d \ln E = \frac{2}{3} d \ln V, \text{ откуда следует } EV^{2/3} = \text{const.}$$

в случае электронного газа она представляет собой величину атермическую.

Так как объем металла пропорционален кубу расстояния между соседними атомами  $V \sim R^3$ , то предыдущую формулу для кинетической энергии электронного газа можно переписать в виде  $E = \frac{A}{R^2}$ , где  $A$  — постоянная. Что касается потенциальной энергии электрических сил  $U$ , то, согласно закону Кулона, зависимость ее от  $R$  определяется формулой  $U = -\frac{B}{R}$ . При этом коэффициент пропорциональности  $B$  имеет порядок  $e^2 N$ , где  $e$  — заряд электрона, а  $N$  — общее их число.

Производная энергии по объему, взятая со знаком минус, представляет собой давление, обусловленное соответствующими силами. Полагая, как указывалось выше,  $V = \gamma R^3$ , где  $\gamma$  — численный коэффициент порядка 1, получаем для кинетического давления электронного газа положительное значение  $\frac{2A}{3\gamma R^5}$ , а для потенциального (электрического) давления — отрицательное значение  $-\frac{B}{3\gamma R^4}$ , характеризующее величину сил сцепления. Алгебраическая сумма их обращается в нуль при значении  $R$ , равном  $R_0 = \frac{2A}{B}$ , которое соответствует равновесному состоянию. Устойчивость этого состояния вытекает из того обстоятельства, что положительное давление (отталкивание) изменяется с изменением  $R$  быстрее, чем отрицательное (притяжение). К тому же результату приводит рассмотрение полной энергии металла  $W = E + U$ , которая при  $R = R_0$  достигает минимального значения, равного  $-\frac{B}{2R_0}$ , т. е.  $\frac{1}{2} U_0$ . Отсюда, в частности, следует, что в состоянии равновесия кинетическая энергия равна половине потенциальной, взятой с обратным знаком, — в согласии с теоремой вириала.

Предыдущие соображения достаточны для понимания природы сил, связывающих атомы в металлическом теле и обеспечивающих устойчивое равновесие последнего. Однако они недостаточны для количественного определения этих сил, а равным образом и нормального объема, характеризуемого равновесным значением межуатомного расстояния  $R_0$ . Для вычисления этого расстояния и свя-

заних с ним величин — сжимаемости металла, его прочности (или энергии испарения) и т. д. — необходимо знать величину коэффициента  $A$  в формуле  $E = \frac{A}{R^2}$  для кинетической энергии электронов. Эта задача была впервые разрешена Ферми в 1927 г. путем применения принципа Паули к свободным, или коллективизированным, т. е. общественным, электронам в металлических телах. Результат, полученный Ферми, был применен автором настоящей статьи в 1928 г. для приближенного вычисления размеров, сжимаемости и других свойств металлов при обычных температурах, при которых тепловой энергией электронов можно пренебречь по сравнению с их атермической энергией, т. е. при температурах, практически не отличимых от нуля.

При таких условиях распределение Ферми сводится к парному замещению нижних  $\frac{N}{2}$  энергетических уровней, соответствующих их свободному движению внутри металлического тела ( $N$  — общее число электронов). При этом максимальная скорость электронов  $v_{\max}$  соответствует минимальной дебройлевской длине волны  $\lambda_{\min}$ , приблизительно равной удвоенному значению расстояния между соседними электронами  $2\left(\frac{V}{N}\right)^{1/3}$ , или, точнее,  $\left(\frac{8\pi}{3} \frac{V}{N}\right)^{1/3}$ . Полагая  $mv = \frac{h}{\lambda}$ , где  $h$  — постоянная Планка, получаем для максимального значения кинетической энергии электрона при  $T = 0$

$$\epsilon_{\max} = \frac{(mv_{\max})^2}{2m} = \frac{1}{2} m \left( \frac{h}{\lambda_{\min}} \right)^2$$

выражение

$$\epsilon_{\max} = \frac{h^2}{2m} \left( \frac{3}{8\pi} \frac{N}{V} \right)^{2/3}.$$

Среднее значение энергии одного электрона составляет  $\frac{3}{5}$  от предыдущего. Таким образом, полная энергия всех свободных (или коллективизированных) электронов  $E$  может быть представлена в виде  $\frac{A}{V^{2/3}}$ , как это было сделано нами выше, причем постоянная  $A$  оказывается равной  $\frac{3}{10} \frac{h^2}{m} \left( \frac{3N}{8\pi} \right)^{2/3} N$ . Пользуясь этим выражением  $A$  и при-

ближенным значением постоянной  $B$  в выражении для энергии кулоновых сил, указанным выше ( $B \approx e^2 N$ ), в 1928 г. автор вычислил межатомные расстояния для ряда типичных металлов, а также коэффициенты сжимаемости и величину их прочности (на разрыв), получив при этом удовлетворительное согласие с опытными данными как в отношении зависимостей, существующих между этими величинами, так и в отношении их абсолютных значений.

Более точные расчеты этого рода, сделанные недавно (в 1932 г.) Ленцем и Йенсенем (в Германии), привели еще к значительно лучшим результатам.

Как уже упоминалось выше, в поверхностном слое металла свободные электроны испытывают результирующую силу притяжения, направленную внутрь. Эта сила отчасти обусловлена самими же свободными электронами, которые, проникая за пределы поверхности, проходящей через центры самых наружных атомов, образуют слой отрицательной электризации совершенно так же, как это было описано в § 4 в связи с представлением о связанных электронах. Таким образом, свободные электроны сами образуют на поверхности металла электрический конденсатор, который их запирает. Легко, однако, показать, что задерживающая разность потенциалов, обуславливаемая этим конденсатором, оказывается недостаточной\* и что к ней необходимо прибавить работу, требуемую для преодоления сил поляризации или „электрического изображения“, связанных с перераспределением электронов при уходе одного из них из металла.

#### § 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

При расчете сил сцепления, а также поверхностных сил в металлах можно ограничиваться рассмотрением распределения скоростей между электронами, относящимися к абсолютному нулю температуры. Это объясняется тем, что изменение температуры в пределах до многих тысяч градусов оказывает на это распределение весьма слабое влияние. Можно показать, что это температурное влияние

---

\* Она достаточна для того, чтобы задержать самые быстрые электроны.

тем слабее, чем больше энергия электронов при абсолютном нуле температуры, т. е. чем больше плотность электронного газа. Этот вопрос был впервые количественно исследован в 1927 г. Зоммерфельдом, которому принадлежит заслуга восстановления друдевской теории электронного газа в модернизированной квантовой форме, свободной от противоречий старой теории. Основное из этих противоречий, как уже отмечалось выше, заключалось в несоответствии между ролью, играемой свободными электронами в теплопроводности металла (для чего число их должно быть сравнимо с числом атомов), и отсутствии заметного влияния на теплоемкость, для чего число их, согласно классической статистике Максвелла, должно быть очень мало по сравнению с числом атомов. Согласно новой статистике, отсутствие заметного влияния на теплоемкость, т. е. слабая зависимость энергии свободных электронов от температуры, объяснялась, наоборот, именно большим числом этих электронов.

Зоммерфельд показал, что отношение электропроводности и теплопроводности, вычисленное по новой теории, находится еще в лучшем согласии с опытными данными (закона Видемана—Франца), чем по старой теории. Далее Зоммерфельд вычислил термоэлектродвижущие силы, которые, согласно теории Друде, были примерно в 100 раз больше экспериментальных значений, но оказались очень близкими к ним с новой точки зрения. Новая теория приводит к прежним результатам в вопросе об эмиссии электронов раскаленными металлами. Это объясняется совпадением крайней части распределения Ферми, соответствующей большим скоростям, с распределением Максвелла. Что касается электропроводности, то для нее Зоммерфельд получил формулу того же вида, что и Друде, с новыми значениями таких констант, как число электронов (в единице объема) и их средняя скорость. При этом зависимость электропроводности от температуры целиком сводилась к зависимости от температуры длины свободного пробега, остававшейся в теории Зоммерфельда столь же неопределенной, как и в теории Друде.

Сравнивая теоретическое выражение, полученное для проводимости металла, с экспериментальными данными, легко определить средний свободный пробег электронов. При этом получают значения порядка сотен межуатомных расстояний (для обыкновенных температур). С точки



зрения наших обычных представлений о явлении столкновения эти колоссальные значения с понижением температуры увеличиваются обратно пропорционально последней в области обычных температур, стремясь к бесконечности при абсолютном нуле температуры.

Этот результат, который можно рассматривать как экспериментальный факт, показывает, что свободные электроны ведут себя по отношению к атомам (или ионам) совершенно иначе, чем это соответствует представлению о столкновениях между частицами обыкновенного газа. Электрон не отклоняется от своего прямолинейного движения каждый раз, как он натывается на один из атомов, что должно было бы происходить «на каждом шагу» ввиду большой концентрации последних. Он движется по прямой линии через сотни и даже через тысячи атомов, прежде чем испытает неправильное отклонение, которое можно было бы приписать «столкновению» в обычном смысле этого слова. Свободные электроны как бы игнорируют атомную структуру металлического тела; они движутся словно в непрерывной среде, неоднородность которой происходит только от неправильных колебаний (флуктуаций) плотности, зависящих от неправильного характера тепловых колебаний.

Это странное явление не может быть объяснено тем фактом, что распределение скоростей между свободными электронами характеризуется не законом Максвелла, а законом Ферми. Ниже мы увидим, что его легко можно интерпретировать в рамках новой волновой механики.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ К ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ

### § 9. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

В 1924 г. Луи де Бройль высказал гениальную идею, которая заключалась в распространении корпускулярно-волнового дуализма, являвшегося до тех пор характерной чертой света, на материю. Эта точка зрения была с блестящим успехом развита Шредингером и непосредственно подтверждена опытами Дэвиссона, Джермера, Томсона, Руппа и других исследователей по интерференции и дифракции электронов.

Мы можем, следовательно, рассматривать пучок катодных лучей (электронов) с двух сторон: как корпуску-

лярное явление, состоящее в движении множества миниатюрных снарядиков (отрицательных электронов), и как явление волновое, образованное распространением волн, аналогичных световым волнам. То же самое относится и к свету, так как световые волны также связаны с движением особых световых снарядиков, иазываемых световыми квантами, или фотонами.

Мы не будем углубляться здесь в анализ соотношений, существующих между корпускулярным и волновым аспектами одного и того же лучистого явления. Достаточно заметить, что эти соотношения устанавливают соответствие между корпускулярными и волновыми величинами, которые характеризуют рассматриваемое явление и качественно, и количественно. Для света существует простое соотношение между длиной и амплитудой волн, с одной стороны, и между энергией и числом квантов — с другой. Такого же рода соотношение существует между скоростью и количеством электронов в пучке катодных лучей и между длиной и амплитудой соответствующих волн. Скорость электронов обратно пропорциональна длине катодных волн, число их в единице объема пропорционально квадрату амплитуды последних.

Основной принцип волновой механики гласит, что движение электронов может быть прослежено только путем корпускулярной интерпретации (при помощи вышеприведенных соотношений) законов распространения соответствующих волн, причем это распространение определяется уравнением, аналогичным тому, которое определяет распространение волн света.

#### **§ 10. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ К ВЫЧИСЛЕНИЮ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ**

Если световые волны распространяются в прозрачной среде, которую, невзирая на ее корпускулярную структуру, можно рассматривать как вполне однородную, и если при этом междуатомные расстояния малы по отношению к длине волн, то последние не испытывают никакого рассеяния, т. е. никакого ослабления своей интенсивности.

Наоборот, если однородность этой среды нарушается неправильными колебаниями ее плотности, волны частично рассеиваются неправильным образом во всех

направлениях. Это явление нам хорошо известно, так как благодаря ему мы видим небо, т. е. атмосферный воздух. То же самое явление имеет место в жидких и твердых телах. Так как колебания плотности вызываются неправильным тепловым движением, то интенсивность рассеянного света и, следовательно, ослабление интенсивности первичных лучей на единицу длины возрастают с повышением температуры. Для обычных температур оно (в случае твердых тел) приблизительно пропорционально абсолютной температуре.

Если исходить из корпускулярной теории света, то первичные лучи следует рассматривать как поток снарядиков (квантов), несущихся в одном и том же направлении: рассеяние света с этой точки зрения происходит вследствие отклонения этих снарядиков от их прямолинейного пути, т. е. вследствие явлений столкновения. Поскольку длина волны велика в сравнении с расстояниями между соседними атомами, средний свободный пробег квантов остается независимым от этих расстояний и очень большим по сравнению с ними. Легко показать, что он равен обратной величине коэффициента затухания волн (на единицу длины).<sup>6</sup> Таким образом, для обычных температур он должен изменяться обратно пропорционально абсолютной температуре.

Рассматривая рассеяние катодных волн в металлическом теле, мы получаем такие же самые соотношения, как и в случае света, если предположить, что длина этих волн достаточно велика по отношению к междуатомным расстояниям. Длины волн, соответствующие скоростям электронов, определяемым законом Ферми, по крайней мере в несколько раз больше, чем расстояние между соседними атомами. Таким образом, указанное условие можно считать выполненным. Этим объясняется необычайно большая величина средних свободных пробегов, вычисленных Зоммерфельдом, исходя из его формулы для электропроводности (см. стр. 204).

Введя в эту формулу значение свободного пробега, вычисленного как обратное значение коэффициента ослабления катодных волн, я получил результаты, которые находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.\*

---

\* Эти результаты были мной доложены в 1927 г. на конгрессе памяти Вольты в Комо. При определении скоростей электронов я ис-

Таким образом можно объяснить резкое уменьшение проводимости металлов в точке плавления (колебания плотности и, следовательно, рассеяние катодных волн при одинаковой температуре должны быть больше в жидкостях, чем в твердых телах). Можно также количественно объяснить тот хорошо известный факт, что металлы, содержащие какие-либо примеси (например, атомы других металлов), всегда, т. е. независимо от характера этих примесей, обладают большим электрическим сопротивлением, нежели чистые металлы, причем это добавочное сопротивление не зависит от температуры (правило Маттиссена). Этот результат непосредственно вытекает из того обстоятельства, что рассеяние катодных волн при наличии примесей (а также связанных с ними искажений кристаллической решетки) увеличивается примерно таким же образом, как и рассеяние света в атмосфере при наличии пыли.

#### § 11. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ В СВЯЗИ С ПОЯВЛЕНИЕМ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

Дальнейшим развитием теории электропроводности металлов в рамках волновой механики мы обязаны главным образом двум молодым немецким физикам Ф. Блоху и Р. Пайерлсу.

В 1928 г. они разработали теорию движения отдельных электронов в кристаллической решетке как для случая, когда электроны слабо связаны с отдельными атомами (для этого случая задача была в общих чертах решена мной в 1927 г.), так и для случая, когда эта связь является сильной. С точки зрения классической механики переход электронов от одного атома к соседнему при сильной связи был бы невозможен, так как для этого электрону пришлось бы перейти через область отрицательного значения кинетической энергии, т. е. мнимого значения скорости. В волновой механике подобный переход представляется вполне возможным (см. ниже). Далее Блох и Пайерлс исследовали более точным образом, нежели это можно сделать при помощи набросанной выше картины рассеяния катодных волн, то торможение, которое испы-

---

ходил из своей прежней теории (1924 г.); теория Зоммерфельда была им впервые доложена на том же конгрессе.

тывают электроны благодаря тепловому движению и которое в присутствии внешнего электрического поля приводит к образованию электрического тока, пропорционального последнему. Наконец, ими были изучены те усложнения, которые обуславливаются наличием магнитного поля (увеличение сопротивления, эффект Холла). Впрочем здесь теория покамест дает лишь результаты качественного, а не количественного характера.<sup>7</sup>

Вопрос о магнитных свойствах металлов был рассмотрен Паули в связи с новой статистикой электронов еще в 1927 г. При этом Паули учитывал лишь ту часть намагничивания газа, которая обуславливается ориентацией магнитных осей электронов, считая, что поступательное движение последних не имеет значения. Ориентируя часть электронов в направлении силовых линий, магнитное поле производит частичное разделение электронных пар, так как два электрона могут двигаться совершенно одинаковым образом и, в частности, с одинаковой энергией лишь в том случае, если оси их направлены в противоположные стороны.

Половина разведенных таким образом электронов переходит при этом к состоянию движения с большей энергией, поскольку все состояния с меньшей энергией оказываются занятыми. Подобный развод электронных пар, связанный с их ориентацией и возрастанием кинетической энергии, продолжается до тех пор, пока это возрастание еще компенсируется уменьшением магнитной энергии. В результате, при не слишком сильных магнитных полях, получается слабое намагничивание, прямо пропорциональное магнитному полю и обратно пропорциональное абсолютной температуре. Этим свойством, т. е. парамагнетизмом, не зависящим от температуры, на самом деле характеризуется большинство металлических тел.

В 1930 г. расчеты Паули были дополнены исследованиями молодого советского теоретика Л. Ландау, который показал, что согласно волновой механике поступательное движение свободных электронов в магнитном поле должно обуславливать отрицательное намагничивание (диамагнетизм), ослабляющее на одну треть эффект Паули (согласно классической механике свободные электроны не должны были бы давать диамагнетизм).

Среди металлических тел существует группа ферромагнитных веществ, отличающихся своей способностью на-

магничиваться чрезвычайно сильно в относительно слабых полях и даже сохранять это намагничение при отсутствии всякого поля. В этом случае разделение электронных пар, связанное с намагничиванием, сопровождается не увеличением, но уменьшением энергии и поэтому происходит самопроизвольно — до полного насыщения. Для объяснения подобной тенденции к спонтанному намагничиванию необходимо принять во внимание силы, связывающие свободные электроны в отдельных атомах. При этом, как показал Гейзенберг в 1928 г., в зависимости от характера движения, обусловленного этими силами, параллельная ориентация электронных магнитов может сопровождаться как увеличением их энергии (так же как в случае совершенно свободных электронов), так и ее уменьшением. Количественная разработка этого принципа, который в качественной форме был высказан мной несколько раньше, привела Гейзенберга к удовлетворительному объяснению основных свойств ферромагнитных тел.<sup>8</sup>

В реальных телах эти свойства осложнены благодаря наличию внутренних напряжений и деформаций кристаллической решетки и существованию микрокристаллической структуры тела — различной ориентировки отдельных кристалликов. Соответствующие усложнения были исследованы на основе теории Гейзенберга в Германии Р. Беккером, а у нас — Н. С. Акуловым.

Последнему удалось, кроме того, построить количественную теорию магнитострикционных явлений, т. е. изменений размеров ферромагнитных тел под действием магнитных сил.

Следует также упомянуть о ряде интересных соотношений между электрическими, тепловыми и магнитными свойствами металлов, которые за последние годы были установлены Я. Г. Дорфманом и его сотрудниками, но которые еще ждут своего квантового истолкования. Особенно интересна корреляция, найденная И. К. Кикоиным и Б. Г. Лазаревым между гальваномагнитными свойствами металлов и их способностью при очень низких температурах резко терять свое электрическое сопротивление, т. е. превращаться в сверхпроводники. Вопрос о механизме сверхпроводимости остается, однако, покамест невыясненным несмотря на ряд интересных попыток.

В заключение я хочу рассказать в нескольких словах о применении волновой механики к вопросу прохождения электрического тока через контакт между двумя разными веществами. Согласно прежним взглядам, подобный проводящий контакт следовало представлять себе как поверхность фактического соприкосновения двух металлов друг с другом. Согласно волновой механике, фактическое соприкосновение не является необходимым: электроны могут перескакивать из одного металла в другой через разделяющий их узкий зазор (шириной в 10—20 межуатомных расстояний), который в соответствии с классической теорией должен был бы являться для них непреодолимым барьером. Проводимость подобного зазорного контакта быстро убывает с увеличением его ширины и далее возрастает с увеличением приложенной разности потенциалов. Последним обстоятельством объясняется свойство порошкообразных полупроводников (вроде, например, карборунда), которые ведут себя как изоляторы при малых напряжениях и как обыкновенные металлические проводники при больших.

В случае контакта между металлом и полупроводником электрическая проводимость оказывается неодинаковой в противоположных направлениях.

Это обстоятельство обуславливает выпрямление переменных электрических токов подобными контактами (оно лежит в основе действия кристаллических детекторов). Теория этого выпрямляющего действия в 1931 г. была разработана акад. А. Ф. Иоффе и мной, а также одновременно несколькими физиками за границей.<sup>9</sup>

Я не имею возможности останавливаться на ряде других, более специальных, вопросов теории металлов, которые уже разрешены за последние годы благодаря применению волновой механики.\* Я хотел бы указать лишь на то, что наряду с этими разрешенными вопросами перед ней стоит еще множество интересных вопросов, ожидающих своего разрешения. Помимо уже упомянутого выше вопроса о сверхпроводимости, сюда относится вопрос

---

\* Особенного внимания заслуживает работа И. Е. Тамма и С. П. Шубина о фотоэлектрическом эффекте. (Zs. f. Phys., 68, 97, 1931).

о пластических свойствах металлов, о строении, механических, тепловых и магнитных свойствах металлических сплавов и т. д. В этих вопросах, имеющих особенное значение для техники, теория в настоящее время лишь начинает делать первые шаги. Позволительно, однако, выразить уверенность в том, что физики, в частности советские физики, вооруженные новой квантовой механикой и связанной с ней статистической теорией, в ближайшие годы найдут решения всех этих вопросов.



## ОБ ЭЛЕМЕНТАРНОМ ВЫВОДЕ НЕКОТОРЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ

### ВВЕДЕНИЕ

В своей элементарной теории электропроводности металлов Друде рассмотрел влияние, оказываемое электрическим полем на отдельные электроны, предполагая, что поле вызывает ускоренное движение электронов, прерываемое столкновениями. Вместо этого Лоренц ввел статистический метод, в котором электроны рассматривались коллективно, а влияние поля сводилось не к изменению скорости отдельного электрона, но к изменению распределения скоростей, приводящему к увеличению числа электронов, движущихся в направлении поля.

В действительности оба метода совершенно эквивалентны друг другу. Если мы вычислим по методу Друде электропроводность, обусловленную каждым из электронов, и просуммируем полученные выражения, принимая во внимание закон Максвелла для распределения скоростей между электронами (в отсутствии поля), то получим точно такой же результат, как и при использовании метода Лоренца, основанного на распределении возмущенного распределения скоростей.<sup>1</sup>

Метод Лоренца был впоследствии применен Зоммерфельдом с заменой закона распределения Максвелла законом распределения Ферми. На первый взгляд может показаться, что в этом случае использование индивидуального метода типа метода Друде недопустимо ввиду наличия статистической взаимосвязи между различными

электронами. Действительно, электрон, обладающий данным направлением спина, может изменить свою скорость благодаря влиянию поля или же вследствие столкновений только в том случае, если состояние движения, в которое он при этом переходит, не занято каким-либо другим электроном. Это условие, очевидно, выполняется для электронов, скорости которых относятся к «максвелловскому» хвосту распределения Ферми. Создается, однако, впечатление, что оно не может быть выполнено для основной массы электронов, соответствующей той части фазового пространства, которая практически заполнена (при обычных температурах на каждую ячейку фазового пространства, обладающую объемом  $h^3$ ,<sup>\*</sup> приходится практически по одному электрону со спином данной ориентации).

Легко убедиться, однако, в том, что это обстоятельство нисколько не должно нас тревожить. Действительно, неизменность распределения, удовлетворяющего принципу Паули, даже с точки зрения классической механики обеспечивается теоремой Лиувилля.<sup>2</sup> Эта теорема справедлива, если электроны рассматриваются как движущиеся под действием внешних сил. В теории металлов взаимодействие электронов описывается с помощью «самосогласованного» поля, которое можно рассматривать просто как эквивалентное внешнее поле. Условие применимости теоремы Лиувилля, таким образом, удовлетворяется, и мы можем прийти к заключению, что величина фазового объема, занимаемого данной системой электронов, будет оставаться постоянной при их движении, независимо от воздействия на них того или иного внешнего поля (включая поле, ответственное за процессы столкновений). Следовательно, если плотность электронов в фазовом пространстве была вначале, в согласии с принципом Паули, меньше чем 1 на  $h^3$  (для электронов, обладающих данным спином), то она всегда будет меньше этой величины. Когда в результате какого-нибудь столкновения электрон отклоняется от своего прямолинейного пути и попадает в фазовую ячейку, которая до того была занята другим электроном, то последний одновременно освобождает ячейку, и это происходит в соответствии с уравнениями движения, а не в силу какого-либо статистического запрета.

---

\*  $h$  — постоянная Планка

## § 1. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Для того чтобы убедиться в пригодности и простоте метода Друде, применим его для вычисления электропроводности и теплопроводности металла (пользуясь моделью Зоммерфельда) и выведем формулу Зоммерфельда для закона Видемана—Фрэнца.

Среднее значение добавочной скорости, приобретаемой электроном во внешнем поле  $E$  за время  $l/v$ , в течение которого он двигался бы со своей обычной скоростью  $v$  от одного столкновения до следующего ( $l$  — средняя длина свободного пробега), равно

$$\frac{eE}{2m} \frac{l}{v}.$$

Умножив эту величину на заряд электрона  $e$  и просуммировав по всем электронам, содержащимся в единице объема, получим плотность тока и, соответственно, удельную электропроводность

$$\sigma = \frac{e^2 l}{2m} \sum \frac{1}{v} = \frac{ne^2 l}{2m} \overline{v^{-1}},$$

где  $\overline{v^{-1}}$  — среднее значение  $v^{-1}$  для невозмущенного распределения скоростей.

Согласно кинетической теории газов, теплопроводность электронного газа может быть определена непосредственно с помощью формулы

$$\kappa = \frac{1}{3} l \bar{v} n c_e,$$

где  $c_e$  — теплопроводность, приходящаяся на один электрон. Следовательно,

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{2}{3} \frac{m c_e}{c^2} \frac{\bar{v}}{v^{-1}}.$$

Если считать, согласно Друде, скорость  $v$  постоянной, то

$$\frac{m \bar{v}}{v^{-1}} = m v^2 = 3kT;$$

полагая  $c_e = \frac{3}{2} k$ , мы получаем, таким образом,

$$\frac{\chi}{\sigma} = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T.$$

Если  $\bar{v}$  и  $\bar{v}^{-1}$  вычислены с помощью закона Максвелла, то при том же значении  $c_e$  получаем результат Лоренца

$$\frac{\chi}{\sigma} = 2 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T.$$

Для того чтобы получить формулу Зоммерфельда для отношения  $\frac{\chi}{\sigma}$ , мы должны вычислить средние значения скорости  $v$  и величины  $v^{-1}$  с помощью закона распределения Ферми. При не слишком высоких температурах последний может быть отождествлен со своей предельной формой, соответствующей абсолютному нулю температуры. Таким образом,

$$\overline{f(v)} = \int_0^{v_0} f(v) v^2 dv \bigg/ \int_0^{v_0} v^2 dv = \frac{3}{v_0^3} \int_0^{v_0} f(v) v^2 dv,$$

где  $v_0$  — максимальное значение скорости при  $T = 0$ . Это дает  $\bar{v} = \frac{3}{4} v_0$  и  $\bar{v}^{-1} = \frac{3}{2} v_0^{-1}$ . Мы должны, кроме того, заменить классическое выражение для теплоемкости  $c_e$  квантовым выражением, которое в предельном случае очень низких температур сводится к следующему: \*

$$c_e = \frac{\pi^2 k^2 T}{m v_0^2}.$$

Это приводит к результату, полученному Зоммерфельдом,

$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 T.$$

Отметим, что если в классической теории температура входит в отношение  $\frac{\chi}{\sigma}$  через среднюю кинетическую энер-

\* A. Sommerfeld, Zs. f. Phys., 47, 1, 1928.

гию  $mv^2$  ( $= 3 kT$ ), то в новой теории, где эта энергия практически не зависит от температуры, последняя входит в рассмотрение через теплоемкость. Соотношение между двумя методами (индивидуальным методом Друде и коллективным методом Лоренца) в случае статистик Ферми при не слишком высоких температурах можно сопоставить с соотношением между объемным интегралом от дивергенции некоторого вектора и соответствующим поверхностным интегралом. Обычный объем должен быть заменен здесь областью в пространстве скоростей ( $\xi, \eta, \zeta$ ), а рассматриваемая замкнутая поверхность есть поверхность  $\zeta^2 + \eta^2 + \xi^2 = \frac{1}{2} mv_0^2$ , соответствующая границе области, занятой электронами при  $T=0$ . Электроны, расположенные в объеме, ограниченном этой поверхностью, за исключением электронов, находящихся в слое вблизи от нее, с коллективной точки зрения практически не принимают участия в создании суммарного тока, так как обусловленные ими токи взаимно компенсируются. Поэтому суммарный ток можно рассматривать как результат изменения распределения скоростей на или, вернее, вблизи поверхности.

## § 2. ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА

Хотя статистическая взаимосвязь электронов, учитываемая принципом Паули, и не должна приниматься во внимание в явной форме, тем не менее может создаться впечатление, что она должна содержаться в неявном виде в значении средней длины свободного пробега. В 1928 г. Л. Бриллюэн\* отметил, что последнее должно превышать то значение длины свободного пробега  $l_0$ , которое мы получили бы без учета статистической взаимосвязи электронов. Действительно, можно было бы думать, что те электроны, скорости которых значительно меньше, чем  $v_0$  (где  $v_0$  — максимальное значение скорости при  $T=0$ ) и которые заполняют область, ограниченную поверхностью Ферми, обладают практически бесконечно большой длиной свободного пробега, поскольку возможность их отклонения вследствие столкновений практически отсутствует

---

\* L. Brillouin, C. R., 188, 242, 1928.

в силу того обстоятельства, что все соседние состояния движения заняты. Это представление, однако, совершенно ошибочно, так как принцип Паули не налагает никаких сверхмеханических ограничений на движение электронов, лимитируя только выбор начального состояния. Если этот выбор осуществлен в соответствии с принципом Паули, то в дальнейшем последний будет выполняться автоматически. Поэтому при вычислении средней длины свободного пробега электрона в отсутствие внешнего электрического поля мы можем рассматривать его точно так же индивидуально, как и раньше, несмотря на его статистическую зависимость от других электронов, поскольку взаимодействие электронов заменено эквивалентным внешним («самосогласованным») полем. Соответственно, нет оснований ожидать, что средняя длина свободного пробега будет заметным образом зависеть от скорости.

Я хотел бы отметить здесь, что очень простой метод определения зависимости средней длины свободного пробега от температуры (для электрона, обладающего данной скоростью) может быть получен путем описания теплового движения в металлах с помощью квантов звука, или фононов, которые могут быть связаны со звуковыми волнами Дебая, характеризующими это движение таким же образом, как кванты света, или фотоны, связаны со световыми волнами в случае теплового излучения.\*

Рассеяние электронов, сопровождающееся изменением энергии, вследствие теплового движения частиц твердого тела можно рассматривать как результат следующих процессов:

1) столкновений между электронами и фононами (совершенно аналогичных эффекту Комптона с той разницей, что световые волны заменены в этом случае звуковыми волнами);

2) испускания или поглощения фононов электронами. Этот процесс, поскольку электроны рассматриваются как свободные, не имеет аналога в случае со светом; легко показать, однако, что в случае механических колебаний, соответствующих звуковым или тепловым волнам Дебая, он играет доминирующую роль.\*\*

---

\* I. E. Tamm, Zs. f. Phys., 60, 352, 1930.

\*\* R. Peierls, Ann. d. Phys., 4, 121, 1929.

Рассмотрим процессы первого типа. Они могут быть полностью охарактеризованы путем введения в рассмотрение эффективного сечения  $q$  для столкновения между электроном и фононом. Коэффициент рассеяния  $\mu$ , представляющий собой обратное значение средней длины свободного пробега,<sup>3</sup> может быть в таком случае вычислен с помощью обычной формулы

$$\mu = qn_p,$$

где  $n_p$  — концентрация фононов, т. е. их число в единице объема.

Характерное отличие звуковых волн от световых заключается в том, что их спектр ограничен некоторой максимальной частотой  $\nu_0$ , связанной с характеристической температурой Дебая  $\theta$  соотношением  $h\nu_0 = k\theta$ . При высоких температурах колебания этой частоты являются преобладающими, и число фононов может быть определено просто как частное от деления тепловой энергии  $cT$ , приходящейся на единицу объема ( $c$  — теплоемкость), на величину  $h\nu_0$ . Мы видим, таким образом, что  $n_p$  должно быть пропорционально абсолютной температуре и что, следовательно,  $\mu$  также должно быть пропорционально температуре. Именно это и подтверждается опытом, так как удельное сопротивление металла  $1/\sigma$  обратно пропорционально  $l$  и, следовательно, прямо пропорционально  $\mu$ .

В случае более низких температур концентрация фононов определяется выражением

$$n_p \sim \int_0^{\nu_0} \frac{\nu^2 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

которое получается, если опустить множитель  $h\nu$  в соответствующем выражении для тепловой энергии

$$W \sim \int_0^{\nu_0} \frac{h\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Это приводит к зависимости  $\sigma$  от  $T$ , которая, хотя и несколько отлична от зависимости, даваемой эмпирическим соотношением Грюнейзена ( $\frac{1}{\sigma} \sim cT = T \frac{dW}{dT}$ ), но но-

сит тот же характер. В предельном случае очень низких температур предыдущая формула для  $n_p$  сводится к

$$n_p \sim \left(\frac{kT}{h}\right)^3 \int_0^{\infty} \frac{\xi^2 d\xi}{e^{\xi} - 1} \sim T^3.$$

Это должно было бы означать, что при низких температурах сопротивление изменяется как  $T^3$ . В действительности следует, однако, принимать во внимание не только число столкновений, которое определяется коэффициентом рассеяния  $\mu$ , но также и их эффективность в отношении изменения импульса и энергии электрона. Предполагая, что эта эффективность пропорциональна квадрату энергии  $h\nu$  тех фононов, которые при рассматриваемой температуре являются наиболее многочисленными, мы приходим к заключению (поскольку эта энергия пропорциональна  $T$ ), что удельное сопротивление пропорционально  $T^5$ . Этот результат был получен Блохом и Пайерлсом.

До сих пор мы оставляли без внимания процессы испускания и поглощения фононов. Легко показать, однако, что рассмотрение этих процессов приводит к тем же общим результатам, что и рассмотрение процессов столкновений.



## IV. ФИЗИКА ЖИДКОСТЕЙ

\*

### ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ, СВЯЗАННЫХ С КАВИТАЦИЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ В ЖИДКОСТЯХ

Распространение ультразвуковых волн в воде или водном растворе различных веществ обычно сопровождается процессами окисления, которые связаны с образованием атомного кислорода, перекиси водорода и других активных веществ. Многими авторами (и мной, в частности) указывалось, что образование этих веществ связано с кавитацией. Природа этой связи была освещена С. Бреслером, который отметил, что распространение ультразвуковых волн в воде сопровождается мелкими электрическими разрядами (искрами). Отсюда следует, что образование активного кислорода может считаться результатом электрического разряда через маленькие пузырьки, возникающие благодаря процессу кавитации и содержащие водяной пар и кислород из растворенного воздуха, в частности, результатом фотохимического процесса, обусловленного ультрафиолетовым светом, испускаемым при электрическом разряде.

Целью данной работы является объяснение происхождения этих электрических разрядов.

Следует упомянуть, что турбулентное движение воды (и многих других веществ) обычно сопровождается электризацией (баллоэлектричество). Следовательно, появление электрических зарядов противоположного знака на противоположных сторонах газового пузырька, возникающего в воде (как результат кавитационного процесса при

ультразвуковых волнах), нужно считать явлением такой же природы, как и возникновение электрических зарядов на маленьких капельках воды в результате разрыва воды при пульверизации.

Происхождение таких электрических зарядов может быть связано с присутствием в воде ионов различных растворенных веществ. Если жидкость разрывается резко, образуя чечевицеобразную полость, то ионы обоих знаков, которые были вначале распределены в тонком слое воды, должны разделиться на две группы, идущие к противоположным стенкам возникающей полости. Вначале, пока расстояние между стенками полости очень мало, порядка расстояния между соседними молекулами, ионы обоих знаков должны независимо друг от друга распределяться между двумя стенками полости. Поскольку это распределение за счет флуктуаций должно, вообще говоря, отличаться от равномерного, то ясно, что противоположные стенки возникающей полости должны иметь заряды противоположного знака.

Среднее значение этих зарядов легко вычислить следующим образом. Предположим, что полость возникает в виде тонкой линзы с радиусом  $r$ , которая затем превращается в сферический пузырек того же радиуса. Толщина линзы постепенно растет от некоторой начальной величины  $\delta$  порядка расстояния между соседними молекулами  $4 \cdot 10^{-8}$  см, скажем, до  $r$ . Если среднее количество ионов данного знака в единице объема равно  $n_0$ , то среднее число ионов, находящихся на одной из сторон возникающей полости, будет равно  $\nu_0 = n_0 \pi r^2 \delta$ . Количество  $\nu$  ионов одного знака, которые остаются на одной из стенок этой полости, должно отличаться от  $\frac{1}{2} \nu_0$ . Средняя величина

$(\nu - \frac{1}{2} \nu_0)^2$  равна  $\frac{1}{4} \nu_0$ . Таким образом, флуктуация

в распределении ионов данного знака между двумя сторонами полости обуславливает появление на ее противоположных сторонах электрических зарядов, равных в среднем  $\nu_0^{\frac{1}{2}} \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заряд одного иона. Если ионы обоих знаков распределены вначале независимо друг от друга, то электрический заряд ( $\pm e$ ), образующийся на каждой стороне полости, равен в среднем  $\varepsilon \sqrt{\nu_0}$ , или

$$e = \varepsilon \sqrt{n_0 \pi r^2 \delta}.$$

Результирующее электрическое поле в полости, трактуемой как плоский конденсатор,  $E = 4\pi\eta$ , где  $\eta = \frac{e}{\pi r^2}$  — поверхностная плотность электрического заряда, т. е.

$$E = \frac{4\epsilon}{r} \sqrt{n_0 \delta \pi}.$$

Это поле остается практически неизменным при утолщении кавитационной линзы, т. е. при превращении ее в сферу того же радиуса. Действительно, если заряды  $\pm e$  распределены на обеих сторонах сферы и создают однородное поле, то напряженность последнего оказывается равной

$$E' = \frac{4}{3} \pi \eta_0,$$

где  $\eta_0$  — максимальное значение поверхностной плотности электрического заряда. Полный заряд  $e$  одной полусферы равен

$$e = \int_0^{\pi/2} \eta_0 \cos \theta 2\pi r^2 \sin \theta d\theta = \pi r^2 \eta_0 = e.$$

Отсюда следует, что  $E' = \frac{1}{3} E$ .

При увеличении объема полости она наполняется водяным паром и газами, растворенными в поле (особенно кислородом). Если результирующее давление или плотность газа в полости достаточно малы, но вместе с тем не слишком малы (см. ниже), то электрическое поле  $E$  (или  $E'$ ) обуславливает разряд, который прямо или косвенно (путем испускания света) вызывает образование атомного кислорода или других химически активных веществ. Условия, которые должны быть выполнены для возникновения разряда, следующие: 1) радиус пузырька  $r$  должен быть бóльшим по сравнению со средней длиной свободного пробега  $l$  электронов в газе, наполняющем шарик (чтобы имела место ионизация столкновениями); 2) давление газа в пузырьке должно быть столь малым, чтобы поле  $E$  превышало критическое значение  $E_k$  для электрического пробоя газа.

Взяв для числа ионов в единице объема  $n_0 = 10^{18}$  1/см<sup>3</sup> и положив  $\delta = 5 \cdot 10^{-8}$  см, мы получаем для полости с радиусом  $r = 10^{-4}$  см  $E = 2CGSE$ , или 600 в/см. Это доста-

точно для пробоя газа с давлением порядка  $1/50$  атм, что обеспечивает длину свободного пробега, равную приблизительно  $10^{-4}$  см. Таким образом, длина свободного пробега оказывается почти равной радиусу полости. Это равенство легко может быть заменено нужным нам неравенством при помощи незначительного изменения исходных цифр в пределах экспериментальных условий.

Предшествующие рассуждения основаны на предположении, что кавитационный пузырек возникает в виде линзы, которая затем превращается в шарик с тем же радиусом. Если бы кавитационный пузырек имел с самого начала сферическую форму с постепенно возрастающим радиусом, то механизм флуктуации, который, с нашей точки зрения, обуславливает электрическое поле, был бы недействителен. Мы считаем, что следует различать два существенно различных рода кавитации: 1) «кавитацию вскипания», происходящую благодаря более или менее плавному уменьшению давления жидкости до давления насыщенного пара; такое изменение давления приводит к возникновению пузырьков пара жидкости, которые с самого начала имеют сферическую форму; 2) «кавитацию разрыва», происходящую благодаря быстрому уменьшению давления, которое может стать даже отрицательным. Это приводит к разрыву жидкости по некоторой поверхности, аналогичному разрыву (растрескиванию) твердого тела. Получающаяся в результате линзообразная полость постепенно превращается в сферический пузырек. Согласно нашей схеме, электрические явления и соответствующие химические реакции могут быть связаны только с кавитацией разрыва, происходящей благодаря ультразвуковым колебаниям сравнительно большой частоты и амплитуды. Наблюдения в действительности показывают, что кавитация вскипания в воде (например, при протекании ее через сопло) не сопровождается окислительными процессами. Другим доказательством того, что кавитация вскипания и даже кавитация разрыва при малой скорости утолщения линзы не могут сопровождаться электризацией, является тот факт, что при таких условиях электрический разряд прошел бы сквозь жидкость в форме обычного ионного тока проводимости.

Наша гипотеза о механизме кавитаций разрыва может быть обобщена на случай, когда кавитационный пузырек после превращения из линзы в шарик растет дальше по

всем направлениям. Однако легко видеть, что этот рост должен привести к дальнейшему уменьшению поля внутри пузырька, так что электрический пробой может иметь место практически только в первой фазе эволюции пузырька (от линзы до шара).

Электрическое поле внутри кавитационного пузырька может быть немного больше, чем это было рассчитано ранее из среднего значения квадратичной флуктуации. Вероятность того, что флуктуация  $v - \frac{1}{2}v_0 = \xi$  превышает некоторую величину  $\Delta v$ , равна

$$\frac{1}{\sqrt{\pi\bar{v}}} \int_{\Delta v}^{\infty} e^{-\frac{\xi^2}{2\bar{v}}} d\xi,$$

где  $\bar{v} = \frac{1}{2}v_0$ . Возможно, что электрический пробой происходит только в тех кавитационных пузырьках, где флуктуация в распределении положительных и отрицательных ионов особенно велика.

Точная теория кавитационной электризации и других баллоэлектрических явлений должна принимать во внимание усложнения, возникающие из-за ориентации полярных молекул жидкости (воды) в образующихся поверхностных слоях, а также «отрицательную адсорбцию» ионов в этих слоях. Последнее обстоятельство не может иметь значения при кавитации разрыва, ибо в этом случае равновесие не достигается.

Флуктуация в ориентации молекул поверхностного слоя может сама по себе, помимо пространственного разделения противоположных ионов, приводить к созданию электрического поля внутри кавитационного пузырька. Величина этого ориентационного поля может быть определена следующим образом. Для простоты предположим, что дипольный момент может ориентироваться только в двух противоположных направлениях, нормально к поверхности. Среднее значение квадрата разности числа молекул, ориентированных противоположным образом на одной стороне линзообразной полости, равно общему числу молекул в соответствующем слое, т. е.  $\pi r^2 N \delta$ , где  $N$  — среднее число молекул в единице объема. Этому соответствует электрический момент  $P = p \sqrt{\pi r^2 N \delta}$ , где

$\rho$  — момент одной молекулы, распределенный по всей поверхности  $\pi r^2$ . Электрическое поле, созданное образовавшимся таким образом двойным слоем, равно

$$E = \frac{2\pi (P/\pi r^2)}{r} = \frac{2\rho}{r^2} \sqrt{\pi N \delta}.$$

Полагая  $N = 10^{22}$  1/см<sup>3</sup>,  $\delta = 4 \cdot 10^{-8}$  см,  $r = 10^{-4}$  см,  $\rho = 10^{-18}$ , мы получаем  $E = 10^{-3}$  CGSE.

Таким образом, ориентационный эффект оказывается ничтожно малым в сравнении с ионным, за исключением того случая, когда концентрация ионов очень мала.

## ТЕОРИЯ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

До сравнительно недавнего времени было принято сближать жидкое состояние с газообразным, хотя, казалось бы, жидкости ближе к твердым телам, например, по величине своей плотности. Гораздо больше придавалось значения тому обстоятельству, что жидкости, подобно газам, лишены определенной формы и заполняют то пространство, которое им предоставлено при данном объеме.

Далее, сближению жидкого состояния с газообразным содействовала знаменитая теория Ван-дер-Ваальса. Она устанавливала принципиальную непрерывность между жидким и газообразным состоянием. При подъеме температуры выше определенного критического уровня или при увеличении давления выше определенного для данного вещества значения разница между жидким и газообразным состоянием исчезает. При этом оказывается возможным перевести вещество из одного состояния в другое путем непрерывных переходов. Вот это обстоятельство больше всего способствовало созданию представления о близости жидкого состояния к газообразному и тем самым приводило к противопоставлению жидкого состояния твердому.

Однако развитие молекулярной физики за последние 20—30 лет привело к коренному изменению взглядов на этот вопрос. Теперь мы можем с уверенностью сказать, что при температурах, не слишком далеких от точки кристаллизации, жидкость гораздо ближе к кристаллам, чем к газам, хотя при температурах или давлениях, близких к критическим, она начинает походить на газ.

Жидкое состояние является промежуточным между твердым (кристаллическим) и газообразным. Естественно, что при более низких температурах оно имеет сходство с твердым состоянием, а при более высоких — с газообразным. Жидкости могут находиться в твердообразном или газообразном состояниях. Ключом к пониманию соотношения между жидким состоянием и двумя крайними состояниями, которые оно соединяет друг с другом, является правильное понимание характера теплового движения во всех трех состояниях — твердом, жидком и газообразном.

## I

Нам наиболее хорошо знакома картина теплового движения в газе. В этом случае частицы беспорядочно движутся со скоростью порядка скорости звука, причем их прямолинейное равномерное движение нарушается при их кратковременных столкновениях, когда между ними возникают значительные силы.

Многие основные свойства газов мало зависят от этих, хотя сильных, но кратковременных столкновений между частицами; например, теплоемкость газа и зависимость его объема от давления обнаруживают сравнительно слабую зависимость от этих внутренних сил взаимодействия. Однако, как известно, эти столкновения существенным образом определяют ряд других свойств, которые связаны с необратимыми процессами, например, с процессом диффузии (перемешивания) молекул, с процессом теплопроводности (смешивания более «горячих» и более «холодных» молекул), вязкости (происходящей от перемешивания молекул, имеющих большую или меньшую среднюю скорость движения) и т. д.

Существенную роль для этих процессов играет взаимодействие между молекулами, происходящее при их сближении. На те же свойства газа, которые характеризуют его равновесное состояние, эти взаимодействия оказывают сравнительно небольшое влияние.

Если мы перейдем от этой крайности к противоположной, а именно, к твердым кристаллическим телам, то получим совершенно иную картину теплового движения. Оно заключается главным образом в малых колебаниях частиц около определенных неизменных положений равновесия.



Такое представление достаточно для описания равновесных свойств твердых кристаллических тел, скажем, теплоемкости, которая оказывается в два раза больше теплоемкости газов, состоящих из тех же одноатомных частиц. Однако оно недостаточно для объяснения ряда других свойств, связанных с разными неравновесными состояниями и скоростью их ликвидации.

Известно, например, что всякое твердое тело может испаряться. Это испарение происходит в результате отрыва поверхностных частиц от остальных, окружающих их изнутри, справа, слева, спереди и сзади. При этом им препятствуют силы, связывающие их с глубже лежащими частицами. Однако они могут преодолеть эти силы, и при достаточно высокой температуре, т. е. достаточно большой средней кинетической энергии теплового движения, значительное число частиц способно оторваться от окружающих и перейти в газообразную фазу.

Если возможен такой отрыв частиц твердого тела на его поверхности, то не может ли быть аналогичного отрыва их внутри твердого тела? Ведь последнее состоит из отдельных частиц, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Расположены они очень густо, но, тем не менее, могут «потесниться» и дать место какой-либо посторонней частице, внедрившейся из окружающего пространства.

Нетрудно себе представить, что одна частица кристаллического твердого тела может вырваться из окружения, в котором она находится, и, прорвавшись через преграду, образуемую соседними частицами, очутиться в новом окружении. В результате вырвавшаяся частица переменит своих соседей, перейдет из исходного окружения к новому, которое частично будет отличаться от исходного.

Этот акт можно разделить на два последовательных акта: сначала частица, очевидно, за счет своей повышенной кинетической энергии увеличивает свою потенциальную энергию, переходя оттуда, где последняя имела минимальное значение, туда, где значение ее максимально, и затем вновь переходит в состояние с минимальной потенциальной энергией, но не туда, где она была раньше, а в соседнее положение.

Конечно, если исходное положение было правильным, т. е. все окружающие частицы были расположены в узлах

идеальной кристаллической решетки, то новое положение уже будет неправильным, данная частица попадет в междоузлие, а соседние частицы должны будут потесниться, чтобы дать ей место. Рассматриваемая частица может в дальнейшем перейти в соседнее, такое же неправильное, положение равновесия, в какое-то новое междоузлие и таким образом может постепенно перемещаться по всему кристаллу.

С другой стороны, обратим внимание на ту свободную вакансию в узле кристаллической решетки, которую частица покидает. Этот пустой узел, или, как мы говорим, «дырка», окружен атомами, которые сидят в обычных положениях равновесия. Они слегка сместятся, когда рассматриваемый нами атом выскочит. Затем один из окружающих атомов может перескочить с того места, где он находился, в эту дырку. Получится такой же результат, как если бы дырка перескочила на соседнее место. За этим может последовать такой же второй перескок. В результате такие дырки будут также «гулять» по всему объему кристалла, перемещаясь от одного узла к другому, соседнему.

Такой акт перехода атома в образовавшуюся около него дырку похож на обычное испарение. Разница заключается в том, что при обычном испарении для испаряющегося атома имеется больше простора — все пространство, а в данном случае при переходе атома в его распоряжении имеется только объем одной дырки. Атом, в сущности говоря, меняет одну дырку на другую.

Переход дырки на соседнее место можно трактовать как двойной акт, первая половина которого сводится к испарению атома, а вторая — к конденсации его в соседнем положении.

Необходимость такого рода процессов вытекает из основных принципов статистики, которая позволяет подсчитать и вероятность этих процессов. Вероятное число такого рода «нарушителей порядка» в кристалле быстро возрастает с повышением температуры, хотя остается очень малым и даже около температуры плавления не превышает одного процента.

Таким образом, при высокой температуре значительная часть атомов не сидит на тех местах, которые для них предназначены, но совершают малые колебания около положений равновесия. Они находятся в состоянии пере-

хода из одних положений в другие. Эти «нарушители порядка» представляют собой, с одной стороны, дислоцированные атомы, находящиеся в междоузлиях, а с другой — дырки, т. е. узлы решетки, которые оказались вакантными и могут перемещаться благодаря эстафетному механизму перемещения атомов.

Обычное представление кинетической теории твердых тел о том, что тепловое движение сводится к малым колебаниям атомов, оказывается в корне неправильным: атом колеблется более или менее длительно в одном и том же окружении. Однако до поры до времени это движение прерывается переходом из данного положения равновесия в соседнее положение — неправильное, если кругом все узлы заполнены, или правильное, если рядом с данным атомом находилась дырка, которую он может занять, переведя дырку на свое место.

В результате такого процесса атомы твердого тела непрерывно перемешиваются так же, как и атомы газа. Нельзя атом связать с одним узлом решетки, так сказать, «на всю жизнь». Он проводит в каждом узле ограниченную часть своей жизни, пусть длительную, постепенно обходя все узлы решетки и все ее междоузлия.

Перейдем к вопросу о тепловом движении в жидких телах. Жидкость отличается от кристаллических твердых тел отсутствием кристаллической структуры, т. е. неправильным расположением своих частиц. При этом будет иметься в виду простейшая жидкость, состоящая из одноатомных частиц, скажем, аргон в жидком состоянии.

Частицы эти расположены неправильным образом. Это утверждение нуждается в ограничении, о котором будет сказано в дальнейшем. Беспорядок в расположении частиц имеет до некоторой степени относительный характер, но так или иначе положения этих частиц не образуют решетки. Каждая частица окружена некоторым количеством соседей, число которых может варьировать. Если число соседей у каждой плитки торцовой мостовой одинаково и она может в этом смысле иллюстрировать кристалл, то иллюстрацией жидкости может служить булыжная мостовая, камни которой имеют непостоянное количество соседей.

В жидкости имеется еще больший простор для движения атомов, чем в твердом теле. При плавлении кристалла объем его увеличивается на 3—5 и даже 10%. Это увели-

чение объема приводит к значительному оживлению процесса перехода атомов из одного положения равновесия в соседнее по сравнению с тем, что имеет место в кристаллах, где атомы зажаты почти до отказа.

Это в какой-то мере можно сравнить с до отказа переполненным вагоном трамвая. Стоит выйти одному—двум пассажирам, и остальные получают гораздо большую свободу перемещения.

В жидкости эта свобода перемещения, определяемая избыточным объемом жидкости по отношению к объему кристалла, становится сравнительно большой. Это значит, что потенциальные барьеры, которые преграждают дорогу частице в область, занятую ее соседями, снижаются. Так же, как в кристалле, частица жидкости колеблется около временного положения равновесия. Однако, набрав достаточную энергию, она может выскочить из положения равновесия, перейти из одного окружения в соседнее.

Ситуация здесь еще проще, чем в случае кристалла, потому что различие в правильности и неправильности положений равновесия отпадает: все положения являются неправильными. Частица жидкости попадает в новое окружение, которое совершенно эквивалентно прежнему, исходному. Этот акт «выхода из окружения» и попадания в новое окружение не следует обязательно представлять себе в героической форме: частица жидкости может при этом вести себя очень пассивно. Те частицы, которые ее окружают, под влиянием теплового движения сами «открывают ворота» для рассматриваемой нами частицы, сами раздвигаются в стороны, освобождая ей путь, а затем опять замыкаются и запирают ее в новом окружении.

При этом существенную роль играют процессы кавитации, т. е. образования полостей за счет раздвигания частиц в стороны. В такую полость рассматриваемая частица может внедриться без всякой затраты энергии. Любая частица жидкости может таким путем перемещаться по всему ее объему, переходя постепенно с одного места на другое. Поскольку при этом мы не имеем каких-либо узлов, мы не можем также говорить и о дырках, как в случае кристалла. В случае жидкости узлов не существует, и, следовательно, не существует и вакантных узлов, т. е. дырок.

Однако мы можем всякую микрополость, образующуюся в результате раздвигания частиц жидкости, трактовать как подобие дырки.

Процесс образования подобной дырки, в которую может легко проникнуть одна из окружающих ее частиц, происходит в жидкости гораздо быстрее, чем в твердых телах. При повышении температуры скорость этого процесса возрастает. В такой жидкости, как вода, частица меняет свое «местожительство» через каждые  $10^{-11}$  или  $10^{-10}$  сек. Следовательно, в одну секунду она успевает переместиться от  $10^{10}$  до  $10^{11}$  раз.

Однако число колебаний, совершаемых частицей около одного и того же положения равновесия, пока она остается с ним связана, составляет примерно  $10^{13}$  в сек., так что частицы воды при комнатной температуре успевают совершить примерно 100 колебаний перед тем, как перейти в соседнее положение равновесия.

При повышении температуры длительность «оседлой жизни» частиц сокращается, при понижении — увеличивается. Можно показать, что длительность оседлой жизни  $\tau$  в одном и том же окружении в зависимости от температуры  $T$  описывается формулой:

$$\tau = \tau_0 e^{U/kT}.$$

Здесь  $\tau$  представляет период колебаний частиц жидкости около положения равновесия,  $U$  — энергия, которая должна быть затрачена для того, чтобы частица могла «перелезть» через барьер, ограждающий исходное ее жилище, и перескочить в соседнее.

Множитель  $e^{U/kT}$  представляет собой, таким образом, среднее число колебаний, которое частица совершает в одной и той же «квартире» до перехода в соседнюю.

Если сравнить тепловое движение в жидкости с тепловым движением в газе, с одной стороны, и в твердом теле — с другой, то обнаружатся черты сходства и различия. В газе частицы не имеют постоянных «квартир» и движутся свободно. Это движение прерывается только столкновениями, которые их не задерживают и после которых они вновь расходятся.

В идеальном твердом теле, как мы обычно его себе представляем, предполагается, что частицы колеблются около неизменных положений равновесия. В реальных же

твердых телах, а также в жидкостях это предположение не оправдывается. В этом случае мы имеем комбинацию обоих типов движения, а именно, газоподобного типа движения и твердоподобного (как в идеальных твердых телах). С одной стороны, как в идеальном твердом теле, каждая частица жидкости колеблется некоторое время около неизменного положения в неизменном окружении. С другой стороны, как и в газах, она меняет это положение равновесия, переходя из исходного положения в соседнее и затем еще в более отдаленное, и, таким образом, «путешествует» по всему объему, занимаемому жидкостью.

Конечно, это поступательное движение частиц жидкости не похоже на движение частиц газа. Последнее прерывается сравнительно редко, в то время как в жидкостях длина свободного пробега имеет такой же порядок величины, как и расстояние между соседними частицами.

Однако, если отвлечься от колебательной составляющей движения частиц и рассматривать только поступательную, то для траектории частицы жидкости получается такая же ломаная линия, как в случае газа.

Длина прямолинейных отрезков, образующих эту ломаную линию, примерно одинакова (поскольку мы имеем в виду простые жидкости). Отличие от газа заключается в том, что на каждом изломе частица делает паузу и во время этой паузы ведет себя так, как должна была бы себя вести частица идеально твердого тела в неизменном положении равновесия.

## II

Благодаря такой двойственности в характере теплового движения частиц, жидкости обнаруживают двойственность свойств, соединяя в себе свойства, которые приписываются газам (текучесть), со свойствами, приписываемыми твердым телам (упругость на сдвиг). Обычно упругость жидкостей на сдвиг замаскирована большой величиной их текучести. Однако при понижении температуры эти два свойства могут проявиться с разной интенсивностью. Так, например, расплавленное стекло характеризуется всеми чертами жидкости: оно течет, обладает вязкостью. Однако если стекло охладить, то, оставаясь аморфным, лишенным кристаллической структуры, оно

становится твердым, приобретает упругость по отношению к сдвигу.

Ясно, что при таком постепенном изменении свойств стекла в связи с его охлаждением в нем не могут совершенно исчезнуть свойства, которые были ему присущи в нагретом состоянии, в частности текучесть. Точно так же та твердость, которую стекло обрело в холодном состоянии, очевидно, была ему свойственна и в расплавленном виде, но не могла при этом проявиться или, вернее, мы не могли ее заметить.

Вопрос о возможности принципиального объединения понятий жидкого и твердого тела был поставлен Максвеллом в 70-х годах прошлого столетия и решен формально его релаксационной теорией упругости. В этой теории Максвелл предполагал, что одно и то же тело, которое мы будем называть аморфным, может проявлять и свойства текучести, характерные для жидкости, и свойства упругости на сдвиг, характерные для твердого тела. При этом часть усилия, приложенного к этому телу, идет на преодоление вязкости, а часть — на преодоление упругости. При таких условиях оказывается вполне возможным принципиально объединить эти два свойства — упругость на сдвиг и вязкость.

Согласно закону Гука, упругая деформация прямо пропорциональна силе; с другой стороны, согласно закону Ньютона, скорость вязкого течения прямо пропорциональна силе. Однако вполне можно себе представить, что эти два свойства тела, характеризующие его деформирование, могут объединиться вместе. Тогда одна и та же сила может вызвать одновременно необратимое вязкое течение, при котором форма тела не восстанавливается, и обратимую упругую деформацию, при которой форма тела восстанавливается при устранении силы.

Предыдущие соображения можно пояснить рассмотрением электрических свойств среды, содержащей ионы. Возьмем в качестве примера водный раствор электролита и сосредоточим свое внимание на каком-либо положительно заряженном ионе, окруженном молекулами воды.

При отсутствии внешних сил движение этого иона происходит беспорядочным образом, т. е. ион постепенно перемещается, совершая некоторое число колебаний около каждого (временного) положения равновесия.

Как изменится это беспорядочное движение в том случае, если мы приложим электрическое поле, направленное вправо? Это поле не действует на окружающие ион нейтральные молекулы воды, но тянет ион направо. Однако до тех пор, пока ион совершает малые колебания вокруг одного и того же положения равновесия, поле может вызвать только незначительное смещение этого положения. Иначе говоря, при наличии поля ион будет колебаться вокруг точки, слегка смещенной направо; при этом точка равновесия сместится на расстояние, пропорциональное полю. Если бы ион был навсегда привязан к одному положению равновесия, то при большом числе ионов влияние поля сводилось бы к электрической поляризации среды. Но ионы не колеблются вокруг одного и того же положения. Независимо от действия поля, ион, поколебавшись некоторое время, срывается из исходного положения и переходит в другое, или же окружающие молекулы образуют дырку, в которую он может свободно войти.

При отсутствии электрического поля он имеет равные шансы переместиться в любую сторону, но в присутствии электрического поля шансы его переместиться в направлении поля будут несколько больше, чем шансы переместиться в противоположном направлении. Поле может влиять на характер перемещения только в процессе перемещения; оно действует на ион *in statu movendi*, вызывая перемещение его в своем направлении.

Если при отсутствии поля среднее перемещение иона равнялось нулю, то в присутствии поля все положительные ионы будут перемещаться преимущественно в направлении поля, а отрицательные — в противоположном направлении. Следовательно, поле вызывает электрический ток.

Таким образом, одно и то же поле может вызвать два эффекта: один — статический, который заключается в диэлектрической поляризации среды, другой — кинетический, связанный с возникновением электрического тока. Эти два свойства осуществляются в одном и том же теле одними и теми же ионами благодаря двойственному характеру их поведения под действием поля: благодаря тому, что они упруго смещаются из своего положения равновесия, поскольку последнее остается неизменным, а также вследствие того, что при изменении этого поло-



жения они перемещаются под действием поля преимущественно в сторону создаваемой им силы.

Совершенно аналогично можно понять возможность сочетания у одного и того же тела упругости на сдвиг, характеризующей идеальные твердые тела по представлению Гука, и текучести, характеризующей жидкости. При этом в обычных условиях одно из этих свойств маскирует другое: либо текучесть маскируется упругостью на сдвиг (например, в твердом стекле), либо упругость на сдвиг маскируется текучестью (например, в жидкой воде).

Однако жидкая вода и твердое стекло по существу эквивалентны друг другу и способны испытывать одновременно упругую деформацию и течь.

Фактором, определяющим интенсивность проявления упругих или вязких свойств аморфного тела, является время оседлой жизни, о которой говорилось выше.

Если переменное электрическое поле действует в одном направлении в течение промежутка времени, который мал по сравнению с временем оседлой жизни иона, тогда поле оказывает следующее действие: оно периодически смещает положение равновесия иона, не создавая тока, или, вернее, создавая поляризацию, колеблющуюся в одной фазе с полем.

Но если поле действует в одном направлении в течение длительного времени по отношению ко времени оседлой жизни (именно это время является эталоном), тогда оно успевает повлиять на направления перемещения ионов и создает электрический ток, образованный преимущественным движением («течением») этих ионов со средней скоростью, пропорциональной полю.

Следовательно, если время действия поля в одном и том же направлении  $t$  мало по сравнению со временем оседлой жизни  $\tau$ , то тело ведет себя как «электрически твердое» (диэлектрик); если же это время велико, то тело ведет себя как «электрически жидкое» (проводник).

Так же обстоит дело и в отношении механических свойств. Если тело подвергать усилию скальвующего типа в течение времени, которое мало по сравнению со временем оседлой жизни частиц этого тела, то тогда это усилие вызывает только упругую деформацию (сдвиг); если же оно действует в течение времени, которое велико по сравнению со временем оседлой жизни частиц, тело успевает потечь.

Что представляет собой время  $\tau$  по сравнению с обычными единицами времени, которые мы определяем секундой, сутками или столетием в зависимости от характера рассматриваемого процесса? В случае воды время оседлой жизни  $\tau$  составляет  $10^{-11}$  сек., поэтому, наблюдая ее в течение одной секунды, мы практически не можем обнаружить ее твердость, хотя знаем, что жидкость обладает твердостью.

В случае стекла время релаксации может быть порядка столетия; при таких условиях секунда — очень короткий промежуток времени, и за это время тело не обнаружит никаких изменений в своей форме. Однако те же самые тела, которые мы называем твердыми, обнаруживают свое течение за геологические периоды.

Следовательно, тело может быть и жидким и твердым, и только от масштаба времени зависит наше восприятие тех или других его проявлений или свойств.

Приведем интересный геофизический пример, иллюстрирующий это положение. Мы знаем, что земной шар состоит из силикатной оболочки толщиной порядка трех с половиной тысяч километров и внутреннего ядра радиусом порядка трех тысяч километров. Это расслоение недр Земли на силикатную оболочку и металлическое ядро установлено путем изучения землетрясений, распространяющихся в виде продольных и поперечных волн.

Раньше считали, что температура быстро возрастает с глубиной, достигая на глубине 100 км нескольких тысяч градусов. Следовательно, все вещества, находящиеся глубже 100 км, должны быть полностью расплавлены. Таким образом, предполагали, что Земля прикрыта тонкой твердой корой, под которой находится расплавленная масса (магма).

Однако, если бы это было так, то через наружную оболочку Земли толщиной в 3500 км не могли бы распространяться поперечные упругие волны, являющиеся волнами сдвига. Они могут распространяться только при наличии упругости на сдвиг, характеризующей твердые тела.

Изучение землетрясений показывает, что поперечные волны распространяются до глубины в 3500 км. Какое-нибудь возникшее у поверхности Земли нарушение равновесия дает пучок сейсмических лучей, которые распространяются по искривленным линиям. При этом поперечные

волны оказываются способными распространяться через толщу Земли до глубины 3500 км так, как если бы она была твердой; на этой глубине наблюдается внезапный обрыв в распространении поперечных волн. Дальше, в глубь земного шара, могут распространяться только продольные волны.

Это объясняется тем, что силикатные массы, образующие наружную оболочку Земли глубиной в 3500 км, обладают громадной вязкостью, т. е. малой текучестью, причем текучесть их резко понижается с повышением давления. Для них время релаксации очень велико по сравнению с периодом колебаний сейсмических волн. Время оседлой жизни частиц этих пород весьма значительно. Поэтому, хотя они жидкие, вернее, аморфные, как жидкости, они упруги, как твердые тела.

Внутренняя часть, образованная металлическим ядром, и не способная пропускать поперечные колебания, отличается сравнительно малой величиной времени оседлой жизни атомов (порядка  $10^{-10}$  сек.).\*

Вот почему поперечные волны, имеющие период колебаний, равный многим минутам, через это ядро распространяться не могут.

Что касается температуры ядра, то она почти не повышается и в центре Земли вряд ли намного превышает  $3000^{\circ}\text{C}$ .

Аморфные тела мы не вправе рассматривать как твердые или как жидкие: они являются твердо-жидкими, или вязко-упругими, обладая одновременно упругостью на сдвиг и текучестью. Аморфное состояние вещества при низких температурах не является равновесным, при достаточно низкой температуре все тела стремятся перейти в кристаллическое состояние, и подлинно равновесным твердым состоянием является именно кристаллическое.

Почему не все твердые тела успевают закристаллизоваться при охлаждении, будет видно из дальнейшего.

Выше отмечалось, что для структуры твердых тел характерно в среднем правильное расположение атомов

---

\* Кратковременность оседлой жизни атомов металла и слабая зависимость его как от температуры, так и от давления обуславливают незначительную вязкость металлов, близкую к вязкости воды, и малую ее зависимость как от температуры, так и от давления

в виде некоторой кристаллической решетки. Это расположение мы иллюстрировали расположением торцовых плиток на полу или мостовой.

В жидкости мы этой правильности не находим; здесь число соседей у каждой частицы может несколько меняться.

Поэтому если рассматривать частицы жидкости на значительном расстоянии, то никакой корреляции между их положениями не обнаружится, тогда как в расположении ближайших соседей мы обнаруживаем порядок такого же типа, какой встречается в случае кристалла, но только менее резко выраженный. Незначительные отступления от порядка, возникающие в ближайшем окружении данной частицы, складываясь с теми, которые встречаются при переходе к следующим частицам, приводят к полной ликвидации порядка на более или менее значительных расстояниях. Однако мы находим здесь следы того же порядка, который характеризует кристаллическое тело.

Эти два типа порядка принято именовать «ближним порядком» и «дальним порядком», т. е. порядком на малых и больших расстояниях. В жидкостях существует только ближний порядок; он не идеальный и поэтому не оставляет никакого следа на дальних расстояниях. В кристаллических же телах мы имеем дальний порядок, т. е. идеальный ближний порядок, который простирается в виде дальнего порядка на любое расстояние.

Однако существенно то, что на ближних расстояниях в жидкостях мы встречаем порядок того же типа, как и в кристаллических телах. Если в кристаллическом теле атомы располагаются как дробинки одинаковой величины, подвергнутые всестороннему сжатию и окруженные 12 соседями, то подобное расположение мы встречаем и в жидкости. Если во льду каждая молекула окружена 4 молекулами, то и в жидкой воде мы наблюдаем аналогичное расположение.

Жидкость похожа на беспорядочную толпу, в то время как кристалл похож на стройный ряд солдат; однако между толпой и рядами солдат имеется некоторое сходство. Если вы посмотрите, как окружены люди, стоящие в толпе, то число соседей у каждого человека в среднем оказывается таким же, как и в стройных рядах.

Отсутствие дальнего порядка в жидкостях приводит к некоторым существенным особенностям в их поведении

по сравнению с кристаллами. Например, при течении жидкости под влиянием скальвающих сил наблюдается быстрое увеличение скорости течения при повышении температуры. Объясняется это тем, что молекулы жидкости независимо друг от друга проскакивают из одного положения в другое и притом тем быстрее, чем короче среднее время их оседлой жизни, т. е. чем выше температура.

Если в толстом (горизонтальном) слое жидкости потянуть верхние ряды частиц направо, то некоторые частицы время от времени будут перескакивать преимущественно направо. Средняя картина дает представление о непрерывном увеличении скорости по мере приближения кверху, с нижнего края, где жидкость считается находящейся в состоянии покоя. Однако в действительности движение каждого слоя жидкости значительно сложнее. Под влиянием внешней силы то одна, то другая частица перескакивает со своего места в соседнее, преимущественно направо. Все эти движения совершаются индивидуально, анархически, независимо друг от друга.

В твердых кристаллических телах, где атомы расположены совершенно правильными рядами, возможен иной тип перемещения — не дезорганизованный, который характеризует толпу, а упорядоченный, который могут совершать правильно построенные солдаты.

При этом атомы могут перемещаться организованно, целыми рядами или целыми слоями, путем соскальзывания верхних слоев по отношению к нижним и т. д. Такое соскальзывание атомов образует пластическую деформацию кристаллов. Эта пластическая деформация представляет собой явление течения кристаллов, совершенно отличное по своему характеру от течения жидкости, что явствует, между прочим, из его температурной зависимости. При понижении температуры вязкое течение жидкости практически прекращается, тогда как пластическая деформация кристаллов может в принципе происходить и при каких угодно низких температурах. Эта деформация представляет собой явление атермическое, могущее развиваться в принципе даже при температуре, равной абсолютному нулю. Фактически, однако, дело происходит иначе. Некоторые атомы выскакивают из своих положений в междоузлия, правильность структуры кристалла нарушается, в результате движение сразу застопоривается.

Чтобы ликвидировать это нарушение, надо восстановить правильную структуру кристаллической решетки. Это сводится к тому, что некоторые атомы, покинувшие правильные положения, должны в них вернуться. Подобное возвращение происходит тем быстрее, чем выше температура. Этим объясняется то обстоятельство, что повышение температуры фактически способствует пластической деформации.

### III

Перейдем к вопросу о том, каким образом происходит превращение твердого кристаллического тела в жидкое и обратно, т. е. как происходит плавление и кристаллизация. Заметим, что под плавлением следует подразумевать переход не из твердого состояния в жидкое, а из кристаллического в аморфное, причем тело в аморфном состоянии может оставаться таким же твердым, каким оно было в кристаллическом состоянии, и даже более твердым, потому что в кристаллическом состоянии была возможна пластическая деформация, тогда как в аморфном состоянии возможно лишь вязкое течение.

Поэтому то состояние (кристаллическое), которое мы называем твердым, может оказаться текучим, а жидкое (аморфное) может оказаться твердым. Это наблюдается тогда, когда процесс аморфизации осуществляется при низких температурах, т. е. когда аморфное тело характеризуется сравнительно длительной оседлой жизнью своих частиц. Обычно, впрочем, при плавлении наблюдается переход из состояния твердого в состояние жидкое.

Каким образом происходит этот переход? Характерной чертой этого (и обратного ему) перехода, так же как перехода из газообразного состояния в жидкое и обратно, является его прерывный характер. Кристаллизация тела наступает внезапно при его охлаждении так же, как плавление происходит внезапно при нагревании; аналогичным образом конденсация пара наступает внезапно при его охлаждении, а кипение жидкости — внезапно при нагревании.

Внезапность перехода жидкой фазы в газообразную (и обратно) была объяснена Ван-дер-Ваальсом как результат неустойчивости промежуточных состояний, мыслимых, но неосуществимых. Согласно Ван-дер-Ваальсу, изотермы реального газа, т. е. кривые, связывающие его

давление с объемом при постоянной температуре, имеют следующий вид (рис. 6).

При этом они включают участки, где давление не убывает с увеличением объема, а, наоборот, возрастает, т. е. сжимаемость вещества является отрицательной. Это объясняется наличием сил сцепления, которые помогут сжимать тело, причем приходится уменьшать давление, чтобы препятствовать сближению частиц.

Реальный переход из жидкого состояния в газообразное происходит не по теоретической изотерме, а по изотерме, представляемой горизонтальной линией (штриховая линия на рис. 6).

Состояния, не только характеризующиеся отрицательной сжимаемостью, но и примыкающие к ним, оказываются в термодинамическом отношении неустойчивыми.

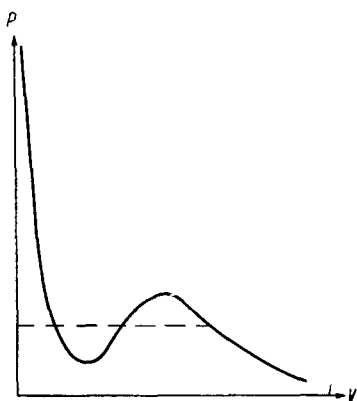


Рис. 6.

Переход из жидкого состояния в кристаллическое или из кристаллического в жидкое аналогичным образом можно свести к неустойчивости промежуточных состояний, которые соответствуют некоторым промежуточным значениям расстояния между атомами. При повышении температуры расстояние между атомами увеличивается. Можно показать, что некоторые промежуточные значения этого расстояния соответствуют неустойчивости решетки.

Рассмотрим с этой целью давление атома кристаллической решетки, обусловленное его тепловыми колебаниями. Если бы эти колебания имели симметричный характер, то никакого теплового расширения или давления они бы не вызывали. В действительности, однако, тепловые колебания атомов несимметричны. Взаимная потенциальная энергия атомов  $A$  (неподвижного) и  $B$  как функция расстояния между ними имеет следующий вид (рис. 7).

Если рассматривать смещение атома с данной энергией (штриховая горизонтальная линия), то окажется следующее: когда атом  $B$  колеблется около своего положения равновесия  $O$ , то он при движении вправо уда-

ляется больше от соседнего атома, нежели приближается к нему при движении влево. Это приводит к тому, что по мере увеличения энергии колебаний увеличивается среднее расстояние между атомами  $A$  и  $B$ . Этот результат эквивалентен тому, что асимметричность колебаний приводит к возникновению давления, оказываемого каждым

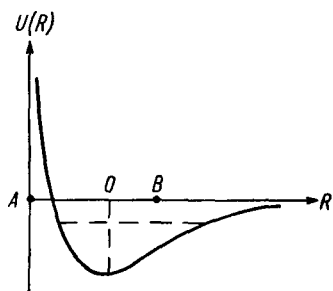


Рис. 7

атомом твердого тела на своих соседей. Если вычертить кривую давления как функцию объема для кристаллической решетки, то получается кривая типа кривой Ван-дер-Ваальса, которая показывает, что решетка в некотором интервале объемов является неустойчивой.

Интервал неустойчивых положений перекрывается процессом плавления, при котором промежуточные состояния исчезают и мы наблюдаем только крайние состояния. Это

можно пояснить следующим образом.

Мы можем представить себе твердое тело в виде трехатомной модели; крайние атомы  $A$  и  $C$  неподвижны, а средний  $B$  может колебаться вдоль соединяющей их прямой (рис. 8). Обычно предполагают, что среднее положение атома  $B$  устойчиво, если он находится в центре прямой  $AC$ . Это верно, пока расстояние  $AC$  достаточно мало. Тогда потенциальная энергия среднего атома, которая складывается из потенциальной энергии его по отношению к обоим крайним, имеет минимум в центре (рис. 9), и это центральное положение является равновесным. Около этого положения атом может совершать малые колебания. Но если мы удалим  $A$  и  $C$  друг от друга на достаточно большое расстояние, то кривая потенциальной энергии атома  $B$  по отношению к обоим соседям, сводящаяся к сумме двух кривых для каждого из них в отдельности (рис. 7), в центре отрезка  $AC$  будем иметь не минимум, а, наоборот, максимум (рис. 10). При таких условиях центральный атом стремится отойти к одному из крайних, а не располагаться посередине между ними.

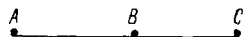


Рис. 8.



Следовательно, существует предельное расстояние между двумя атомами, при котором правильное расположение третьего атома между ними является невыгодным, неустойчивым.

При нагревании кристалл расширяется, и расстояние между атомами приближается к критическому значению, при котором кристаллическая решетка рушится. Однако на самом деле решетка разрушается при еще несколько меньших объемах. Дело в том, что атомы решетки могут смещаться из своих равновесных положений на расстояния, значительно большие среднего. Каждый раз, когда край-

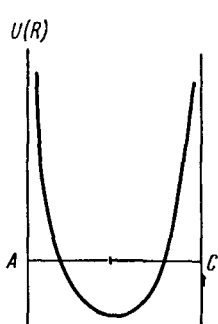


Рис. 9

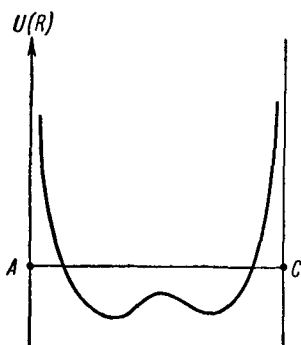


Рис. 10.

ние атомы  $A$  и  $C$  разойдутся в стороны достаточно далеко, средний атом теряет устойчивость и стремится отойти к одному из них. В кристалле происходят все время локальные разрывы благодаря тому, что атомы отходят друг от друга на слишком большие расстояния. Однако эти локальные и кратковременные разрывы не ведут к разрыву трехмерного тела как целого, а только к ликвидации дальнего порядка в расположении атомов, т. е. к плавлению.

Вот почему в жидкости частицы не имеют правильных положений равновесия. При этом причиной плавления может служить не только повышение температуры, но и увеличение объема. Мы рассматриваем плавление как результат нагревания, но его можно вызвать столь же успешно растяжением тела, подобно тому как вскипание воды можно вызвать не нагреванием, а понижением давления окружающего воздуха.

Обычно полагают, что при температурах, превышающих критическую, тело может существовать только в газообразном состоянии. Это неверно. При температуре выше критической исчезает различие между двумя разновидностями аморфного состояния, а именно, газообразным и жидким; однако различие между аморфным и кристаллическим состояниями остается в силе и при сверхкритических температурах. Для некоторых тел, у которых критическая температура невысока, это удалось установить экспериментально. Ясно, что при таких сверхкритических температурах можно обеспечить кристаллическое состояние лишь приложением большого внешнего давления. Поэтому тело, находящееся в кристаллическом состоянии, при сверхкритической температуре не может считаться твердым в обычном смысле слова. При снятии давления оно немедленно испаряется.

#### IV

В заключение остановимся вкратце на кинетике перехода из жидкого состояния в кристаллическое. Температура кристаллизации обычно определяется как температура, при которой тело переходит из жидкого состояния в кристаллическое; в действительности температура кристаллизации определяется как температура, при которой жидкая фаза может находиться в равновесии с кристаллической. Для перехода тела из жидкого состояния в кристаллическое необходимо, чтобы температура была несколько ниже температуры кристаллизации, т. е. чтобы равновесия не существовало. Чем ниже температура жидкости по сравнению с температурой кристаллизации, тем быстрее развивается кристаллизационный процесс. То же самое имеет место при конденсации пара. Пар начинает конденсироваться не в тот момент, когда температура его равна температуре конденсации, а когда она несколько ниже, причем скорость процесса возрастает при понижении температуры.

Если откладывать на оси ординат величину  $v$ , измеряющую скорость конденсации, а на оси абсцисс — температуру, то мы получим кривую, которая начинается в точке кристаллизации  $T$ , причем в этой точке  $v$  равно нулю, монотонно возрастая по мере перехода к более

близким температурам (рис. 11). В случае же кристаллизации жидкости скорость этого процесса при понижении температуры сначала возрастает, проходит через максимум и затем снова обращается в нуль (рис. 12).

Чем объясняется это своеобразное отличие кривой конденсации пара от кривой кристаллизации жидкости?

Объясняется оно следующим образом. Кристаллизация жидкости, так же как конденсация пара, осуществляется путем предварительного образования и роста зародыша новой фазы (жидкой или кристаллической), причем это образование новой фазы в лоне исходной

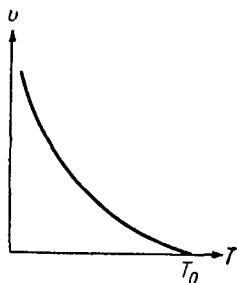


Рис. 11.

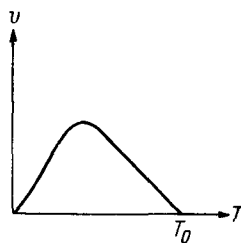


Рис. 12.

фазы имеет место еще до достижения соответствующего температурного равновесия. Выше температуры конденсации пара или кристаллизации жидкости существуют небольшие комплексы, которые можно в паре сравнить с капельками, а в жидкости — с маленькими кристалликами.

Образование кристалликов в жидкости выше температуры кристаллизации невыгодно. Поэтому число таких кристалликов мало и чрезвычайно быстро уменьшается с увеличением их размеров, так же как число капелек жидкости в ненасыщенном паре. Такие капельки или кристаллики, которые являются зародышами грядущей фазы, существуют лишь в виде нежизнеспособных зародышей. При понижении температуры ниже точки кристаллизации кристаллические зародыши становятся жизнеспособными, число их начинает возрастать с увеличением их размера, появляется явно выраженная тенденция к кристаллизации. Эта тенденция характеризуется возра-

станием кривой скорости кристаллизации с понижением температуры.

Почему же в случае кристаллизации наблюдается спад этой кривой при дальнейшем охлаждении, в то время как в случае конденсации пара подобное спадание отсутствует?

Для того чтобы некоторое число частиц жидкости могло образовать кристалл или чтобы одна частица жидкости могла присоединиться к растущему кристаллу, эта частица должна сначала отделиться от окружающих частиц жидкости. На это надо сначала затратить некоторую энергию, которая затем возвращается обратно с добавкой, равной скрытой теплоте плавления.

Другими словами, рассматриваемая частица должна сначала испариться из жидкой фазы, а затем лишь перейти в кристаллическую. Так как новое окружение соответствует более плотному состоянию, то на втором этапе выделяется больше энергии, чем затрачивается на первом этапе. Однако скорость процесса определяется именно первым этапом, т. е. отрывом частицы жидкости от своих соседей.

Вероятность таких отрывов при понижении температуры уменьшается по формуле  $e^{-U/kT}$ , где  $U$  — энергия активации, которая характеризует зависимость вязкости жидкости от температуры. Поэтому при понижении температуры первая стадия процесса начинает затормаживать вторую стадию. Процесс все более замедляется, и при достаточно низких температурах весь процесс кристаллизации замирает.

Аналогичным образом характеризуется зависимость от температуры в других процессах этого типа, например, в процессе выделения какой-либо фазы в твердом растворе (карбид в чугуне). Это — общее явление для всех процессов в твердой и жидкой фазе. Оно отсутствует только в газе, частицы которого не должны затрачивать энергию, чтоб отделиться друг от друга, так как такое пространственное разделение как раз и характерно для газовой фазы. Поэтому процесс конденсации монотонно ускоряется при понижении температуры, в то время как процесс кристаллизации сначала ускоряется, а потом замедляется. Этим объясняется возможность получения различных тел в твердом, но аморфном состоянии, кото-

рое часто называют переохлажденным жидким состоянием. По своим механическим характеристикам эти тела не являются жидкими, но по структуре они аморфны. Если какая-нибудь жидкость охлаждается достаточно быстро, она не успевает полностью закристаллизоваться, особенно если оптимальная скорость, соответствующая максимуму на кривой рис. 12, мала. Охладив тело ниже этой температуры, можно закалить его в той аморфной структуре, которую оно имело при более высокой температуре. В принципе аморфное тело может закристаллизоваться при любой температуре, но практически при слишком низких температурах на это могут потребоваться миллионы лет. Для того чтобы закристаллизовать стекло, надо нагреть его до оптимальной температуры на более или менее значительное время. Для металлов оптимальная температура очень близка к абсолютному нулю, и переохладить металл в аморфном состоянии оказывается невозможным.

Современной технике доступны чрезвычайно большие скорости нагревания, до одного биллиона градусов в секунду; охлаждать же тело с такой скоростью невозможно. Этот медленный темп охлаждения, который характеризует современную технику, лимитирует возможность получения различных тел в аморфном состоянии.

Тем не менее в принципе любое тело может быть получено как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии. При этом кристаллическое состояние является термодинамически равновесным, а аморфное — лишь закаленным.

## ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СТРУЮ ЖИДКОСТИ

### ВВЕДЕНИЕ

**В** 1879 г. Рэлей впервые заметил, что дробление струи водяного фонтана уменьшается под влиянием электростатических сил.\* Он, однако, не исследовал достаточно детально этого явления и не предложил удовлетворительной теории для его объяснения. Более поздние исследования также не привели к существенному успеху в понимании его природы; однако они установили, что стабилизирующее действие электрического поля на струю жидкости, замеченное Рэлеем, имеет место лишь в случае слабых полей, тогда как сильные электрические поля вызывают обратное действие, т. е. повышенное дробление струи.

Описанные ниже опыты подтвердили и уточнили эти результаты. С их помощью удалось выяснить также ряд существенных деталей, которые, насколько нам известно, не были отмечены ранее и которые позволяют дать достаточно полное, хотя только качественное, а не количественное объяснение эффекта Рэлея.

### ОПЫТЫ С ВОДЯНЫМ ФОНТАНОМ

Наши опыты велись над тонкой струей воды строго вертикального направления (вверх) в параллельном ей, т. е. вертикальном, электрическом поле. Последнее созда-

---

\* J. R a y l e i g h, Proc. Roy. Soc., 28, 406, 1879.

валось при помощи двух горизонтальных жестяных дисков диаметром в 135 мм, в центре которых вырезались круглые отверстия диаметром 40 мм и которые присоединялись к противоположным полюсам маленькой электростатической машины. Мы пытались также исследовать действие на струю поперечного горизонтального поля. Однако незначительная асимметрия в установке струи по отношению к электродам приводила к резко выраженному притяжению ее к одному из них (более близкому); поэтому мы ограничились исследованием действия продольного вертикального поля, которое не усложняет изучаемые явления посторонними обстоятельствами.

Наша установка чрезвычайно проста (рис. 13). Она состоит из стеклянного сосуда с боковым отверстием для вытекания жидкости, откуда вода подводится посредством резинового шланга к соплу, заканчивающемуся отверстием ( $\varnothing = 0.8$  мм). Electroды присоединялись к противоположным полюсам маленькой электростатической машины, приводимой во вращение рукой. Минимальное напряжение, которое удавалось получить при медленном вращении ручки (по измерениям с электростатическим вольтметром), составляло 2500 в. Максимальное напряжение на полюсах машины достигало  $3 \cdot 10^4$  в. Расстояние между местом вытекания жидкости из сосуда до отверстия сопла было 45 см. Высота струи колебалась в пределах от 20 до 25 см в зависимости от диаметра резинового шланга и от напора. Ширина разбрызгивания верхней части струи в отсутствие электрического поля колебалась от 5 до 8 см, высота же струи от места вытекания воды из сопла до начала разбрызгивания составляла около 13 см (в зависимости от напора).

Нижний электрод устанавливался ниже начала дробления струи на капли, верхний же электрод — значительно выше.

При включении поля напряженностью в 125 в/см наблюдается своеобразное периодическое «приседание» струи. На конце струи образуется небольшая капля, размеры которой постепенно увеличиваются, и затем капля оседает вместе со струей. В конце концов капля стекает по стержню струи, после чего последняя поднимается до исходного уровня, и явление повторяется вновь; при этом оно не зависит от знака напряжения, подаваемого на электроды.

Рассматриваемое явление объясняется, очевидно, стабилизацией струи под влиянием электрического поля, т. е. уменьшением разбрызгивания, в результате которого на вершине струи возникает постепенно растущая капля (рис. 14).

При увеличении напряженности поля выше  $E = 125$  в/см происходит не стабилизация струи, а усиленное разбрызгивание ее, причем высота, на которой начинается дробление струи, резко понижается до 8 см, а ширина разбрызгивания значительно увеличивается

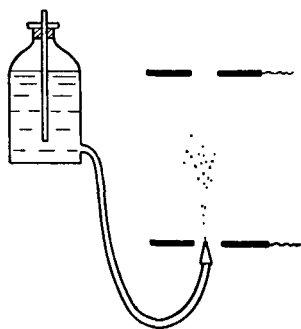


Рис. 13.

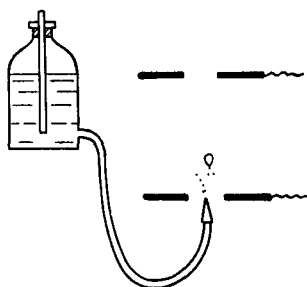


Рис. 14.

(до 25 см, т. е. примерно в пять раз); размеры капель оказываются гораздо меньшими, чем в отсутствие поля. В этом случае начало дробления струи понижается с 10 до 3 см, считая от конца отверстия сопла. Никакой зависимости от знака подаваемого напряжения не наблюдалось. Естественно предполагать, что разбрызгивание обусловлено электрическими силами отталкивания между одноименно заряженными каплями.

Для определения знака их заряда была собрана установка, состоящая из электрометра Вульфа, соединенного с цилиндрическим сосудом, в который попадали отдельные капли воды. В результате было установлено, что знак разряда капель совпадает со знаком заряда нижней пластинки.

#### ОПЫТЫ С НЕПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ И С РАЗБАВЛЕННЫМ РАСТВОРОМ ЕДКОГО КАЛИ

Чтобы выяснить влияние электрического поля на разбрызгивание непроводящей жидкости, были поставлены опыты с трансформаторным маслом. Большая вязкость



масла по сравнению с водой препятствовала свободному вытеканию струи; вследствие этого необходимо было создавать некоторое давление в сосуде при помощи воздушного насоса. Опыты показали, что наблюдаемое явление «приседания» струи воды при слабом электрическом поле у трансформаторного масла совсем отсутствует. Разбрызгивание струи масла под действием сильного электрического поля наблюдается в очень слабой форме. Таким образом, разбрызгивание жидкостей существенным образом зависит от их электропроводности.

Кроме воды и трансформаторного масла, применялся слабый водный раствор едкого кали. Явление «приседания» струи в этом случае получилось таким же, как и с чистой водой, разбрызгивание же проявлялось гораздо резче, чем при водяной струе.

#### МЕХАНИЗМ СТАБИЛИЗАЦИИ СТРУИ В СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Описанные опыты показывают, что стабилизации струи жидкости под влиянием слабого электрического поля не связана с поверхностными свойствами этой жидкости (с ее поверхностным натяжением или электрокапиллярными эффектами), но обусловлена исключительно ее электропроводностью. Значит, причину этой стабилизации следует искать в явлениях электрической индукции, вызываемой полем в проводящей струе. Индукция, очевидно, должна сводиться к электризации верхнего и нижнего концов струи, причем по знаку эти заряды должны быть противоположны зарядам соответствующих электродов.

В отсутствие электрического поля дроблению тонкой струи предшествует как известно, образование ряда сжатий (рис. 15); постепенное увеличение этих сжатий приводит к распаду верхнего конца струи на отдельные капли.

При наличии относительно слабого электрического поля положение осложняется электрическими силами притяжения, возникающими между соседними звеньями образующейся цепочки капель до ее распада и препятствующими распаду. Эти силы притяжения обусловлены продольной поляризацией обособляющихся капель; сила притяжения, испытываемая одной из них (например, крайней) со стороны предыдущей, равна  $\frac{6p^2}{r^4}$  ( $p$  — электриче-

ский момент капли, равный произведению напряженности внешнего электрического поля  $E_0$ , в котором находится струя, на куб радиуса капли  $a$ ;  $r$  — расстояние между центрами соседних капель). Полагая приближенно  $r = 2a$ , получаем

$$\frac{6p^2}{r^4} \approx \frac{3}{8} \frac{a^6 E_0^2}{a^4} \approx a^2 E_0^2.$$

При  $a = 2$  мм и  $E_0 = 1000$  в/см = 30 CGSE рассматриваемая сила составляет около 1 дин. Несмотря на свою малость, она все же может иметь существенное значение для стабилизации струи, препятствуя разрыву последней на отдельные капли. В результате на верхнем конце струи должна нарастать крупная капля, которая, давя своей тяжестью на струю, вызывает постепенное снижение ее. Этим, как уже упоминалось выше, объясняется явление пульсации струи в электрическом поле. Период этой пульсации  $\tau$  может быть вычислен путем приравнивания веса макрокапли, нарастающей на конце струи за время  $\tau$ , гидростатическому давлению, которое поддерживает ее уровень при отсутствии макрокапли на высоте  $h$ . Если при этом не учитывать сил трения, испытываемых макрокаплей при стекании ее вниз вдоль струи, движущейся вверх, то

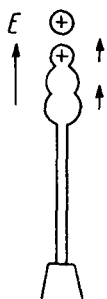


Рис. 15.

$$\tau = \left( \frac{h}{2g} \right)^{1/2},$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести. При  $h = 10$  см это выражение дает  $\tau = 0.1$  сек., тогда как на опыте  $\tau$  имеет порядок 1 сек. Такое расхождение объясняется, по всей вероятности, действием упомянутых сил трения.

#### ПУЛЬВЕРИЗАЦИЯ СТРУИ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

Пульверизирующее действие, оказываемое на струю сильным электрическим полем, объясняется тем обстоятельством, что при достаточно большом электрическом заряде верхней капли последняя утрачивает устойчивость, т. е. приобретает стремление к делению на более мелкие. Этой потерей устойчивости проводящей жидкости под влиянием сильного электрического поля объясняется фон-

танирование ртутного электрода в сильных электрических полях,\* а также деление тяжелых атомных ядер, обладающих большим электрическим зарядом. В последнем случае потеря устойчивости определяется тем условием, что отношение электрической энергии к удвоенной поверхностной энергии капли оказывается равным 2.\*\* Грубо говоря, это условие эквивалентно равенству поверхностного давления  $\frac{2\sigma}{r}$  (где  $\sigma$  — поверхностное натяжение) электрическому давлению  $\frac{E^2}{8\pi}$ , т. е. сводится к равенству

$$E = 4\left(\frac{\pi\sigma}{r}\right)^{1/2}.$$

Это равенство подтверждается рядом экспериментальных данных относительно деформаций, испытываемых капельками воды, особенно падающими в сильном электрическом поле.\*\*\*

Поле  $E$  у поверхности капли, венчающей струю воды, не следует отождествлять со средним полем  $E_0$ , в котором находится струя. Нетрудно показать, что при высоте ее, равной  $h$ ,  $E = \frac{E_0 h}{a}$  ( $a$  — радиус капли). Таким образом, при  $h = 10$  см и  $a = 0.2$  см  $E$  примерно в 20 раз больше  $E_0$ . При таких условиях  $E$  может достигать критического значения, определяемого предыдущей формулой, задолго до того, как  $E_0$  достигнет этого значения. Так, например, полагая  $\sigma = 10^2$  и  $a = 2 \cdot 10^{-1}$  см, получаем  $E = 160 \text{ CGSE} \approx 50\,000$  в/см, что соответствует  $E_0 = 2000$  в/см. Последнее значение близко к тому, при котором, согласно нашим опытам, фактически начинается пульверизация струи. Как уже отмечалось, капельки, на которые она распыляется, имеют заряд того же знака, что и нижний электрод. Приведенное объяснение согласуется также с тем фактом, что в случае непроводящей жидкости (масла) явление пульверизации струи практически не наблюдается, равным образом как и явление стабилизации ее в слабых полях.

\* Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 6, 347, 1936; L. Tonks, Phys. Rev., 48, 562, 1935.

\*\* Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 9, 641, 1939.

\*\*\* Я. И. Френкель, Тр. Главной геофизической обсерватории, № 03, 9, 44, 1948.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ ШАРИКОВ В ПОДШИПНИКАХ КАПЛЯМИ

**Ш**арикоподшипники являются одной из важнейших деталей всякого рода машин и приборов. При этом самые маленькие шарики для подшипников имеют диаметры порядка 1 мм и допуски порядка 0.1 мк. Изготовление таких миниатюрных деталей требует более чем ювелирной точности.

В настоящей заметке я хочу высказать мысль о том, как можно обойти эту трудность, если перейти от твердых шариков к жидким каплям какого-либо вещества, не смачивающего трущиеся поверхности.

Теоретические соображения, высказанные мною ранее\* и подкрепленные непосредственными опытами,\*\* показали, что скатывание жидких капель по наклонной твердой поверхности имеет такой же характер, как и скатывание твердых шариков. При этом некоторое сплющивание капли под влиянием собственной тяжести несколько не мешает ее скатыванию, а, наоборот, обеспечивает его возможность, тогда как при замерзании подобной сплющенной капли ее движение прекратилось бы. Самый механизм этого движения заключается в переливании капли сзади (и сверху) вперед (и вниз).

Аналогичные эффекты были обнаружены в результате наших опытов (в полном согласии с теоретическими соображениями) и при движении жидких капель, зажатых

---

\* Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 18, 659, 1948.

\*\* Я. И. Френкель и Я. Б. Арон, ЖЭТФ, 19, 809, 1949.



*Я. И. Френкель. 1950 г. Рисунок худ. Ю. Л. Катца.*

между параллельными поверхностями, которые ими не смачиваются. Оказалось, что в случае движения одной из пластинок (например, верхней) по отношению к другой, центры зажатых между ними капелек движутся с вдвое меньшей скоростью т. е. с помощью механизма «тракторной гусеницы». Этот тип движения наблюдается в случае капелек ртути даже при сильном расплющивании. При этом радиус диска растет пропорционально корню четвертой степени из расплющивающейся силы, т. е. сравнительно медленно. Замечательно то обстоятельство, что даже в предельно расплющенном состоянии капля ведет себя как шарико- или роликоподшипник. Само собой ра-

зумеется, что внутреннее трение в расплющенной капле имеет такую же величину, как если бы она заполняла весь зазор между пластинками.

Если, однако, для таких каплеподшипников пользоваться жидкостью с малой вязкостью (например, ртутью или сплавом Вуда в жидком состоянии), то эффект, т. е. понижение силы трения между твердыми поверхностями, оказывается выраженным в очень сильной степени.

Это обстоятельство ставит вопрос о применении каплеподшипников из плохо смачивающей жидкости вместо обычных шарикоподшипников в разряд практически возможных, особенно в том случае, когда силы, прижимающие друг к другу трущиеся твердые поверхности, не слишком велики. Это условие выполняется во многих точных приборах, вроде, например, гироскопов, к которым было бы целесообразным применить новый принцип «смазки». Разбрызгивание маленьких капель при быстром вращении (линейная скорость в этом случае равна половине линейной скорости относительно движения втулки в подшипнике) на еще более мелкие должно при этом компенсироваться в условиях установившегося режима слиянием более мелких капель в более крупные, так что средняя величина зазора в каплеподшипнике будет оставаться постоянной.

В этом кратком предварительном сообщении нет смысла останавливаться на деталях. Я считаю, однако, своевременным ознакомить читателей с сущностью выдвигаемого нового принципа, могущего сыграть существенную роль в приборостроении.

## V. ИСТОРИЯ ФИЗИКИ РАЗНОЕ

\*

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ КОНГРЕСС В ПАМЯТЬ А. ВОЛЬТЫ В г. КОМО

**В** 1827 г. умер один из основоположников современного учения об электричестве, знаменитый итальянский физик Александр Вольта. Столетие со дня его смерти было ознаменовано итальянцами организацией Международного физического конгресса, состоявшегося в середине сентября 1927 г. в г. Комо, где родился Вольта и где он провел свое детство и, отчасти, юность. Недалеко от Комо находится г. Павия с древним университетом, отпраздновавшим недавно одиннадцатое столетие своего существования; в стенах этого университета и развернулась научная и педагогическая деятельность Вольты.

Город Комо находится на берегу живописного озера того же названия, похожего на широкую реку, извивающуюся в глубокой горной долине. Одновременно с физическим съездом, заседавшим в Комо, в соседнем еще более живописном городке Белладжио на берегу того же озера происходил Международный электротехнический конгресс, также связанный с именем Вольты. Оба конгресса неоднократно объединялись, сначала в Комо, а затем в Риме, где они были закрыты речью Маркони, посвященной памяти Вольты.

Наконец, в Комо с мая по октябрь 1927 г. была развернута весьма интересная электротехническая выставка *Esposizione Voltiana*, представлявшая достижения итальянской электротехники и электропромышленности за последние годы. Наиболее интересными на этой выставке были, несомненно, данные об электрификации страны —

электрификации, развивающейся с поразительной быстротой. Вся северная и, отчасти, средняя Италия покрыта сетью гидроэлектрических станций мощностью от 30 до 80 и более тыс. квт. Благодаря этим станциям значительная часть железнодорожной сети уже электрифицирована, что особенно существенно ввиду большого числа горных перевалов и туннелей. Вероятно, недалеко то время, когда в Италии, так же как в Австрии и Швейцарии, паровозы будут повсеместно вытеснены электровозами. Это вытеснение идет в настоящее время полным ходом. Другим интересным моментом выставки является развитие автоматических телефонных станций. Последние в настоящее время в Италии совершенно вытеснили обыкновенные «человеческие» станции. От Венеции и Милана до Мессины и Палермо я видел лишь телефонные аппараты с вращающимся диском для автоматического включения желаемого номера.

Столетие со дня смерти Вольты явилось, конечно, лишь поводом для устройства названной его именем выставки, а равным образом и Международного физического съезда. Основной причиной являлось здесь несомненное желание «себя показать», продемонстрировать успехи, достигнутые за последние годы в промышленности, технике и других областях хозяйства и культуры. Об этом достаточно ярко свидетельствовали речи различных официальных и неофициальных представителей итальянского правительства на многочисленных банкетах и приемах, которые были устроены в Комо и в Риме в честь конгрессистов. Необходимо сказать, что итальянцы проявили при этом необычайное радушие и чрезвычайно широкое гостеприимство. Конгрессистов не только угощали помпезными обедами и ужинами; их катали по озеру Комо, возили на автомобилях в Павию, доставили специальным поездом в Рим, возили с гидами по римским достопримечательностям; наконец, им предоставили значительную скидку на 5 путешествий по железной дороге, а некоторым из них — бесплатные билеты I класса, годные для всей железнодорожной сети в течение одного месяца.

Итальянцами были приняты все меры для того, чтобы надлежащим образом не только «себя показать», а вместе с тем, разумеется, и «людей посмотреть». Последнее обстоятельство явствует из исключительно блестящего со-



става обоих съездов и, в особенности, физического съезда. Здесь были почти все корифеи физической науки: патриарх электронной теории Г. А. Лоренц, автор учения о радиоактивном распаде и основатель планетной теории атомов Э. Резерфорд, создатель теории квантов М. Планк, Н. Бор, объединивший идеи Резерфорда и Планка и явившийся Кеплером ныне развивающейся новой квантовой механики. В этой блестящей плеяде не хватало лишь одного Эйнштейна. Далее, из теоретиков можно назвать: А. Зоммерфельда, П. Дебая, М. Борна, М. Лауэ и новую блестящую звезду физики В. Гейзенберга, а из экспериментаторов: О. Штерна, Дж. Франка (Германия), Р. Милликэна, А. Комптона, И. Лангмюра, Р. Вуда (Америка), Л. Брэгга, Астона (Англия), Коттона (Франция) и многих других. Некоторые из приглашенных, например, Э. Шредингер и Л. де Бройль, разделяющие с Гейзенбергом и Борном честь открытия основ новой квантовой или волновой механики, к сожалению, не смогли приехать.

Помимо членов съезда, число которых достигало 70, было приглашено много гостей, в особенности из Германии. Среди них такие выдающиеся физики, как В. Паули, Г. Вентцель, А. Ланде. Что касается конгрессистов, то для полноты картины необходимо отметить, что среди упомянутых 70 человек было 13 нобелевских лауреатов. Италия была представлена несколько непропорциональным количеством делегатов, что, впрочем, вполне естественно; наиболее известные из них: профессор Болонского университета К. Майорана, являющийся председателем организационной комиссии, подготовившей и с чрезвычайным успехом проведшей конгресс, талантливый молодой теоретик Э. Ферми (Рим), а также знаменитые итальянские математики В. Вольтерра и Леви-Чивита. Маркони выступил лишь при закрытии съезда.

Что касается, наконец, советской школы физиков, то она была представлена П. П. Лазаревым (Москва) и мною.

Я должен с удовлетворением констатировать, что среди различных национальных знамен, которыми был декорирован зал заседаний Международного физического конгресса в здании института Кардуччи (в Комо), находился и красный флаг с серпом и молотом. Однако еще большее удовлетворение доставила мне приветственная речь на русском языке (не очень чистом, но зато необыкновенно

сердечном), произнесенная ректором Павийского университета после аналогичных приветствий на четырех официальных языках конгресса — итальянском, французском, английском и немецком.<sup>1</sup> Я очень сожалею, что оказался (случайно) единственным русским, услышавшим это, так сказать, неофициальное приветствие на родном языке.

Вавилонское столпотворение языков, которым характеризуются современные международные конгрессы, разумеется, не очень способствует их успеху в отношении официальной части программы. Этот недочет (недостаточная понятность многих докладов для более или менее значительной части аудитории) усугубляется краткостью их, вытекающей из ограниченности времени. Так, например, в Комо каждому докладчику было предоставлено 15 мин.; в результате, некоторые докладчики, не уложившиеся в эту скудную норму, были прерваны, не закончив своего выступления. Впрочем, все доклады, зачитанные в более или менее сокращенном виде или же вовсе не зачитанные, будут опубликованы в скором времени (в 1928 г.) в трудах съезда. Для участников съезда главный интерес его заключался, конечно, в неофициальной стороне — в частных беседах, которые они имели возможность вести друг с другом в перерывах между заседаниями, за трапезой, во время прогулок и т. п. Эти беседы содействовали выяснению большого числа трудных вопросов.

Переходя к обозрению самих докладов, я вынужден сократить их в еще большей мере, нежели это было сделано на съезде, и ограничиться лишь несколькими наиболее интересными (с опасностью погрешить против объективности).

Начну с докладов Резерфорда и Астона, посвященных вопросу строения положительных ядер атомов. Резерфорд пытался обосновать ту мысль, что в сложных радиоактивных атомах ядро состоит из чрезвычайно прочной центральной части и одного или нескольких нейтральных атомов гелия, вращающихся вокруг нее под влиянием поляризационных сил, т. е. сил того же типа, как и те, которые наблюдаются в простейших опытах притяжения нейтральных кусочков бумаги, наэлектризованной стеклянной палочкой. В этом отношении был бы понятен тот факт, что распад многих радиоактивных атомов сопровождается (или, вернее, обуславливается) удалением из

них  $\alpha$ -частиц, т. е. ядер гелия. Нельзя, однако, сказать, чтобы аргументация Резерфорда была убедительной.

Что касается Астона, то он сделал чрезвычайно интересное сообщение о результатах определения атомных весов при помощи своего нового усовершенствованного прибора, дающего точность до одной десяти тысячной. Прежние опыты Астона показали, как известно, что большинство элементов представляет собой смесь изотопов, т. е. атомов с одинаковым числом наружных электронов, которыми определяются их химические и большинство физических свойств, но с различным числом внутриядерных электронов и протонов, числом которых определяется их вес. Приписывая атому гелия вес 4 (или кислороду 16), Астон получил для различных изотопов всех исследованных элементов (в тех случаях, когда последние встречаются в нескольких модификациях) веса, выражающиеся целыми числами. Так, например, элемент хлор, обладающий атомным весом 35,5, представляет собой в действительности совокупность двух «чистых» хлоров с весами 35 и 37, в неизменном отношении 3 : 1. При этом, однако, оказывается, что атом водорода, состоящий из одного протона и одного электрона, имеет вес 1.008. Мы видим, следовательно, что образование сложного ядра из нескольких протонов (и соответствующего числа электронов) сопровождается уменьшением массы в количестве 8% на каждый протон. Это уменьшение массы с позиций электромагнитной теории массы объясняется уменьшением энергии. Согласно известному соотношению Эйнштейна, изменение энергии какой-либо системы равно изменению ее массы, умноженному на квадрат скорости света. Что же касается уменьшения энергии, то оно характеризует прочность связи электронов и протонов в ядре, т. е. работу, необходимую для расчленения последнего на составные элементы. Таковы были результаты, полученные Астоном с помощью его старого прибора (массовый спектрограф) в 1920 г. Их следует рассматривать лишь как первое приближение. В настоящее время, благодаря значительному усовершенствованию этого прибора, ему удалось получить второе приближение. А именно, оказывается, что дефект массы сложных атомов (ядер), рассчитанный на 1 протон, несколько отклоняется от предыдущей цифры 8%, причем в случае не слишком легких атомов (начиная, примерно, с аргома) это отношение вполне

закономерным образом изменяется с увеличением числа протонов. Что же касается более легких атомов (от гелия до аргона), то они разделяются на две группы: с аномально малым и с более или менее нормальным дефектом массы. К первым принадлежат все те атомы, например, лития, азота, алюминия, которые, согласно опытам Резерфорда, могут быть подвергнуты искусственному разрушению, т. е. из их ядер может быть выбит 1 протон. Ко вторым принадлежат все остальные практически неразрушимые атомы (гелий, кислород, неон и т. д.). Таким образом, найденные Астоном аномально малые дефекты массы соответствуют, очевидно, аномально слабой связи одного из протонов ядра с остальной системой. Этот факт может послужить ключом к разгадке внутреннего строения ядер. Пытаясь истолковать результаты своих опытов над искусственным разложением некоторых атомов, Резерфорд высказал мысль, что уязвимый, слабо связанный, протон находится на периферии ядра, обращаясь вокруг центрального ядрышка наподобие того, как это делают наружные отрицательные электроны. При таких условиях электростатическое отталкивание между протоном и остатком ядра не может уравниваться поляризационными силами. Единственными силами, могущими, так сказать, спасти положение, являются силы магнитные. Наличие последних вытекает из того недавно установленного факта, что электроны и протоны обладают не только зарядами, но и магнитными моментами, т. е. представляют собой своего рода элементарные магнетики.

В отношении электронов и протонов этот факт до сих пор еще не был обнаружен экспериментально, непосредственным образом.\* Наличие, однако, магнитных свойств у положительных ядер более сложных атомов, а равным образом и магнитные свойства атомов, обусловленные быстрым вращением периферических электронов, были хорошо изучены Штерном и Герлахом. Последние сообщили на съезде о дальнейших усовершенствованиях своей методики (прохождение молекулярного пучка в неоднородном магнитном поле), а также о кое-каких новых результатах, полученных ими. Явления, происходящие в атомах и ядрах атомов, обнаруживаются часто особенно отчетливо не в обыкновенных земных телах, но в звездах, где

---

\* Впрочем, он подтверждается множеством косвенных данных.

благодаря чрезвычайно высокой температуре не только невозможны сколько-нибудь прочные связи различных атомов друг с другом (химические соединения), но и связи наружных электронов с атомами (или ядрами). Как это ни парадоксально, но свет, испускаемый отдаленной звездой, будучи разложен спектроскопически, дает подчас более ценные указания насчет природы тех атомных процессов, которыми обуславливается его испускание, нежели свет, получающийся от близких земных источников с их относительно низкой температурой. Вопрос о строении звезд в рамках атомной теории был изложен в интересном докладе известного английского астронома Эддингтона.

Своего рода дополнением к этому докладу явился доклад Милликена о так называемой проникающей космической радиации. Последняя представляет собой, по-видимому, ультрарентгеновские лучи с чрезвычайно высокой частотой колебаний, испускаемые недрами звезд и обнаруживаемые на земной поверхности по производимой ими ионизации воздуха и других тел.<sup>2</sup> Аналогичные эффекты вызываются, как известно, излучением радиоактивных веществ, находящихся в почве и, отчасти, в самом воздухе. Однако эти излучения сравнительно легко экранируются, в то время как космическая радиация, исследованная Милликеном, способна проходить через слой воды толщиной в 50 м. Исследуя ее поглощение в водах ряда горных озер, расположенных на разной высоте в Северной и Южной Америке, Милликен мог убедиться в идентичности ее свойств во всех точках земного шара, наружном происхождении и независимости от каких бы то ни было земных явлений.\*

В связи с ограниченностью объема статьи я вынужден обойти молчанием целый ряд интересных докладов как экспериментального, так и теоретического характера. Одним из наиболее эффектных докладов явился, несомненно, доклад Зоммерфельда о приложении некоторых новых результатов теории квантов к объяснению свойств металлических тел. Основным и наиболее характерным свойством металлов является, как известно, их электропроводность. Последняя обуславливается наличием так называемых

---

\* Заметим, что основные свойства космической радиации были установлены еще до Милликена Кольгерстером.

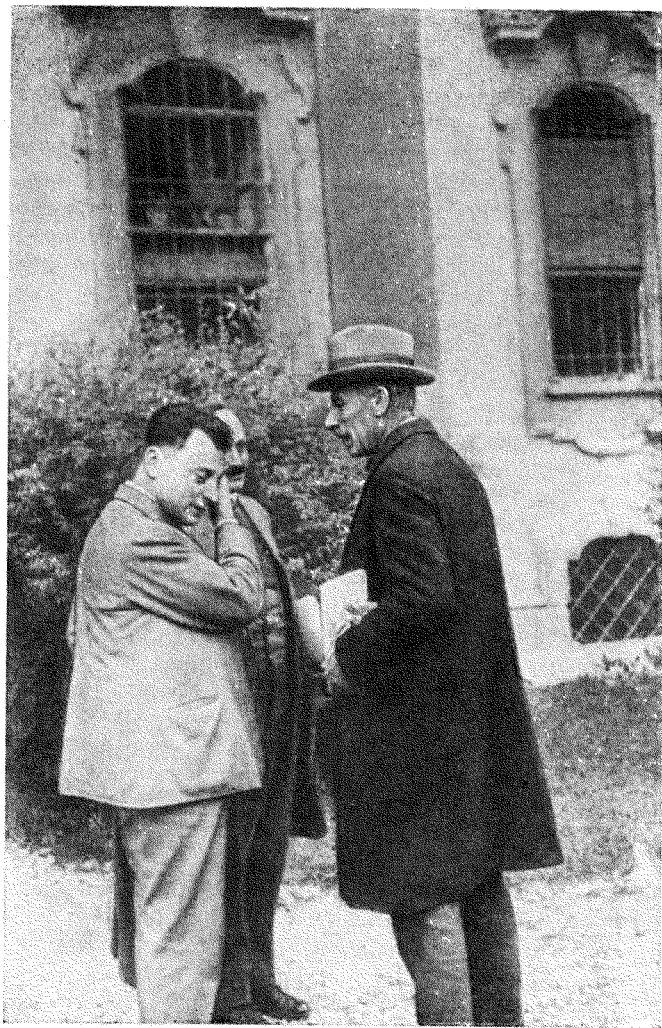
свободных электронов, т. е. электронов, не связанных с определенными атомами, но могущих перемещаться по всему объему, занимаемому металлом. Таким образом, в отношении своей подвижности свободные электроны ведут себя как атомы некоторого газа. Углубление этой аналогии привело к классической теории Друде и Лоренца, объяснявшей целый ряд свойств металлов и, в особенности, пропорциональность между их электропроводностью и теплопроводностью, но наталкивавшейся на одно серьезное затруднение. А именно, этой теорией электронам приписывалась кинетическая энергия, равная в среднем кинетической энергии атомов при той же температуре; отсюда вытекало, что теплоемкость металлических тел должна быть значительно больше, нежели тел неметаллических, в предположении, что число свободных электронов, примерно, совпадает с числом атомов.

Это затруднение удалось преодолеть Зоммерфельду или, вернее, Паули и Ферми, положившим основание новой кинетической теории газов и, в частности, электронного газа. Сущность этой теории, вытекающей из некоторых формальных требований теории квантов, заключается в следующем. Если значения скорости разбить на достаточно малые (но конечные) интервалы, или клетки, то на каждую из подобных клеток может приходиться не более одной частицы.\* Отсюда следует, что при абсолютном нуле температуры частицы газа не могут все покоиться, как этого требовала классическая кинетическая теория, но должны сохранять весьма большую кинетическую энергию и тем большую, чем больше число их в единице объема. Эта энергия, разумеется, вырастает с повышением температуры, однако тем медленнее, чем больше ее начальное значение.

Преобразуя классическую теорию электронного газа в соответствии с распределением скоростей, определяемым Паули и Ферми, Зоммерфельд смог устранить то основное затруднение ее, о котором упоминалось выше, и вместе с тем значительно улучшить результаты ее, относящиеся к различным, в особенности термоэлектрическим, свойствам металлов.

---

\* Я нарочито упрощаю вопрос. В действительности речь идет об интервалах, или клетках, шестимерного фазового пространства, образуемого координатами частицы и проекциями ее скорости.



*С лева направо: В. Паули, Дж. Франк и Ф. Пашен.  
Италия, г. Комо, 1927 г (фото Я. И. Френкеля).*

Довольно близко к теме Зоммерфельда примыкал и мой доклад об электронной теории металлов. В моей теории я не учитывал принципа Ферми; однако соображения совершенно другого рода привели меня к заключению, что свободные электроны имеют при абсолютном нуле очень большую кинетическую энергию, почти независимую от температуры. Для определения величины электрического сопротивления металлов я применил принципы новой волновой механики, согласно которой электроны трактуются не как частицы, а как волны, аналогичные световым волнам. В соответствии с этим сопротивление металлов сводится к рассеянию подобных электронных волн благодаря мельчайшим неоднородностям металлической среды, обусловленным неправильностями теплового движения атомов, или искусственным, зависящим от присутствия беспорядочно распределенных посторонних атомов, т. е. примесей. В случае световых волн явление рассеяния иллюстрируется наиболее эффектно видимостью неба; в этом случае естественные неоднородности зависят от местных случайных уплотнений и разрежений воздуха, а искусственные — от взвешенной в нем пыли.

Наиболее актуальным вопросом современной физики является, несомненно, вопрос о новой квантовой или волновой механике, к которой привело за последние два года развитие атомной теории Бора. Этот вопрос являлся заключительной частью программы съезда. Ввиду сложности его, Бору было предложено сделать обзорный доклад, долженствовавший, отчасти, заменить доклады отдельных конгрессистов (например, Борна, Гейзенберга, Крамерса); на этот доклад была предоставлена четырехкратная норма — один час.

В настоящий момент сущность новой механики начинает выясняться. Мы привыкли думать, что, исследуя движение какой-либо частицы, можно определить совершенно точно как положение ее в каждый данный момент времени, так и ее скорость. Это представление является, по-видимому, ошибочным. Чем точнее определяется положение частицы, тем менее точно может быть определена ее скорость — и наоборот. Эта неточность тем больше, чем меньше масса частицы. Для обычных материальных тел она практически равна нулю; наоборот, для электронов с их чрезвычайно малой массой она настолько велика, что проследить за движениями отдельного электрона в тече-



ние сколько-нибудь значительного промежутка времени оказывается принципиально невозможным. Отсюда вытекает необходимость заменить уравнения движения классической механики, дающие возможность по начальному положению и скорости какой-либо частицы определить абсолютно точно все предшествующее и последующее ее движение, другими уравнениями, которые определяли бы не положение частицы в любой момент времени, но лишь вероятность нахождения ее в этот момент в той или иной точке пространства. Этот вопрос решается уравнением, открытым Шредингером в начале 1926 г. и получившим свою надлежащую интерпретацию в работах Борна. В теории Шредингера вероятность (в указанном выше смысле) представляет собой величину, аналогичную энергии обыкновенных световых волн и распространяющуюся в пространстве согласно закону, аналогичному закону распространения света в неоднородной материальной среде.

Устойчивые движения электронов в атоме сводятся в этой теории к стационарному колебанию вероятности или, вернее, определяющей ее линейной величины с конечной амплитудой, обращающейся в нуль на бесконечном расстоянии, а также, вообще говоря, и на некоторых других узловых поверхностях, находящихся на конечных расстояниях (как это имеет место, например, в случае колебаний закрепленной струны).

Сущность теории Бора заключается, как известно, в разделении внутриатомных движений на два типа — на движения стационарные, подчиняющиеся закону сохранения энергии, и движения переходные (от одного стационарного к другому), связанные с испусканием или поглощением энергии.

В новой механике те и другие объединяются в одно целое, причем интенсивность излучения или поглощения, которая в теории Бора определялась вероятностью соответствующего скачкообразного квантового перехода, может быть вычислена на основании общего решения уравнения Шредингера для вероятности нахождения электрона в том или ином месте. Несколько раньше та же задача была решена Гейзенбергом и Борном при помощи особого метода, который, как впоследствии оказалось, совершенно эквивалентен методу Шредингера. Интересно отметить, что в непосредственной связи с невозможностью точной локализации электронов в пространстве на-

ходится неразличимость отдельных электронов, выражающаяся в том, что во время движения системы электронов один из них постоянно становится, так сказать, на место другого.

Изложенного, конечно, недостаточно для понимания сущности новой механики; я надеюсь, однако, что предыдущие строки дают некоторое представление о глубине того переворота в нашем механическом мировоззрении, который совершается ныне и последствия которого пока еще трудно оценить.

## МЕТОД АНАЛОГИЙ В ФИЗИКЕ

### ВВЕДЕНИЕ

Ребенок начинает познавать окружающую его природу, во-первых, регистрируя те чувства, которые доходят до его сознания, и, во-вторых, используя для целей познания те свои впечатления, которые постоянно повторяются.

На этом этапе развития человека возникает новый процесс, при котором старые, знакомые, впечатления или предметы, их вызывающие, отсортировываются от новых и незнакомых. Этот процесс различения составляет сущность познания и может быть прослежен на всем пути развития человека — от примитивного годовалого ребенка до высокоразвитого, зрелого ученого. Развитие ума и интеллекта в большой степени зависит от увеличения «запасов» знакомых вещей, составляющих наш опыт, с одной стороны, и от нашей способности различать знакомые и незнакомые элементы в тех новых фактах, которые обнаруживаются в повседневной жизни или научном творчестве, с другой.

Оба указанных процесса не всегда идут рука об руку. Обычно второй из них отстает от первого. Часто, оглядываясь назад, мы обнаруживаем в массе наших прежних впечатлений черты сходства между вещами, которые ранее представлялись совершенно различными. Не менее часто, напротив, мы обнаруживаем существенное различие между вещами, которые представлялись нам совершенно подобными.

Наша способность к распознаванию направлена в первую очередь на такие элементы, присущие какому-либо предмету или явлению, которые нам уже знакомы. Знание преимущественно означает узнавание. Существенно новые явления, коль скоро они существуют, уясняются нами в последнюю очередь. Любое открытие такого нового элемента приводит к обогащению наших знаний, к расширению нашего предшествовавшего опыта и в то же время к некоторому отрицанию нашего прежнего понимания.

Это происходит потому, что понимание в действительности заключается в сведении нового, незнакомого, к старому и знакомому до тех пор, пока такого рода сведение становится далее невозможным. В этом заключается своего рода антагонизм между знанием и пониманием, антагонизм, который объясняет тот факт, что люди, знающие больше других, очень часто, хуже других воспринимают новые факты, вынуждающие их к пересмотру старой схемы понимания. Можно заметить, что основой таких схем являются не те вещи или связи, которые мы понимаем, но те, к которым мы просто привыкли. Понимание имеет лишь относительный смысл, так как оно заключается в ассимиляции новых вещей и понятий, т. е. в обнаружении их существенного сходства с вещами или понятиями, уже знакомыми нам.

Желание понять, как это ни парадоксально, является лишь выражением нашего консерватизма,<sup>1</sup> нашего нежелания допустить существование чего-то такого, что не укладывается в знакомую схему, созданную нашими предыдущими знаниями. Вот почему прогресс науки часто обязан радикально настроенным теоретикам, ломающим старые схемы и открывающим путь к новым фактам, неправильно понятым консервативными учеными, которым не удалось оценить подлинную новизну этих фактов и увидеть раскрывающиеся за ними новые горизонты. Отсюда не следует, что стремление к пониманию должно быть отвергнуто, как противоречащее прогрессу науки. Во-первых, многие новые факты, обнаруженные при наблюдении или исследовании, просто могут быть сведены к знакомым элементам, т. е. объяснены в рамках старой схемы. Во-вторых, отказ от старой схемы может быть сделан только в пользу какой-либо новой, включающей новые элементы, к которым мы должны привыкнуть. Без такой

новой схемы знание будет представлять собой хаотическое накопление фактов, а не науку.

Мы видим, таким образом, что научное сознание всегда терзается двумя противоречивыми тенденциями: прогрессивной, или революционной, тенденцией открывать новые факты и консервативной, или реакционной, тенденцией сводить их к знакомым, привычным представлениям, т. е. объяснять их в рамках старой схемы. В результате мы подошли к двум первым звеньям гегелевской триады, характеризующей ход мышления — тезис и антитезис. Третье звено — синтез — выражается в тенденции к обновлению старой схемы и осмыслению новых фактов совместно с известными ранее в новой схеме, которая должна быть шире предшествующей. Поэтому прогресс в наших знаниях включает в себя возрастающую унификацию нашего понимания явлений природы. Основные элементы новой схемы по сравнению со старой должны обладать большей общностью, более широкой областью приложения. А это означает, что между различными новыми и старыми наблюдаемыми явлениями должна в действительности существовать некоторая внутренняя связь, должно иметь место некоторое внутреннее подобие, которое и ожидалось первоначально, но оставалось необнаруженным, поскольку мы старались найти старое в новом и пренебрегали поисками нового в старом.

Если сходство является полным, оно называется тождеством, если же оно неполное, то его обычно рассматривают как аналогию.

В точной науке, такой, например, как физика, чисто количественные различия могут не приниматься во внимание; поэтому явления, которые отличаются друг от друга только количественно, например звуки разного тона или свет различной окраски, можно рассматривать как тождественные.

Следует отметить, что разница между количественными и качественными характеристиками явления в значительной степени относительна и зависит от уровня наших знаний. Развитие и унификация последних связаны с постепенным сведением качественных различий к количественным, т. е. существенных различий к несущественным. Это осуществляется на основе только что описанного процесса — путем обнаружения новых черт, являющихся общими для старых и новых фактов.

Тем не менее, на каждой ступени развития наших знаний всегда существуют такие различия, которые нельзя рассматривать как чисто количественные и которые поэтому сводят сходство к аналогии, не допуская его превращения в тождество.

Пытаясь объяснить различные новые явления, обнаруженные путем наблюдений и экспериментов, мы сначала стараемся установить какие-либо аналогии между ними и теми явлениями, которые считаем понятыми, т. е. с которыми уже имели дело. Таким образом, мы отдаем дань нашей тенденции к консерватизму, отмеченной выше.

Как правило, мы не ждем, пока эксперименты полностью выявят все особенности нового явления, но, подчеркивая обнаруженные нами аналогии, пускаемся в объяснения, основное содержание которых заключается в сведении этих явлений к какой-либо старой схеме, т. е. найденных аналогий к тождествам.

Если эти попытки оказываются тщетными, мы пытаемся придумать некоторую новую схему, в которую одинаково хорошо укладывались бы как новые, так и уже известные явления. Эксперимент, который первоначально опережал теорию, теперь отстает от нее и служит проверкой для теорий, появление которых он стимулировал, время от времени вскрывая новые факты. Эти факты становятся отправной точкой для новых теорий, цель которых всегда остается той же — свести аналогии к тождествам, т. е. качественные различия к количественным.

Элементы, которые могут быть выявлены при анализе различных явлений, — это предметы (или объекты) и отношения между предметами. Сюда мы могли бы также отнести свойства предметов, которые, как легко показать, определяются некоторыми отношениями между ними. Например, электрический заряд определяется силой, которую он испытывает со стороны другого заряда; здесь сила является типичным представителем категории отношений.

Аналогии, обнаруживаемые между явлениями, означают, соответственно, наличие сходства либо между предметами, либо между отношениями, либо между тем и другим.

Естественно, наличие сходства между предметами должно означать наличие сходства также и между отношениями, поскольку предметы фактически познаются через их взаимоотношения (взаимодействия) друг с другом.

Принято, однако, считать, что сходство между отношениями означает также и сходство между предметами. Это, как мы увидим позднее, ни в коей мере не подтверждается фактами, так как между предметами совершенно различного рода часто обнаруживаются весьма сходные отношения.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, ФОРМАЛЬНЫЕ АНАЛОГИИ И АНАЛОГИИ МЕХАНИЗМА ЯВЛЕНИЙ**

Желая понять различные явления, для которых имеет место какое-либо сходство отношений, мы подчеркиваем это сходство и пытаемся свести его к тождеству. Часто оказывается, что при этом мы действительно достигаем существенного успеха, так как то, что вначале казалось поверхностным сходством, оборачивается глубокой аналогией. Однако очень часто эта аналогия оказывается ложной и вводит нас в заблуждение.

Непонимание этого обстоятельства на ранних этапах наносит ущерб дальнейшему развитию науки, которое требует фундаментального пересмотра новой области знания, а иногда также и той старой области, которая помогла нам ее выявить.

Я не буду вдаваться в философские тонкости, связанные с этим вопросом, а лучше проиллюстрирую основные изложенные выше мысли интересными примерами, взятыми из истории развития нашей науки — физики. Наибольший интерес, по-видимому, представляют успехи физики, связанные с современным развитием квантовой теории, на которой мы остановимся подробно ввиду ее важности.

На ранней стадии развития физики всякое действие, за исключением тяготения, связывалось с особой субстанцией, лишенной тяжести; последняя же рассматривалась как специфическое свойство, присущее обычному веществу. Такая аналогия между тяготением и другими действиями (силами) оказалась особенно успешной в случае теплоты, которая рассматривалась как проявление особого вещества — флогистона. Из аналогии между теплотой, как своего рода веществом, и обычным веществом следовало или, вернее, казалось, что должно следовать, что должен существовать закон сохранения тепла, сходный с законом сохранения вещества.

Руководствуясь этой аналогией, физики в начале XIX в. действительно смогли установить этот закон экспериментально, что рассматривалось как триумф теории флогистона.

Однако несколькими десятилетиями позднее усовершенствование техники эксперимента позволило обнаружить отклонения от закона сохранения теплоты и, в конце концов, привело к отказу от старой теории. Последняя была заменена механической теорией теплоты, и закон сохранения теплоты свелся к заново открытому закону сохранения энергии для частного случая отсутствия внешней механической работы.

Так Природа сыграла одну из своих первых шуток с физиками, сперва подтвердив замеченную ими аналогию между теплотой и обычным веществом, так что она стала выглядеть как тождество, а затем показав им, к их крайнему удивлению, что они были обмануты поверхностным или формальным сходством отношений (закон сохранения) для двух совершенно разных групп явлений.

Другой пример изобретательности, с которой природа может обмануть тех, кто пытается понять ее, дает нам теория магнитных явлений, рассматриваемых как аналог явлений электрических. В XIX столетии электричество и магнетизм трактовались как две совершенно различные и не связанные друг с другом группы явлений, сходные с третьей группой явлений — гравитацией. При этом каждая из упомянутых групп явлений рассматривалась как проявление некоторой особой субстанции. Представлялось поистине замечательным, что эти субстанции, несмотря на различие их природы, обнаруживают совершенно одинаковые свойства или отношения, если речь идет о зависимости их действия от расстояния. Особенно поразительной была, конечно, аналогия между электрическими и магнитными субстанциями с их биполярностью, контрастирующей с монополярностью обычной весомой материи.

Я не думаю, что Кулон, которому мы обязаны количественным изучением электрических и магнитных явлений, или кто-либо из его современников мог даже допустить мысль, что магнетизм и электричество, несмотря на их сходство, обусловлены совершенно различными причинами. И уже несколькими десятилетиями позднее этот факт стал очевидным для каждого, так как магнитные



силы благодаря работам Эрстеда, Ампера и других были сведены к движению электрических зарядов. Следует напомнить, что этот результат, означавший огромную унификацию наших представлений об окружающем мире, повлек за собой фундаментальный пересмотр теорий электричества и магнетизма.

Так Природа преподала физикам второй впечатляющий урок, предостерегая их от доверия к внешнему сходству, даже если оно и кажется поразительным. Однако физики не извлекли большой пользы из этого урока, так же как и из предыдущего, и при последующем развитии электромагнитной теории пошли по тому же опасному пути.

Этот путь был избран таким выдающимся человеком, как Максвелл, и привел его к открытию замечательных уравнений. Если бы теория Максвелла исчерпывалась только этими уравнениями, то она была бы полностью справедливой.

Сущность же этой теории заключалась, как хорошо известно, в гипотезе, впервые выдвинутой Фарадеем, что электрические и магнитные силы обусловлены напряжениями в некоторой материальной среде, заполняющей все пустое на вид пространство, — в эфире. Это означало существование глубокой аналогии, в конечном счете, тождества между электромагнитными явлениями, с одной стороны, и механическими явлениями в обычных сплошных средах, с другой. Конечно, механические свойства эфира должны были отличаться от механических свойств обычных тел, но это различие не представлялось существенным.

Однако попытки Максвелла и его последователей объяснить механические свойства эфира, т. е. придумать такую его модель, которая соответствовала бы уравнениям электромагнитного поля, оказались тщетными, и, в конце концов, эта идея была отброшена.

Итог был образно сформулирован Больцманом, который писал, что теория Максвелла — это уравнения Максвелла.

Представляется удивительным, что, пользуясь какой-либо аналогией для установления истины, мы часто выходим за пределы этой аналогии и, в конце концов, сталкиваемся с дилеммой: либо отбросить аналогию, которой мы руководствовались в наших поисках, либо остаться

верным этой аналогии и отказаться от результатов наших исследований.

Ситуация в целом носит крайне нелогичный характер — и в этом нет ничего странного. Потому что подлинно новое не может содержаться в старом; оно может быть обнаружено только с помощью какого-то нелогичного процесса.<sup>2</sup>

Один из моих друзей<sup>3</sup> сказал в связи с этим, что он не высокого мнения о людях с ясным, т. е. логическим складом ума, так как такие люди не способны выдвинуть подлинно новые идеи. Это парадокс, но парадокс очень хороший. В наших поисках новых идей мы должны руководствоваться не только и даже не столько логикой, сколько интуицией. А интуиция предпочитает следовать по пути аналогий, перескакивая, с полным пренебрежением логикой, через препятствия, если эти пути заводят в тупик. Именно эти скачки (jumps) и означают переход на более высокую ступень наших знаний.

Возвращаясь к теории Максвелла, я хочу обратить внимание на одну ее особенность, относящуюся к световым явлениям.

Теория света, основанная на представлениях об эфире, значительно старше электромагнитной теории Максвелла. Она исходила из аналогии между распространением света и распространением звука. Аналогия между этими двумя группами явлений, включая такие явления, как отражение и преломление, представлялась достаточно строгой, чтобы послужить основой для попытки свести ее к тождеству, предположив в обоих случаях один и тот же механизм, а именно, механизм колебаний некоторой упругой среды.

Однако, в конце концов, оказалось, что эта аналогия была поверхностной и ошибочной. Распространение звука или других механических колебаний в упругой среде с определенной конечной скоростью можно представить себе теоретически следующим образом. Каждая частица взаимодействует с другой частицей мгновенно, т. е. взаимодействие передается от одной частицы к другой с бесконечной скоростью. Это следует из предположения, что потенциальная энергия взаимодействия частиц может быть описана с помощью некоторой функции, зависящей от их относительного положения в один и тот же момент времени, и, далее, что взаимодействие очень быстро убы-



*Я. И. Френкель. США, г. Миннеаполис, 1931 г.*

вает с расстоянием. Поэтому практически играют роль только силы, действующие между соседними частицами. Но сила, определяясь смещением (из положения равновесия), определяет непосредственно не само смещение, а ускорение, которое существует одновременно с силой. Требуется определенное время, чтобы произошло это смещение, которое в свою очередь вызовет силу, действующую на следующую частицу. Это и есть та причина, по которой смещение и эффективная сила передаются с некоторой конечной скоростью.

Однако, воспользовавшись этой же картиной для описания и понимания процесса распространения света и вообще электромагнитных волн, физики, в конце концов, пришли к заключению, что в этом случае такая картина совершенно ошибочна, хотя она и оказалась очень полезной для установления истины, и что в случае света мы имеем дело с проявлением запаздывающего взаимодействия, т. е. действия, распространяющегося в пустом пространстве с конечной скоростью. В действительности все электромагнитные силы следует рассматривать как силы этого типа; мгновенного взаимодействия старой ньютоновской физики на самом деле не существует.

Многие физики, особенно принадлежащие к старой школе и воспитанные на теории эфира, до сих пор неспособны или не хотят признать этот простой факт, и именно по этой причине специальная теория относительности, к которой Эйнштейн пришел, отказавшись от эфира, все еще остается непонятой большим числом физиков. Потому что основная идея этой теории — относительность времени и, особенно, относительность одновременности — следует из представления о том, что с помощью мгновенного действия или сигнала нельзя соединить во времени любые точки, которые разделены в пространстве, т. е. из представления о том, что не существует ни совпадения во времени, ни совпадения в пространстве в отдельности, но только пространственно-временное совпадение.

Невозможность объяснения электромагнитных явлений, описываемых уравнениями Максвелла, на основе старой ньютоновской механики, примененной к какой-либо модели эфира, одно время рассматривалась как повод для отказа от механической концепции физических явлений вообще, т. е. отказа от возможности свести все эти явления к движению и взаимодействию неизменных материальных частиц. При этом довольствовались утверждением, что представление о таких частицах уже не может больше считаться основным понятием физики и что оно должно быть заменено понятием электромагнитного поля, лишенного какой бы то ни было материальной основы.

Развитие электронной теории показало, однако, что эти заблуждения необоснованы. Не было никакой необходимости отказываться от механической картины мира, но старая механика Галилея и Ньютона должна быть заменена новой электромеханикой Лоренца и Эйнштейна. Эта

новая механика отличалась от старой своей формулировкой законов, относящихся к силе и движению. Первые были модифицированы в том смысле, что мгновенное действие на расстоянии, фигурировавшее в старой теории, было заменено запаздывающим действием, т. е. действием, распространяющимся в пустом пространстве с конечной скоростью и обусловленным электрическим зарядом элементарных частиц вещества — электронов и протонов. Последние были видоизменены в духе теории относительности Эйнштейна, согласно которой масса зависит от скорости, а скорость света, т. е. скорость распространения всех электромагнитных действий, представляет собой предельную скорость действия.

Однако следует признать, что хотя на более ранних стадиях эволюции электронной теории произошла, казалось бы, полная реставрация механической концепции физических явлений, эта эволюция происходила в дальнейшем по новому пути, уводящему от этой концепции и указывающему на необходимость построения теории такого типа, в которой понятие электромагнитного поля должно рассматриваться как первичное и основное, а понятие частиц — вторичное и производное.

Первый шаг в этом направлении был сделан Дж. Дж. Томсоном, который показал, что заряженное тело обладает добавочной массой, обусловленной его электрическим зарядом и пропорциональной квадрату этого заряда. Следующий шаг был совершен Лоренцем, показавшим, что полную массу электрона можно было бы рассматривать, как обусловленную его зарядом, и что зависимость массы от скорости можно при этом получить из уравнений электромагнитного поля в согласии с экспериментальными данными.

По поводу электромагнитной теории массы следует отметить два обстоятельства. Во-первых, она фактически означает сведение законов движения, или механики, в более узком смысле этого слова, к законам, которым подчиняется сила, т. е. к электродинамике. Электродинамика основана, в частности, на предположении о том, что движение каждого отдельного электрона происходит таким образом, что внешняя сила, действующая на него, в каждый момент в точности уравновешивается результирующей элементарных электрических сил взаимодействия между элементами заряда электрона, который предполагается

распределенным в конечном объеме. Это эквивалентно утверждению, что результирующая электромагнитная сила должна обращаться в нуль не только в тех точках пространства, где нет никаких электрических зарядов, но также и там, где такие заряды имеются, с той существенной разницей, что в последнем случае эта сила должна обращаться в нуль не в каждой отдельной точке рассматриваемой области, но лишь для всей области, занятой зарядом.

Во-вторых, рассматривая вместо силы производимую ею работу и импульс силы, мы приходим при этом к формулированию законов сохранения как для электромагнитной энергии, связанной с работой, так и для электромагнитного количества движения, связанного с импульсом.

В старой механике Ньютона кинетическая энергия и количество движения рассматривались как характеристики отдельных частиц, тогда как потенциальная энергия связывалась с парами взаимодействующих частиц. В электромагнитной теории энергия и количество движения связаны непосредственно не с частицами, а с создаваемым ими и действующим на них электромагнитным полем. Сводя силу инерции к электромагнитным силам, мы сводим, тем самым, понятия количества движения и энергии обычной механики к соответствующим понятиям электромагнитной теории.

При этом понятие инертной массы, которое раньше было непосредственно связано с веществом, перешло от вещества к полю и оказалось связанным с электромагнитной энергией; сама же масса, как фундаментальное свойство вещества, была при этом заменена электрическим зарядом.

Третий и пока последний шаг в этом направлении был сделан Эйнштейном в его специальной теории относительности, которая установила непосредственную связь между массой и энергией, и в его общей теории относительности, основанной на принципе эквивалентности инертной и гравитационной (тяжелой) массы.

Попутно можно упомянуть, что релятивистская теория гравитации, развитая Эйнштейном, разрушила еще одну превосходную, но неадекватную аналогию, которую физики лелеяли свыше столетия — аналогию между гравитационными и электрическими силами. Конечно, неполнота этой аналогии, связанная с биполярностью электри-

чества, была понятна и раньше, но этому обстоятельству не придавалось существенного значения. Имели даже место неоднократные попытки свести гравитационные силы к остаточному электростатическому притяжению на том основании, что притяжение между противоположными зарядами несколько превосходит отталкивание между зарядами одного и того же знака. Теория Эйнштейна показала еще раз (и очень впечатляющим образом), что аналогия между электрическими и гравитационными силами имеет чисто формальный характер. Природа этих сил совершенно различна: источником гравитационного поля являются не частицы материи, но энергия электромагнитного поля, связанная с ним. Таким образом, в теории гравитации Эйнштейна вещество в качестве источника гравитации было заменено электромагнитным полем. С другой стороны, как было замечено ранее, законы движения были сведены Лоренцем к законам сохранения энергии и импульса этого поля. Мы видим, таким образом, что развитие электронной теории не ограничилось реставрацией механической концепции физических явлений, а возродило полевые представления ранней электромагнитной теории, однако в более точной и убедительной форме. Она привела к заключению о том, что именно электромагнитное поле (а не электроны) должно рассматриваться как первичная сущность физики. Это значит, что электроны должны интерпретироваться как некие вторичные явления, узловые точки поля, движущиеся в соответствии с законами сохранения электромагнитной энергии и импульса и не имеющие прямой связи с гравитацией, которая определяется только этим импульсом и энергией.

Эта точка зрения получила у немецких физиков название полевой теории в противоположность механистической (или субстанциональной) теории, построенной на идее первичности материальных частиц. Конечно, между этими двумя теориями нет фундаментального противоречия; каждая из них подразумевает существование как поля, так и частиц, и различаются они только в определении того, что из них является первичным. Я не утверждаю, что эта эквивалентность в действительности установлена. Существует много вопросов, которые остается решить. Среди них наиболее острым, пожалуй, является вопрос о структуре электрона. Кроме того, обе теории

нуждаются в фундаментальном пересмотре в свете новейшего развития квантовой механики, которая полностью игнорировалась при их построении.

Нашей следующей задачей будет рассмотрение этого нового развития квантовой механики с позиций использования и злоупотребления метода аналогий.

Первая четверть XX в. характеризуется замечательным изменением нашего понимания физических явлений. Это изменение, связанное с развитием квантовой теории, привело физику к глубокому кризису, выход из которого был найден лишь 5 или 6 лет тому назад.<sup>4</sup> Если же быть более точным, то почти одновременно было найдено два различных пути, которые, как казалось на первый взгляд, вели в двух противоположных направлениях. Первый из этих путей основывается на исключении всякой наглядности, другой, напротив, расширяет ее. Первый путь был предложен Гейзенбергом,<sup>5</sup> который завершил программу, намеченную боровским принципом соответствия, и освободил физику от целого ряда абсолютных понятий, лишенных, как оказалось, действительного значения. В добрые старые времена, до возникновения квантовой теории, атомные явления описывались в терминах устойчивого движения электронов. Бор вынудил физиков добавить к понятию об устойчивости движения понятие о переходах из одного состояния такого движения в другое. Именно с этих позиций физики с 1913 до 1925 гг. постепенно начали использовать два типа механических величин. Частицы или амплитуды классической физики, относящиеся к устойчивому движению, и квантовые величины, относящиеся к переходам.

Своим принципом соответствия Бор установил приближенное соотношение между обоими типами величин. Следуя намеченному Бором пути, Гейзенберг отказался от классических величин и развил схему для прямого расчета квантовых величин. К этому и сводится упомянутое мною выше исключение наглядности. Физики имели теперь гораздо менее четкую картину атома в сравнении с той, которую они пытались себе наглядно представить ранее. Но, с другой стороны, они получили гораздо более точное представление об элементах, составляющих эту картину (говоря математическим языком, о матричных элементах), чем они имели раньше, о гораздо большем числе элементов классической картины явления, которая



оказалась неадекватной. Говоря словами одного шутника, вероятно, имевшего отношение к философии, физики узнавали все больше и больше о все меньшем и меньшем<sup>6</sup>.

Поучительно подчеркнуть, что новая матричная механика Гейзенберга, Борна и Иордана продемонстрировала очень далеко идущую аналогию с классической механикой. Действительно, многие законы новой механики можно было непосредственно взять из старой схемы, используя стандартные методы ее модификации. Однако эта аналогия имеет совершенно иную природу, чем те аналогии, которые мы обсуждали выше. Эти последние заключались в утверждении существования подобия между явлениями различных категорий (групп), подобия, которое позволило бы свести их к одному механизму, т. е. свести аналогию к тождеству. Здесь мы имеем дело с чисто формальным подобием между двумя различными математическими описаниями одних и тех же явлений.

Однако мы вновь встречаемся с примером аналогии прежнего типа, когда обращаемся к рассмотрению второго пути, приведшего к выходу из тупика, характерного для старой квантовой теории, выхода, открытого де Бройлем и Шредингером. Этот путь, как уже было отмечено, означал, по крайней мере поначалу, не ограничение нашей первоначальной картины Природы, но, напротив, добавление к ней новых элементов, а именно, элементов, заимствованных из волновой теории света.

Вряд ли нужно напоминать о деталях, связанных с этим новым расширением наших знаний. Отправной точкой для эпохального открытия де Бройля была теория Эйнштейна о двойственной природе света как явления, которое можно и должно описывать в терминах как волновой, так и корпускулярной картины. Метод в данном случае представляет собой пример чистейшей аналогии: у де Бройля возникла счастливая мысль рассматривать катодные лучи (поток электронов, — В. Ф.) — простейшую форму движущейся материи — по аналогии со светом: в плане той же двойственности природы этого движения, и ввести понятие о длине волны, связанной с движением катодных лучей. Все вы знаете, как превосходно была подтверждена эта смелая идея экспериментами по дифракции катодных лучей, поскольку впервые такие эксперименты были проведены в вашей стране.<sup>7</sup> Эти результаты на первый взгляд устанавливали твердую

основу для аналогии между материей (веществом) и светом и давали мощный стимул для дальнейшего развития этой аналогии. И на самом деле, она оказалась исключительно далеко идущей и в большой мере способствовала установлению истины.

Снова многие физики оказались загипнотизированными идеей о том, что вновь открытая аналогия, может быть, наиболее неожиданная и далеко идущая из всех известных до сих пор, была подлинной и, соответственно, способной привести к тождеству (с необходимыми уточнениями) между теориями вещества и света. Однако те, кто поверил в это, еще раз оказались жертвами предательской бесхитростности, с которой Природа может придать совершенно различным вещам совершенно одинаковую видимость.

Начнем с беглого анализа положительных результатов, которые были получены с помощью этой аналогии между светом и веществом, и только после этого обратимся к ее ограничениям.

Прежде всего следует отметить блестящие результаты, достигнутые в математическом описании новой волновой механики, включая сюда исходное волновое уравнение Шредингера и его последующие обобщения и усовершенствования. Действительно, имелась полная аналогия между уравнением Шредингера и уравнением распространения света в неоднородной среде для случая лишь одной частицы или, что сводится к тому же самому, для случая роя (системы) идентичных и невзаимодействующих друг с другом частиц. Однако некоторые физики выдвигали контрображения о том, что кванты света способны в какой-то мере взаимодействовать друг с другом, хотя, возможно, и очень слабо, например, за счет гравитационных сил. В этом случае было бы разумно предпринять развитие волнового уравнения, описывающего световые явления, следуя той же линии, которая характеризует волновую механику системы идентичных и взаимодействующих частиц. Последняя проблема еще не решена из-за трудностей, связанных с необходимостью учета теории относительности.

Эти трудности, однако, в случае одной частицы или системы частиц без взаимодействия были преодолены. Многие исследователи, включая и меня, искали пути развития релятивистских волновых уравнений. . . <sup>8</sup>

## ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Великая Отечественная война резко выявила значение физики, ее достижения для практики и в особенности для военного дела. Недаром с момента вероломного нападения на СССР физические институты СССР (и всех воюющих стран) почти полностью переключились на разрешение оборонных вопросов.

Хотя эти вопросы и являются основными проблемами физики сегодняшнего дня, я совсем не буду касаться их в этой статье. Моя задача — вкратце рассмотреть «нормальные» проблемы современной физики, т. е. те проблемы, разрешением которых она занималась в мирное время и к разрешению которых она вернется после окончания войны.

Эти проблемы могут быть разделены на три группы.

1. Проблемы теоретической физики. Они заключаются, главным образом, в объяснении явлений, уже более или менее давно открытых и изученных экспериментально. В ряде случаев, однако, теория опережала эксперимент и предсказывала явления или закономерности, ранее неизвестные. Экспериментальное обнаружение их облегчалось тем, что физикам-экспериментаторам указывалось, где именно эти явления следует искать. Наиболее блестящие достижения теоретической физики заключались в такого рода предсказаниях. Следует, впрочем, заметить, что эти предвидения почти всегда вытекали из теорий, имевших целью не предсказать новое, а объяснить старое. Гениальные теоретики умели при этом посмотреть на ста-

рое по-новому, увидеть в нем черты, отличные от того, что считалось известным и понятным.

Характерной чертой подлинно новаторских теорий, которые не пытаются свести новые факты к ранее установленным представлениям, но отыскивают более широкие представления как для новых, так и для старых фактов, является их кажущаяся «непонятность», т. е. иррациональность, с точки зрения сложившихся ранее представлений, исчезающая лишь после радикальной перестройки последних. Наиболее эффектными примерами таких революционных теорий в физике могут служить теория тяготения Ньютона, электромагнитная теория света Максвелла (предсказавшая существование радиоволн), квантовая теория Планка—Эйнштейна—Бора.

2. Проблемы экспериментальной физики. Здесь, как и в области теоретической физики, возможны открытия двойкого рода, а именно: открытия принципиально новых вещей или явлений (например, рентгеновских лучей, радиоактивности, нейтронов, позитронов и т. д.) или же изучение деталей в явлениях, в общих чертах уже известных. При обсуждении проблем экспериментальной физики представляется на первый взгляд возможным говорить лишь о проблемах второго рода, ибо никто, казалось бы, не может заранее знать что-либо о явлениях принципиально новых и еще не открытых. Однако понятие новизны допускает ряд градаций, и если иметь в виду не только радикально новые явления, но явления, в принципе сходные с наблюдавшимися ранее, то поиски таких новых явлений могут быть включены в план научного исследования

3. Проблемы технической физики. Экспериментальная физика теснейшим образом связана с теоретической физикой, с одной стороны, и с технической физикой — с другой. В обоих случаях эта связь имеет двусторонний характер, т. е. соответствующие отделы физики взаимно обуславливают и стимулируют развитие друг друга. К области технической физики относятся, вообще говоря, вопросы практического использования достижений экспериментальной физики для технических и, в частности, промышленных целей. В ряде случаев, однако, успехи техники приводят к созданию новых физических приборов и методов исследования, открывающих новые пути и возможности для развития экспериментальной физики.

Так, например, развитие радиотехники, явившееся результатом успехов учения об электромагнитных и электронных явлениях, привело в свою очередь к созданию приборов (счетчики электронов, электронные телескопы, камеры Вильсона с автоматическим управлением, циклотроны), которым мы обязаны важнейшими успехами в физике атомных ядер.

## I. ФИЗИКА МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕЛ

При рассмотрении проблем современной физики можно было бы исходить из вышеприведенной классификации. Однако более целесообразно разделить их на две основные группы по другому признаку, а именно, на проблемы макроскопического характера, связанные со свойствами материальных тел, и проблемы микроскопического характера, относящиеся к элементарным процессам и элементарным частицам материи, а также к самой природе последней. Задачи и методы теоретической, экспериментальной и технической физики переплетаются при этом теснейшим образом внутри каждой из двух рассматриваемых групп.

Физика XIX в. занималась преимущественно изучением внешней стороны явлений, непосредственно доступной опыту и наблюдению. Физика XX в. сосредоточила свое внимание преимущественно на внутреннем механизме этих макроскопических явлений, на их, так сказать, микроскопической сущности. При этом ей удалось к началу 30-х годов свести все явления к движению и взаимодействию неизменных элементарных частиц двух сортов — электронов и протонов, в согласии с общими принципами квантовой механики, с одной стороны, и электродинамики — с другой. В результате удалось установить теоретически и проверить экспериментально или установить экспериментально и объяснить теоретически с исчерпывающей полнотой строение и свойства тех 92 сортов атомов, из которых состоят все известные нам материальные тела.

При этом под строением атомов я имею в виду число, расположение и движение электронов вокруг соответствующих атомных ядер, которые для большинства физико-химических вопросов можно трактовать как непротяженные положительно заряженные частицы. В рамках этой

Схемы строения атомов было изучено экспериментально и теоретически с такой же полнотой, как, например, строение нашей планетной системы.

Новые проблемы связаны с глубоким изучением строения и свойств атомных ядер, а также процессов их превращения — мечтой алхимиков об искусственной «трансмутации атомов», ныне осуществленной, правда, лишь в лабораторных условиях. С другой стороны, они связаны с более подробным изучением тех систем, которые образуются атомами при их соединении друг с другом, — молекул, кристаллов, аморфных тел.

Развитие атомной физики по этим двум направлениям — «центростремительному» и «центробежному» — имеет совершенно различный характер. При рассмотрении молекул и материальных тел физика имеет дело с явлениями, давно уже изученными экспериментально, а также, отчасти, и теоретически с более или менее макроскопической точки зрения, следовательно, недостаточно полным образом. Проблемы современной физики сводятся в этой области к теоретическому объяснению накопленных фактов с микроскопической точки зрения, т. е. с позиции современных представлений о строении атомов и поведении образующих их электронов и ядер.

Применение к этим вопросам квантовой механики и электродинамики уже привело, если не к количественному, то, по крайней мере, к качественному объяснению соответствующих явлений. Современной физике удалось заложить основы квантовой химии, установить строение и определить свойства не только простых, но подчас и сложных органических молекул и кристаллов. При этом в большинстве случаев физика лишь подтвердила и дополнила те структурные представления, которые подчас ощупью, на основании косвенных данных, были ранее разработаны химией.

Не следует думать, что все эти успехи были достигнуты только в области теоретической физики. Мощным орудием экспериментального исследования строения молекул и материальных тел явились рентгеновские и катодные (электронные) лучи. Все же основные проблемы физики в области строения систем более сложных, чем атомы, т. е. состоящих из нескольких или многих атомов, имеют скорее теоретический, чем экспериментальный характер.

Современная теория строения молекул и кристаллов еще очень далека от той степени точности, которая достигнута в описании строения отдельных атомов. Здесь перед физикой стоит весьма широкая (хотя, быть может, и не очень глубокая) проблема дальнейшего количественного развития и уточнения наших знаний. Наряду со структурными проблемами, перед физикой молекул и материальных тел стоят еще далеко не разрешенные проблемы, так сказать, «процессуального» характера, связанные с изучением процессов, происходящих в молекулах и материальных телах под влиянием различных факторов — механических воздействий, теплоты или холода, электрических и магнитных полей, света и т. д.

Проблемы этого рода отнюдь не всегда требуют для своего разрешения детального применения представлений и методов исследования атомистики. В особенности это относится к проблеме механических свойств твердых и жидких тел или, вернее, кристаллических и аморфных тел. Здесь наблюдается особенно сильное отставание теоретической физики от физики экспериментальной и технической. Достаточно сказать, что мы до сих пор не имеем мало-мальски удовлетворительной теории такого общеизвестного и практически важного явления, как трение твердых тел; нет еще количественной теории пластических свойств кристаллов, т. е. «течения» их под действием достаточно сильных скальвающих напряжений.<sup>1</sup> Наши представления о механических свойствах твердых и жидких тел оставались до самого последнего времени крайне упрощенными и схематичными

Жидким телам приписывались свойства упругости объема и вязкости при изменении формы. В последнее время становится все более очевидным, что жидкость, наряду с объемной упругостью, обладает также и упругостью формы, подобно твердым телам, т. е. наряду с текучестью, обладает твердостью, которая не исключается, а лишь маскируется этой текучестью. Далее, изучен экспериментально ряд таких тел, которые обладают необычными механическими свойствами, не позволяющими отнести их к традиционной категории жидких или твердых тел. Сюда относятся, например, резина и ряд других резинообразных тел с высокой эластичностью, исчезающей при низких температурах, а также студнеобразные жидкости, получающие в настоящее время широкое рас-

пространение в технике и обладающие совершенно своеобразной упругостью и вязкостью структурного происхождения.

Самый факт необычности механических свойств всех этих веществ, с которой, кстати, во многих случаях связана необычность их электрических свойств, свидетельствует о том, что изучение их как в экспериментальном, так и в теоретическом отношении представляет собой одну из очередных задач современной физики.

Несколько особое положение среди этих необычных веществ занимает жидкий гелий при температурах, близких к абсолютному нулю. Блестящие опыты акад. П. Л. Капицы показали, что при абсолютном нуле температуры гелий полностью утрачивает вязкость, свойственную обычным жидкостям. Для объяснения экспериментальных результатов, полученных П. Л. Капицей, Л. Д. Ландау выдвинул чрезвычайно интересную квантовую гидродинамику гелия, основанную на представлении о возможности существования в жидком гелии двух встречных потоков — «мертвого», невязкого гелия, и «живого», обладающего конечной вязкостью.

Теория Ландау является в некотором отношении столь же необычной, иррациональной, как и экспериментальные результаты, которые она объясняет. В этом обстоятельстве нельзя, конечно, усматривать ее недостаток, ибо, как уже упоминалось выше, все подлинно новые теории являются более или менее иррациональными.<sup>2</sup> Однако факт иррациональности теории сам по себе не может служить подтверждением ее правильности. Таким подтверждением может служить лишь распространение ее на другие явления, а также экспериментальная проверка ее предсказаний (например, в случае жидкого гелия проверка предсказания теории относительно существования в гелии двух различных скоростей распространения звуковых колебаний).<sup>3</sup>

Явление сверхтекучести жидкого гелия вблизи абсолютного нуля температуры представляет собой механический аналог явления электрической сверхпроводимости, т. е. исчезновения электрического сопротивления у ряда металлических тел при очень низких температурах. Хотя оно известно с давних пор, однако удовлетворительного объяснения оно до сих пор не имеет, если не считать некоторых попыток объяснения его второстепенных особен-





*П. Л. Капица. 1967 г. (фото Ю. Г. Заенчика).*

ностей. Объяснение явления сверхпроводимости продолжает оставаться одной из актуальных проблем современной физики и, по всей вероятности, потребует коренного пересмотра наших представлений относительно нормальной проводимости металлов в смысле более правильного учета взаимодействий между свободными электронами, обуславливающими эту проводимость.<sup>4</sup>

Большую актуальность сохраняют в настоящее время проблемы, связанные с изучением электрических, оптических, фотоэлектрических и термоэлектрических свойств электронных полупроводников, хотя в этой области за последнее время и достигнуты большие успехи, в частности, у нас в СССР (работами акад. А. Ф. Иоффе и его школы). Эти вещества представляют собой промежуточное звено между металлами и диэлектриками, подобно тому как жидкости образуют промежуточное звено

между твердыми и газообразными телами. Как правило, они приближаются к изоляторам при низких температурах и к металлам — при высоких. Действие температуры сводится при этом к ионизации атомов, т. е. к срыву связанных электронов, которые приобретают способность свободно перемещаться по всему объему кристалла и, таким образом, проводить электрический ток. Такое же ионизирующее действие оказывает свет — не только в видимой, но и в инфракрасной области. Под влиянием неравномерного освещения или нагрева в полупроводниках или на стыке их с металлами возникают значительные фотоэлектрические и термоэлектродвижущие силы.

В настоящее время физики в значительной мере овладели наукой управления различными свойствами полупроводников, главным образом, путем введения в них примесей, атомы которых легко отдают свои электроны или же прочно удерживают чужие. Развитие этой новой области технической физики уже привело к результатам крупнейшего промышленного и технического значения, однако будущее сулит электронным полупроводникам еще более существенное техническое применение. Быть может, именно полупроводники помогут человечеству решить основную проблему техники недалекого будущего, когда ресурсы ископаемого горючего (угля и нефти) будут более или менее исчерпаны. Я имею в виду проблему непосредственного использования солнечной энергии путем превращения ее в электрическую с помощью фотоэлементов или термоэлементов. Предварительные результаты, полученные в этом направлении еще до войны А. Ф. Иоффе и его сотрудниками, показывают, что это не утопия, поскольку достигнут большой коэффициент полезного действия рационально построенных фотоэлементов и термоэлементов (в полупроводниках этот коэффициент полезного действия значительно больше, чем в металлах).<sup>5</sup>

Но и в чисто научном отношении изучение полупроводников еще очень далеко от завершения и таит в себе ряд интереснейших проблем, как экспериментальных, так и теоретических. Среди них следует особенно отметить вопрос о локализации (задержке) свободных электронов в идеальной кристаллической решетке, искажаемой только этими электронами, и в связи с этим вопрос о движении медленных (тепловых) электронов, а также о существовании экситонов, т. е. свободно перемещающихся центров

электронного возбуждения.<sup>6</sup> Последний вопрос имеет существенное значение для понимания механизма некоторых фотохимических процессов в кристаллах диэлектриков. Он приобретает особый интерес в связи с новой схемой электрического пробоя изоляторов, недавно предложенной Б. И. Давыдовым. Согласно этой схеме, пробой газов объясняется ступенчатой ионизацией их, т. е. ионизацией атомов, предварительно возбужденных. Как возбуждение, так и ионизация осуществляются столкновениями атомов с электронами, освободившимися в результате предшествующих ионизаций. Эта гипотеза представляется мне весьма правдоподобной. Однако она не может быть принята без дальнейшего количественного развития и экспериментальной проверки. В частности, поскольку пробой газов во всех отношениях сходен с пробоем твердых диэлектриков, гипотеза Давыдова предполагает наличие экситонов, т. е. возбужденных атомов, в последних.

Промежуточной роли полупроводников аналогична в отношении магнитных свойств роль, играемая так называемыми метамагнитными телами. При средних температурах эти тела \* ведут себя подобно обычным ферромагнитным телам, утрачивая, однако, свои магнитные свойства не только при высоких температурах, как обычные ферромагнетики, но и при низких. Эти пока еще очень слабо изученные «метемагнитные» явления, электрическим аналогом которых могут служить явления сегнетоэлектричества, представляют не только большой научный интерес, но, вероятно, сулят и важные практические приложения. В частности, большое практическое значение имеет дальнейшее развитие вопроса о получении ферромагнитных или, вернее, метамагнитных сплавов из немагнитных элементов. В настоящее время известно небольшое число таких сплавов, обладающих весьма интересными магнитными свойствами. Следует отметить, что аналогичное положение вещей имеет место в отношении сверхпроводимости. В настоящее время известен ряд сверхпроводящих (при низких температурах) сплавов из несверхпроводящих элементов.

---

\* К ним принадлежит, в частности, магнетит, т. е. обычная железная руда, а также большое число химических соединений магнитных элементов с немагнитными.

Исследование метамагнитных явлений требует применения весьма низких температур, хотя и не столь низких, как исследование явления сверхпроводимости или сверхтекучести. Эти низкие и даже сверхнизкие температуры требуются также для изучения оптических свойств кристаллов, в частности, структуры их спектров и определения уровней энергии, а также большого числа других свойств твердых тел, обнаруживающихся в достаточно отчетливом виде лишь в этих исключительных условиях. Поэтому одной из важных вспомогательных задач современной физики является экипировка физических институтов криогенными лабораториями и дальнейшее усовершенствование методов глубокого охлаждения. В настоящее время с помощью магнитных методов удалось достигнуть температур порядка одной тысячной градуса по абсолютной шкале.

Не следует думать, что интересные и мало исследованные свойства твердых тел могут быть обнаружены лишь при сверхнизких температурах. За последние годы накопился богатый экспериментальный материал, относящийся к каким-то превращениям, испытываемым кристаллическими телами при средних и высоких температурах. В противоположность обычным аллотропическим или полиморфным превращениям, связанным с изменением кристаллической структуры и выделением или поглощением тепла, превращения «второго рода», о которых идет речь, не сопровождаются изменением кристаллического строения и обнаруживаются лишь по аномальному изменению (в более или менее узком интервале) теплоемкости, коэффициента расширения и ряда механических, электрических, магнитных и оптических свойств.

Подобные превращения были впервые установлены наблюдением в ферромагнитных телах, вернее, вблизи так называемой температуры Кюри, выше которой их ферромагнетизм исчезает. Сходный с ними характер имеют наблюдаемые при очень низких температурах превращения, связанные с исчезновением сверхпроводимости, т. е. внезапным восстановлением нормального электрического сопротивления соответствующих тел, а также переход жидкого гелия из аномальной модификации II, обладающей сверхтекучестью, в нормальную I, обладающую конечной вязкостью.

Аналогичные превращения второго рода были обна-

ружены в последнее время в ряде интерметаллических сплавов. Как впервые было указано Брэггом и Вильямсом, эти превращения заключаются в ликвидации правильности в относительном расположении атомов разного сорта. Так, например, в случае 50%-го сплава цинка с медью атомы разного сорта при низких температурах располагаются в шахматном порядке, тогда как в случае превышения некоторой температуры, аналогичной температуре Кюри ферромагнитных тел, порядок в их чередовании совершенно исчезает.

Далее, известен ряд кристаллических веществ, например галоидные соединения водорода, метан, парафины и др., в которых превращения второго рода могут быть сведены (частично или полностью) к дезориентации частиц или в некоторых случаях, как думает Паулинг, к переходу молекул от вращательных качаний около правильно распределенных равновесных ориентаций к свободному вращению, как в газах. Эти представления, однако, не охватывают наблюдаемые на опыте явления. Так, например, в  $\text{HCl}$  наблюдается одна точка Кюри, которая может быть трактована как температура ориентационного плавления (дезориентации молекул, или, по Паулингу, перехода их к свободному вращению), в случае же  $\text{HJ}$  — два, а в случае  $\text{HBr}$  — три аналогичных превращения.

Таким образом, экспериментальное и теоретическое изучение превращений второго рода в кристаллических телах представляет весьма широкую и далеко еще не исчерпанную проблему современной физики.<sup>7</sup>

Гораздо более широкой и более острой проблемой теоретической физики является создание теории жидкого состояния. К решению этой проблемы физика шла сначала со стороны кинетической теории газов, пытаясь трактовать жидкость как сильно сжатый газ. В последнее время преобладает тенденция сближения жидкости с твердыми телами; при этом они трактуются как твердые тела, лишенные дальнего порядка в расположении своих частиц, но сохраняющие на малых расстояниях тот же самый тип строения, который наблюдается в кристаллическом состоянии соответствующего вещества. Поскольку жидкое состояние является промежуточным между твердым и газообразным, естественно ожидать, что уподобление жидкостей сжатым газом является более или менее

законным в области высоких температур (близких к критической), тогда как в области низких температур, близких к температуре кристаллизации, они должны приближаться к твердым телам. Такого рода описание жидкостей с помощью представлений, заимствованных из кинетической теории газов, с одной стороны, и кинетической теории кристаллов — с другой, является, однако, лишь интерполяцией, имеющей весьма ограниченную ценность. Существуют скептики, которые думают, что такого рода интерполяцией физике придется ограничиться и в будущем при описании строения и свойств жидкостей ввиду чрезвычайной сложности этого вопроса. Лично я полагаю, однако, что этот скептицизм лишен основания и что дальнейшая работа по усовершенствованию кинетической теории жидкостей является одной из актуальных задач физики нашего времени.

Следует отметить, что решение этой задачи сразу же приводит к необходимости радикальной перестройки наших обыденных понятий о жидком состоянии тел, прежде всего, в смысле ликвидации противоположности между понятиями текучести и твердости. Как уже упоминалось выше, первая не исключает вторую, но лишь маскирует ее. Необходимо, далее, иметь в виду, что деление тел или, вернее, агрегатных состояний вещества на твердые и жидкие не охватывает действительность, которая раскрывает гораздо более сложное многообразие агрегатных состояний. Помимо жидко-кристаллического (или мезоморфного) состояния, которое в настоящее время в экспериментальном отношении уже довольно хорошо изучено, современной физике известны такие состояния вещества, которые совершенно не укладываются в схему твердого и жидкого. Сюда относится высокоэластическое, или резинообразное, состояние, которое, как показывают новейшие исследования, может встречаться при известных условиях у таких простых веществ, как сера, фосфор и др. К явлениям этого порядка следует также отнести различные желеобразные состояния, изучением которых физика до последнего времени почти совершенно не занималась. А, между тем, изучение желеобразных систем (гелей) представляет громадный научный интерес, в особенности для биологии, в которую физика начала проникать лишь совсем недавно в виде особой промежуточной науки — биофизики.

Таким образом, одной из фундаментальных проблем современной физики является экспериментальное изучение сложных агрегатных состояний и построение молекулярно-кинетической теории этих состояний.

Развитие всех естественных наук теснейшим образом связано с усовершенствованием приборов, служащих для наблюдения явлений природы или для осуществления явлений, не наблюдаемых в естественных условиях. Физика в этом отношении отличается от остальных наук тем, что она создает новые приборы и связанные с ними новые методы исследования не только для других наук, но и, прежде всего, для себя.

Мы уже упоминали выше о замечательных явлениях сверхпроводимости или сверхтекучести, которые были открыты благодаря разработке способов достижения чрезвычайно низких температур. В этом направлении (приближение к абсолютному нулю температуры) физика еще, по-видимому, не дошла до предела. Ряд свойств материальных тел, связанных с магнитными моментами атомных ядер, требует для своего экспериментального обнаружения и изучения еще более низких температур — порядка десятитысячных долей градуса и ниже. Физика располагает средствами для их достижения путем использования магнитных моментов атомов и ядер, но пока еще отнюдь не исчерпала их. Это — дело недалекого будущего.

В сторону высоких температур современная физика продвинулась еще очень мало. Максимальная достигнутая в лаборатории температура составляет около  $20\,000^\circ$ ; однако наблюдать какие-либо свойства тел при этих температурах до сих пор не удавалось. В этом отношении наиболее интересные результаты почерпнуты физикой из астрофизики.<sup>8</sup>

В последнее время в области сверхвысоких давлений физика достигла гораздо больших результатов. Несколько лет назад Бриджмэну удалось создать давления до  $50\,000$  атм. — и не только создать их, но и изучить ряд интересных свойств твердых тел при этих давлениях. В самое последнее время удалось повысить этот предел до нескольких сот тысяч атмосфер, т. е. приблизиться вплотную к тому давлению (около  $1$  млн. атм.), которое господствует в центре земного шара. Одной из насущных задач экспериментальной физики является дальнейшее

изучение свойств материи при этих сверхвысоких давлениях.<sup>9</sup>

Наряду с рекордными достижениями в области сверхнизких температур и сверхвысоких давлений, физика достигла за последние годы рекордных результатов в увеличении размеров наблюдаемых объектов путем создания и применения электронного микроскопа. Обычные микроскопы дают увеличение, не превышающее 5—6 тыс. раз. С помощью электронного микроскопа оказывается возможным повысить этот предел еще в сотни раз, т. е. дойти до линейных увеличений порядка 1 млн. Применение электронного микроскопа уже дало в последние годы ряд замечательных результатов в области физики и металлографии, коллоидной химии и в особенности биологии, позволив обнаружить отдельные молекулы некоторых болезнетворных вирусов. Эти молекулы обладают, по-видимому, способностью к росту и размножению, представляя собой промежуточную форму между обыкновенными молекулами и живыми клетками. Изучение нового ультрамикромра, открываемого электронным микроскопом, составит в ближайшем будущем одну из важнейших и наиболее благодарных задач названных выше дисциплин, суля им на каждом шагу новые важные открытия или облегчая понимание явлений, известных до сих пор лишь весьма неполным образом. В этом отношении изобретение и дальнейшее усовершенствование электронного микроскопа должно сыграть не меньшую роль, чем та, которую сыграло в свое время изобретение обычного микроскопа. Вся совокупность градаций между микроскопическими объектами с линейными размерами порядка  $10^{-4}$  см и отдельными не очень большими молекулами становится ныне доступной непосредственному наблюдению и исследованию. Именно эта область представляет сейчас наибольший интерес для науки как о живом, так и о мертвом веществе.

Наконец, еще в одной области физики предстоит повысить цифры, являющиеся до настоящего времени рекордными. Речь идет об увеличении частоты искусственно создаваемых электрических и механических колебаний (ультракороткие радиоволны, ультразвуковые волны). Современной радиотехнике удалось достигнуть частот колебаний порядка  $10^9$  в сек., что соответствует электромагнитным волнам с длиной порядка 1 см и даже не-



сколько меньше. Однако между этими радиоволнами и наиболее длинными волнами, образующими инфракрасные «тепловые» лучи, до сих пор лежит практически неосуществленная и неразведанная область длин волн от нескольких миллиметров до десятых долей миллиметра. А, между тем, именно эта область представляет наибольший интерес для изучения различных электрических свойств жидких и, отчасти, твердых диэлектриков, так как в ней следует ожидать наибольшего поглощения и дисперсии соответствующих волн.<sup>10</sup> Эта область частот представляет также чрезвычайно большой интерес для изучения механических свойств твердых и в особенности жидких тел путем исследования распространения через них искусственно созданных ультразвуковых (или «гиперзвуковых») колебаний, приближающихся по своей частоте к тем, которые образуют тепловое движение в этих телах. Техника превращения электрических колебаний в механические в настоящее время хорошо разработана и освоена; остается лишь добиться дальнейшего повышения радиотехнических частот. За последние три—четыре года наметились новые пути решения этой интересной и важной задачи (по линии конструирования кластронов и других электронных приборов).

Подытожив вышесказанное, мы можем сказать, что наибольший интерес в области физики имеют те проблемы, которые относятся либо к крайним, либо к промежуточным свойствам материальных тел. Этот вывод относится не только к физике, но в равной мере и к другим наукам. Более того, наиболее актуальные проблемы относятся не к тем явлениям, которые изучаются определенными, вполне сложившимися и обособившимися науками, а к промежуточным явлениям, образующим места стыка между ними. Это вполне естественно, так как именно такие промежуточные, или пограничные, явления представляются не только наиболее сложными, но вместе с тем наименее изученными. Сказанное относится, в частности, к проблемам биофизики, рассмотрением которых физике давно уже пора серьезно заняться.

До последнего времени к решению биологических проблем физика привлекалась преимущественно биологами; физики же не обнаруживали особого интереса к этим проблемам (если оставить в стороне вопросы физиологической оптики и акустики). Я склонен думать, что в бли-

жайшем будущем это положение должно решительно измениться и что именно на этом участке фронта науки должны разыгаться наиболее напряженные бои за новые успехи знания. Я не буду перечислять здесь проблемы биофизики, ибо им нет числа. Помимо отмеченного выше вопроса о свойствах желеобразных веществ, здесь следует указать явления фотосинтеза, митогенеза, нервной и мышечной деятельности, электрофизиологии (в частности, мозговых электрических колебаний). Наконец, немалый интерес представляют вопросы механики живых организмов, т. е. передвижения животных, насекомых и т. д.

Такое же промежуточное положение, какое занимают сейчас вопросы биофизики, еще недавно занимали вопросы физической химии. В настоящее время соответствующие промежуточные области явлений полностью ассимилированы физикой и вошли в нее под названием физической химии или химической физики.

В своем стремительном росте физика не могла, конечно, оставаться за пределами той области явлений, которая долгое время считалась монополией химии. Противопоставление химии, как науки о веществе и его превращениях, физике, как науке о прочих явлениях, связанных с материей, утратило всякий смысл после того, как физика обошла химию «с тыла», вскрыв строение химических элементов-атомов, и, более того, сначала обнаружив (в процессах радиоактивности), а затем осуществив искусственным образом трансмутацию атомов. Таким образом, химия превратилась в настоящее время в одну из глав физики, правда, одну из самых больших, интересных и практически важных. При изложении проблем современной физики было бы поэтому вполне уместно коснуться также основных проблем химии. Я предоставляю, однако, проблемы химии в узком смысле химикам и перейду к проблемам современной «алхимии», разрешаемым в настоящее время физикой атомных ядер.

## II. АТОМНЫЕ ЯДРА, ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПРИРОДА МАТЕРИИ

Ядерная физика возникла как самостоятельная новая наука после того, как десять лет назад (в 1932 г., — В. Ф.) Кокрофт и Уолтон в лаборатории Резерфорда

(и по его указанию) впервые применили протоны, т. е. ядра водорода, которым были искусственно сообщены чрезвычайно большие скорости, для воздействия на ядра других, более тяжелых атомов. Ранее работы в этой области велись исключительно с помощью радиоактивных веществ, атомы которых трансмутируются спонтанно, без какого-либо внешнего воздействия, испуская альфа-частицы, т. е. ядра гелия, или бета-частицы, т. е. быстрые электроны, которые могут быть использованы для искусственной трансмутации других (устойчивых) атомных ядер. Эта методика сохранила свое значение и поныне. С помощью ее в 1932 г. путем бомбардировки бериллия альфа-частицами, испускаемыми при естественном радиоактивном расщеплении полония, было обнаружено, что в состав сложных ядер наряду с протонами, т. е. ядрами водорода, входят нейтроны — частицы, подобные им по весу, но лишенные электрического заряда. В дальнейшем для получения нейтронов в свободном виде ядерная физика стала применять пучки протонов или дейтронов (ядра тяжелого водорода), разогнанные до скоростей, соответствующих электрической энергии в десятки миллионов вольт, специальными приборами, среди которых особенно важную роль приобрел циклотрон, изобретенный американским физиком Лоуренсом в 1930 г.

Таким путем удалось осуществить и исследовать громадное число ядерных реакций вида



где  $A$  и  $B$  — исходные ядра, а  $C$  и  $D$  — конечные. Эти «алхимические» реакции во многих отношениях сходны с обычными химическими реакциями, но отличаются от них прежде всего несравненно большими (примерно в миллион раз) значениями энергетического баланса, т. е. разности энергий исходных веществ и конечных продуктов, отнесенной к данному их весовому количеству. Далее, одной из реагирующих частиц ( $A$ ,  $B$ ) или ( $C$ ,  $D$ ) является, как правило, весьма простая ядерная частица — протон, дейтон или, в крайнем случае, ядро гелия, тогда как другой партнер может представлять собой сколь угодно сложное ядро. Поэтому реакция  $A + B \rightarrow C + D$  обычно трактуется как искусственное расщепление ядра  $A$  частицей  $B$  (например, протоном), сопровождающееся

удалением из него частицы  $D$  (например, нейтрона). В действительности эта реакция сводится к соединению  $A$  и  $B$  в сложное ядро  $(AB)$ ,<sup>11</sup> находящееся в неустойчивом, возбужденном состоянии, т. е. состоянии с повышенной энергией, в результате чего это ядро спонтанно распадется или делится по схеме  $AB \rightarrow C + D$ . Так же как и химические реакции, ядерные реакции бывают эндотермическими и экзотермическими. Если частица  $B$  заряжена так же, как и ядро  $A$ , что имеет место, если  $B$  представляет собою протон, дейтрон или альфа-частицу, то первый этап реакции  $A + B \rightarrow AB$  требует некоторой энергии активации в виде более или менее значительной кинетической энергии бомбардирующей частицы  $B$ . Эта энергия требуется для преодоления кулоновских сил отталкивания между  $A$  и  $B$ . Таким образом, ядро  $A$  как бы окружено крепостным валом в виде потенциального барьера с высотой, измеряющейся (по шкале энергии) миллионами и десятками миллионов вольт. Если бы движение материальных частиц происходило по законам классической механики, то для преодоления потенциального барьера, окружающего ядро  $A$ , частица  $B$  должна была бы иметь кинетическую энергию, по крайней мере равную высоте этого барьера. В действительности проникновение  $B$  в  $A$ , приводящее к образованию нестойкого сложного ядра  $AB$ , оказывается возможным при значительно меньших кинетических энергиях  $B$  благодаря особому квантовому эффекту, называемому туннельным эффектом. Однако вероятность такого туннельного эффекта быстро уменьшается с понижением кинетической энергии. Так, например, если высота потенциального барьера, окружающего  $A$ , равна 10 млн. в, а энергия  $B$  1 Мэв, то из нескольких тысяч или десятков тысяч столкновений между  $A$  и  $B$  только, скажем, одно приведет к их соединению друг с другом. На очень малых расстояниях между ядерными частицами силы их кулоновского отталкивания перевешиваются силами притяжения иной природы (см. ниже).

Таким образом, несмотря на существование туннельного эффекта при проникновении  $B$  в  $A$ , реакция  $A + B \rightarrow AB$  связана практически со значительной энергией активации, т. е. может осуществляться лишь в том случае, если частица  $B$  обладает значительной кинетической энергией.

Положение усугубляется тем, что при своем движении через материальное тело, образованное атомами  $A$ , частица  $B$  взаимодействует с электронами, образующими оболочку этих атомов, испытывая при этом быстрое торможение. Вследствие чрезвычайно малых размеров ядер  $A$  и  $B$  последние при этом, как правило, не успевают столкнуться с первыми за то время, когда их энергия еще достаточно велика для того, чтобы обеспечить эффективность столкновения. В результате кпд ядерных реакций оказывается чрезвычайно низким: из миллиардов или многих миллионов «частиц-снарядов»  $B$ , при помощи которых обстреливается вещество  $A$ , только один попадает в цель, вызывая соответствующую реакцию. Несмотря на то, что при многих изотермических ядерных реакциях выделяется (на единицу веса) колоссальное количество энергии, использование этих реакций в качестве источника внутриатомной энергии оказывается, таким образом, практически невозможным вследствие отмеченной малости их кпд.

На вопрос одного газетного корреспондента, заданный Эйнштейну года четыре назад относительно перспектив технического использования внутриатомной энергии, Эйнштейн дал следующий ответ: «Это все равно, что кидать кирпичами в ворон. . . ночью».

Развитие ядерной физики за последние два—три года несколько поколебало эту пессимистическую точку зрения и вновь окрылило физиков надеждой на возможность решения проблемы трансмутации атомов в промышленном масштабе.

Если под частицей  $B$  подразумевать не заряженные частицы, а нейтрон, то энергия активации для реакции  $A + B \rightarrow AB$  обращается в ноль, так как нейтрон не испытывает отталкивания со стороны ядра  $A$  и может внедряться в него при сколь угодно малой начальной скорости.

Далее нейтрон не взаимодействует с электронами; для него они представляют собой как бы пустое место. Свободный нейтрон, двигаясь через материальное тело, должен, в конце концов, соединиться с одним из ядер согласно схеме  $A + B \rightarrow AB$ . Таким образом, кпд нейтронов равен 1. Беда, однако, в том, что нейтроны в свободном виде в естественных условиях не встречаются, а если бы они существовали, мы не могли бы управлять их движе-

нием. Они могут быть получены лишь в результате воздействия на ядра искусственно ускоренными заряженными частицами, т. е. с помощью реакции  $A + B \rightarrow C + D$  (где  $B$  обозначает протон, дейтрон или альфа-частицу, а  $D$  — нейтрон), обладающей, как мы только что видели, ничтожно малым кпд.

В 1939 г. Ганом и Штрассманом была открыта новая своеобразная реакция деления ядра урана под действием медленных нейтронов. Ядро урана, находящееся на пределе устойчивости вследствие своего большого электрического заряда, делится под влиянием толчка, испытываемого со стороны нейтрона, на две примерно равные части (подобно жидкой капле, наэлектризованной до очень высокого потенциала), разлетающиеся с колоссальной энергией порядка 200 Мэв. При этом возникает несколько (два—три) свободных нейтронов с довольно значительными энергиями, которые могут «взорвать» несколько других ядер урана. Таким образом, реакция деления урана может в принципе приобрести цепной или лавинообразный характер. Для того чтобы осуществить эту цепную реакцию, необходимо, во-первых, выделить из урана, являющегося смесью двух (или, вернее, даже трех) изотопов, легкий изотоп с атомным весом 235, содержащийся в нем всего лишь в количестве около 0.5%. Дело в том, что этот легкий изотоп гораздо менее устойчив, чем обычный, более тяжелый (с атомным весом 238), который только мешает развитию рассматриваемой цепной реакции, захватывая нейтроны, освобождающиеся при делении легкого изотопа, и не подвергаясь при этом процессу деления, т. е. приводя к почти мгновенному обрыву нейтроновых цепей.

Перед самым началом войны физики всего мира взялись с необыкновенной энергией за практическое решение проблемы урана, т. е. за создание предпосылок, необходимых для осуществления цепной реакции деления урана, главной из которых является выделение его легкого изотопа.

Решение этой проблемы открыло бы перед человечеством совершенно необычайные технические перспективы. Оно дало бы в его руки новый источник энергии, в миллион раз более выгодный (по количеству энергии на данную массу вещества), чем уголь или нефть, хотя и значительно менее распространенный.

Не подлежит сомнению, что сразу же по окончании войны проблема урана займет в современной экспериментальной и технической физике центральное место.

Наряду с ней будет также усиленно разрабатываться проблема получения заряженных частиц (ядер водорода и гелия) со значительно большими энергиями, чем те, которые были достигнуты до сих пор. В Америке, где в настоящее время уже работает 18 мощных циклотронов, перед самым началом войны проектировалась постройка нового гигантского циклотрона, способного сообщать заряженным частицам энергию порядка 100 Мэв.

При таких энергиях кпд ядерных реакций (который может быть измерен отношением числа выбиваемых нейтронов к числу использованных для этого заряженных частиц), вызываемых подобными частицами, должен увеличиться во много сотен и, быть может, тысяч раз по сравнению с теми значениями, которых оказалось возможным достигнуть. При таких условиях ядерные реакции смогут осуществляться уже не только в лабораторных, но и в промышленных масштабах, в особенности потому, что дело будет касаться не использования внутриатомной энергии, а получения путем трансмутации ценных и редких элементов из элементов, широко распространенных в природе.<sup>12</sup>

Наиболее редкими и ценными являются радиоактивные элементы — радий, торий, актиний и радиоактивные продукты их распада. Путем бомбардировки обычных устойчивых атомов нейтронами оказывается возможным получать новые неустойчивые атомы — радиоактивные изотопы практически любого элемента. Для этого нужно лишь располагать достаточно большими количествами свободных нейтронов.

Существующие ныне циклотроны уже в значительной мере разрешили эту проблему; с помощью их легко получают искусственные радиоэлементы в количествах, эквивалентных в смысле интенсивности бета- и гамма-излучения килограммам и даже десяткам килограммов радия. Само собой понятно, какое громадное значение эти результаты имеют для медицины. Недаром наиболее крупные американские госпитали имеют собственные мощные циклотроны.

Наряду с этим искусственные радиоэлементы уже получили чрезвычайно широкое применение в качестве «ме-

ченных атомов», или «индикаторов», при различных физико-химических и биохимических исследованиях (диффузия в твердых телах, ассимиляция различных веществ в живых организмах и т. д.).

Одной из актуальнейших проблем современной ядерной физики является поэтому увеличение КПД ядерных реакций путем перехода от миллионов вольт к десяткам и сотням миллионов вольт.

Циклотроны способны сообщать громадную энергию ядрам, но не электронам. Между тем бомбардировка ядер чрезвычайно быстрыми электронами с энергией порядка десятков миллионов вольт может оказаться более прямым и эффективным методом трансмутации атомов и получения искусственных радиоэлементов, чем бомбардировка протонами, дейтонами или альфа-частицами. Первые шаги в этом направлении со сравнительно медленными электронами уже были сделаны в последнее время. В начале 1941 г. в Америке был изобретен и сконструирован Керстом простой прибор, позволяющий создавать потоки электронов с какими угодно большими энергиями. Применением этих сверхбыстрых электронов, а также сверхжестких гамма-лучей, создаваемых ими, к трансмутации атомов энергично займутся физики всех стран тотчас же после окончания войны.

Мы рассмотрели главнейшие проблемы ядерной физики с точки зрения физика-экспериментатора и инженера. Однако в физике атомных ядер таятся не менее заманчивые и важные проблемы теоретического характера, решение которых должно привести к глубокому изменению наших представлений о самой сущности материи. Эти новые проблемы возникли десять лет тому назад, после открытия нейтронов и позитронов. Хотя эти два открытия были сделаны независимо друг от друга, однако с теоретической точки зрения они тесно связаны.

До открытия нейтронов сложные ядра представлялись как системы, состоящие из протонов и электронов (в меньшем числе, что соответствует избыточному положительному заряду ядер). Существование электронов в ядрах подтверждалось, на первый взгляд, способностью большинства радиоактивных элементов испускать быстрые электроны (в форме бета-лучей) с увеличением на единицу положительного заряда ядра. С другой стороны, это представление приводило к ряду непреодолимых трудно-



стей в отношении магнитных и других свойств ядер. Все эти трудности были сразу же преодолены, когда после открытия нейтронов оказалось возможным представить себе, что ядра не содержат электронов, но состоят из протонов и нейтронов. При этом, однако, возникла новая трудность, связанная с вопросом о происхождении электронов, образующих бета-лучи. Приходится допустить, что они возникают в процессе бета-излучения (подобно тому как возникают фотоны при испускании света) за счет одновременного превращения нейтронов в протоны, что связано с увеличением положительного заряда ядер при бета-эмиссии.\* Можно было бы, конечно, представить себе при этом, что нейтрон не является элементарной частицей подобно протону, но, подобно атому водорода, состоит из протона и электрона. Этому, однако, противоречит тот факт, открытый супругами Жолио-Кюри в 1934 г., что некоторые искусственно радиоактивные ядра (например, ядро, образованное соединением алюминия с альфа-частицей) испускают положительные бета-лучи, состоящие из положительных электронов или позитронов.

Таким образом, с равным правом можно было бы считать протон сложной частицей, образованной соединением нейтрона с позитроном. На самом деле оба представления неверны. Протоны и нейтроны являются элементарными частицами в том смысле, что они не могут подразделяться на еще более мелкие частицы, однако они могут превращаться друг в друга с одновременным появлением электронов или позитронов. Весьма убедительные соображения, основанные на законе сохранения энергии и момента количества движения, показывают, что при этом должны появляться какие-то нейтральные частицы вроде фотонов, получившие название «нейтрино» и «антинейтрино» (по мнению некоторых теоретиков, фотон эквивалентен совокупности двух таких частиц).

Следует отметить, что позитроны были открыты Андерсоном и Неддермайером совершенно независимо от нейтронов при исследовании космических лучей и влиянии магнитного поля на движение образующих их частиц. При этом оказалось, что позитроны зарождаются в космических лучах вместе с электронами и вместе с ними по-

---

\* Эта смелая идея, ныне твердо установленная экспериментально, была впервые высказана Д. Д. Иваненко и В. А. Амбарцумяном.

парно исчезают. Энергия, необходимая для рождения подобной «пары» (электрон—позитрон), получается обычно за счет фотона (кванта гамма-лучей), который при этом исчезает; наоборот, исчезновение пары электрон—позитрон сопровождается появлением фотона (или двух фотонов), который является носителем их энергии.

Изложенные результаты, которые за истекшие восемь лет были многократно проверены на опыте (причем космические лучи оказалось возможным заменить обыкновенными гамма-лучами или жесткими рентгеновскими лучами), привели к возникновению новой фундаментальной проблемы теоретической физики — проблемы элементарных частиц.

В физике XIX в. элементарными частицами являлись отдельные атомы. Материя, т. е. различные вещества, образующие материальные тела, мыслилась как совокупность неизменных атомов 92 различных сортов.

На рубеже XX в. были обнаружены элементарные частицы, более мелкие, чем атомы, и входящие в их состав, точнее, образующие их наружную оболочку, — электроны. В дальнейшем были изучены атомные ядра, простейшими представителями которых являются ядра водорода — протоны.

Казалось, что физика пришла к завершению процесса анализа материи, показав, что все материальные частицы состоят из протонов и электронов и что все физические и химические силы (помимо тяготения) могут быть сведены к электрическим силам.

С 1932 г., т. е. с момента открытия нейтронов, эта простая, но не вполне правильная картина начала катастрофически усложняться. Наряду с электронами появились позитроны; те и другие оказались не вечными и неизменными, как, казалось, подобает быть настоящим материальным частицам, но способными появляться и исчезать подобно квантам света — фотонам. Если электроны в атомах и материальных телах кажутся нам неуничтожаемыми, то это происходит лишь потому, что в обычных условиях отсутствуют позитроны, с которыми они могли бы попарно соединяться, т. е. исчезать, а также потому, что «заглатывание» их атомными ядрами с превращением протонов в нейтроны представляется, вообще говоря, энергетически невыгодным, следовательно, невозможным.

Возникает вопрос: является ли неуничтожаемость протонов и нейтронов, помимо их взаимной превращаемости, действительной или только кажущейся, так же как и у электронов? Ряд соображений и экспериментальных фактов, относящихся к поведению нейтронов и протонов в атомах, свидетельствует о том, что они во всех отношениях, помимо величины своей массы, весьма сходны с электронами. Поэтому представляется весьма вероятным, что подобно электронам, при надлежащих условиях они могут появляться и исчезать в паре со своими гипотетическими антиподами — антипротонами, т. е. протонами с отрицательным зарядом, и антинейтронами.<sup>13</sup>

Если для рождения пары электрон—позитрон необходим удар частицы (например, фотона) с энергией в 1 Мэв, равной, согласно закону Эйнштейна, произведению их массы на квадрат скорости света, то для рождения нового протона или нейтрона совместно с соответствующей античастицей необходим удар частицы с энергией в 2000 раз большей, т. е. равной примерно 2000 Мэв. В настоящее время подобные частицы встречаются лишь в космических лучах; поэтому именно в них следует искать ожидаемые явления материализации протонов и нейтронов. Впоследствии, когда физики смогут искусственно создавать частицы с энергией порядка 1000 Мэв, процессами рождения нейтронов и протонов вместе с их антиподами можно будет управлять так же, как в настоящее время можно управлять рождением электронно-позитронных пар, пользуясь жесткими рентгеновскими лучами. Обнаружение этих явлений и управление ими является весьма заманчивой проблемой ядерной физики. Конечно, действительность может оказаться значительно сложнее нашей схемы, основанной на аналогии между протонами и нейтронами, с одной стороны, и электронами — с другой. Путь аналогий является обычно ограниченным, хотя в своей ограниченности он бывает очень плодотворен, как показывает, например, история развития учения о свете и материи. Возможно, что наряду с обычными протонами и нейтронами и их антиподами окажется возможным создавать частицы с доселе не встречавшимися массами, магнитными моментами и другими свойствами.

Так, например, не успели физики опомниться от неожиданного появления нейтронов и позитронов, как тот же Андерсон в 1937 г. обнаружил в космических лучах но-

вый вид элементарных частиц, так называемые мезоны. Эти частицы обладают электрическим зарядом, равным заряду электронов или позитронов, и массой, в 200 раз большей массы электронов, т. е. в 10 раз меньшей массы протонов или нейтронов. Они зарождаются в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей в результате каких-то пока еще не известных процессов взаимодействия первичных частиц, образующих эти лучи (фотонов, электронов или протонов), с атомными ядрами и живут в продолжение всего лишь нескольких миллионных долей секунды, в течение которых успевают, впрочем, проникнуть не только на поверхность Земли, но и на глубину порядка сотни метров. В конце концов, мезоны погибают, испытывая нечто вроде радиоактивного распада на электрон и нейтрон.

По-видимому, мезоны играют существенную роль в создании сил притяжения между протонами и нейтронами на малых расстояниях, соответствующих размерам образуемых ими сложных ядер. Согласно теории, предложенной японским физиком Юкава в 1936 г., т. е. еще до экспериментального обнаружения мезонов, притяжение между протоном и нейтроном может быть описано как результат своеобразной «игры в мячик», заключающейся в испускании некоей частицы («мячика») одним из них и поглощении ее другим. Из радиуса действия ядерных сил Юкава заключил, что предполагаемая частица должна быть примерно в 200 раз тяжелее электрона. Этому признаку и удовлетворяют мезоны. Однако развитие теории Юкавы на основе представления о переносе ядерных сил мезонами не дало пока вполне удовлетворительных результатов.

Мы видим, таким образом, что развитие физики за последнее десятилетие выдвинуло перед ней ряд совершенно новых, я бы сказал, неожиданных проблем относительно природы материи. Представление о том, что материя состоит из неразрушимых элементарных частиц с неизменными свойствами, продержавшееся в науке до 1932 г., т. е. до открытия позитронов, оказалось принципиально ошибочным. В настоящее время мы не имеем, правда, прямых экспериментальных данных относительно «смертности» более тяжелых элементарных частиц — протонов и нейтронов, однако уже один факт их взаимной превращаемости (в связи с процессами бета-распада ра-

диоактивных веществ) говорит в пользу того, что они так же не вечны, как и электроны. Проблема материи в настоящее время заключается не столько в выяснении свойств ее элементарных частиц, сколько в выяснении обстоятельств их возникновения, исчезновения и взаимного превращения. При этом некоторые частицы являются не только материальными объектами, но вместе с тем и агентами в передаче сил между другими частицами. Так, например, фотоны играют роль передатчиков электромагнитных сил между заряженными частицами (электронами, протонами и мезонами), которые перекидываются ими как мячиками. Как уже упоминалось выше, аналогичную роль играют мезоны в отношении передачи неэлектромагнитных ядерных сил между нуклонами, т. е. протонами и нейтронами. Возможно, что и нуклоны также используются в мировом хозяйстве в качестве передатчиков каких-то пока еще совершенно неизвестных сил между какими-то неоткрытыми частицами.

Материальный мир, который еще совершенно недавно исчерпывался для физиков электронами и протонами, начинает населяться все большим и большим числом частиц с эфемерным существованием и двойной ролью источников и передатчиков силовых действий. Есть все основания думать, что при использовании более мощных источников энергии физики при помощи уже известных частиц, в особенности протонов и электронов, откроют, или, вернее, «создадут» ряд новых частиц с иными массами, механическими и магнитными моментами, а быть может, и электрическими зарядами, чем те, которыми обладают уже известные нам частицы. Некоторые из новых частиц окажутся неустойчивыми или радиоактивными, подобно мезонам; другие, подобно позитронам, устойчивыми в отсутствии соответствующих античастиц, с которыми они смогут попарно взаимно уничтожаться.

Эта картина материи, вскрываемая современной физикой, может показаться на первый взгляд совершенно фантастической. В действительности она является лишь необычной в наших земных условиях. В недрах звезд, где температура достигает миллиардов градусов, эта картина является, по-видимому, совершенно обыденной и нормальной. В настоящее время можно считать установленным, что источниками энергии Солнца и других звезд являются происходящие в них ядерные реакции, сводя-

щиеся, вероятно, в основном к образованию гелия из водорода. Еще гораздо более мощные потоки энергии испускаются некоторыми звездами при своеобразных взрывных процессах, проявляющихся в виде образования так называемых новых и сверхновых звезд. Метаморфозы материи в недрах звезд сопровождаются выделением колоссальных количеств энергии.

Вестниками этих далеких космических процессов являются не только лучи видимого света, испускаемого звездами, но, в особенности, космические лучи, пронизывающие пространство вокруг Земли и даже недра последней до глубины в несколько сот метров. В пределах атмосферы и стратосферы космические лучи состоят преимущественно из фотонов и заряженных частиц — электронов, мезонов и отчасти протонов, с энергией, достигающей квадриллионов вольт (и даже больше — до  $10^{16}$  в.). При этом мезоны, так же, по-видимому, как и электроны, возникают уже в пределах земной атмосферы. Таким образом, вопрос о природе первичных частиц, образующих космические лучи, остается открытым, так же как и вопрос о происхождении этих лучей. Решение этих вопросов составляет одну из наиболее актуальных проблем современной физики и астрофизики.

Представление о том, что материя состоит из элементарных частиц (хотя в наших земных условиях с их относительно скудными энергетическими ресурсами оно практически вполне оправдывается), — односторонне.

Взаимодействие между материальными частицами может трактоваться с помощью представления о динамическом поле. В настоящее время физике известны три рода таких полей: поле сил тяготения (гравитационное), электромагнитное поле, связанное с заряженными частицами, и, наконец, недавно лишь открытое и пока безымянное поле, характеризующее ядерные силы (его можно было бы назвать нуклоновым).

Эти поля заполняют пространство непрерывным образом, сгущаясь около материальных тел и частиц, которые они связывают друг с другом или которыми обуславливаются.

Индивидуальные поля, создаваемые отдельными частицами, могут быть соединены в единое результирующее поле. При этом, естественно, возникает вопрос о действии, производимом на каждую частицу ее собственным полем,

т. е., другими словами, о самовоздействии отдельных частиц. Этот вопрос впервые был поставлен Дж. Дж. Томсоном в отношении заряженных частиц, причем электромагнитное самовоздействие их оказалось в первом приближении формально тождественным с силой инерции. Применяя этот результат к отдельным электронам, Лоренц показал, что инерция их (или масса) может быть полностью сведена к самовоздействию их электрического заряда, если считать последний распределенным в шарике с радиусом  $10^{-13}$  см. При таких условиях закон движения электрона сводится к тому, чтобы полная сила, обусловленная действием результирующего поля, равнялась нулю. Этот «принцип Лоренца» является, вместе с тем, условием выполнения законов сохранения энергии, количества движения и момента количества движения для любой системы электронов, если эти величины связывать не с самими электронами, а с результирующим электромагнитным полем, создаваемым ими.

Возможность перенесения понятий энергии, количества движения и момента количества движения, возникших в механике при рассмотрении движения частиц, на электромагнитное поле выяснилась еще до Лоренца и давно уже была воспринята электротехникой. Однако лишь после того как инерция электронов была истолкована как результат их электромагнитного самовоздействия, оказалось возможным трактовать кинетическую и потенциальную энергию частиц как магнитную и электрическую энергию связанного с ними поля.

При этом электромагнитное поле оказалось носителем всех тех механических свойств (энергии, массы, количества движения и т. д.), которые раньше приписывались материальным частицам. Последние представляется естественным рассматривать не как источники поля, а как его продукты, своего рода узловые точки, образуемые силовыми линиями поля. При этом вопрос о силах взаимодействия между этими узловыми точками, так же как и об их самовоздействии, утрачивает свое значение, поскольку результирующая сила, испытываемая каждой из них, обращается в нуль. Законы движения частиц, образуемых электромагнитным полем, сводятся полностью к законам сохранения энергии и количества движения этого поля.

Дальнейшее развитие «полевой» теории связано с решением проблем тройкого рода: во-первых, проблемы

структуры электронов и атомизма электрического заряда; во-вторых, проблемы динамизации нуклонового (ядерного) поля и, в-третьих, проблемы квантизации динамических полей.

Что касается структуры электрона, то по этому вопросу до сих пор имеются две точки зрения, из коих одна считает электрон непротяженным (точкой), а другая — протяженным. Обе они наталкиваются пока на непреодолимые трудности. Эти трудности, так же как и вопрос об атомизме электричества, будут, вероятно, разрешены путем надлежащего применения к рассматриваемым вопросам основных идей теории квантов, для чего, однако, потребуется существенное дальнейшее развитие современной квантовой механики.

Динамизация нуклонового поля, так же как и динамизация поля электромагнитного, связана с сведением инерции ядерных частиц (протонов, нейтронов) к их самовоздействию через создаваемое ими нуклоновое поле. Попытки трактовать инерцию протонов как результат их электромагнитного самовоздействия, делавшиеся ранее, утратили всякий смысл после того, как были открыты нейтроны, которые при отсутствии электрического заряда имеют массу, очень близкую к массе протонов. В настоящее время эту неэлектромагнитную массу трактуют в ряде теоретических работ как величину, соответствующую особому нуклоновому заряду, который так же относится к нуклоновому полю, как электрический заряд — к полю электромагнитному. Сами протоны и нейтроны при этом рассматриваются как узловые точки нуклонового поля, взятого в отдельности или в комбинации с электромагнитным.

С этой точки зрения материя образует совокупность проникающих друг в друга динамических полей (электромагнитного и нуклонового) с их узловыми точками — материальными частицами и телами. Эти точки при некоторых условиях могут появляться и исчезать, причем, однако, энергия поля, а также количество движения и другие фундаментальные свойства остаются неизменными.

Изложенная картина является пока лишь провизорным эскизом. Для завершения ее необходимо дальнейшее развитие идей квантовой теории. Сущность последней заключается в своеобразном статистическом синтезе прерывного и непрерывного. Введенная сначала в учение



о движении материальных частиц и учение о свете теория квантов получила важное для решения проблемы материи развитие в сторону квантования динамических полей. В результате подобного квантования на физической сцене появляются, наряду с частицами, создающими рассматриваемое поле или создаваемыми им, новые квантовые частицы, служащие для передачи взаимодействия между исходными частицами.

В случае, например, электромагнитного поля, источниками, или продуктами, которого являются электроны (а также, отчасти протоны), соответствующими квантовыми частицами, передатчиками электромагнитных действий, являются фотоны. В случае нуклонового поля, создаваемого протонами и нейтронами (или образующего эти нуклоновые частицы), соответствующими квантовыми частицами (передатчиками) являются, по-видимому, мезоны. С другой стороны, мезоны наравне с электронами участвуют в создании электромагнитного поля. Отсюда вытекает весьма естественная мысль, что все частицы являются квантовыми (в указанном смысле) по отношению к каким-либо другим частицам. В частности, электронно-позитронные пары могут, по всей вероятности, трактоваться как кванты какого-то, пока еще не изученного поля, создаваемого некоторыми другими частицами, например нуклонами. Но и нуклоны могут фигурировать в той же роли по отношению к каким-то другим частицам, по всей вероятности, еще не обнаруженным.<sup>14</sup>

Здесь мы, однако, выходим за границы современной физической науки и рискуем попасть в область ненаучной фантастики. Впрочем, предшествующее развитие физики показывает, насколько ограничены и узки были наши представления о физическом мире до сих пор. При обсуждении проблем современной физики не следует поэтому бояться некоторого, пока еще не вполне оправданного расширения ее границ.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА В СССР ЗА 30 ЛЕТ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В прежнее время теоретические проблемы физики как принципиального, так и математического характера, изучались, с одной стороны, физиками, еще не разделившись на экспериментаторов и теоретиков, а с другой — математиками. Умножение этих проблем, усложнение их как в математическом отношении, так и, в особенности, в отношении их комплексности, т. е. связанности с большим числом разнообразных физических явлений, привели, в конце концов, к возникновению особой специальности промежуточного характера по отношению к физике как экспериментальной науке и к математике — именно, теоретической физики. Этому способствовало возникновение в первом десятилетии нашего века таких революционных и всеобъемлющих теорий, как электронная теория, теория относительности, теория световых квантов и квантовая теория атомов.

Дальнейшая разработка этих теорий привлекла к себе за границей внимание многих молодых физиков, которые отказались от какой-либо экспериментальной работы и целиком посвятили себя созданию новых теорий и их применению к множеству различных конкретных физических явлений, которые эти теории давали возможность рассматривать в совершенно новом свете.<sup>1</sup>

Представители этой новой специальности не ставят никаких экспериментов и, как правило, не умеют их ставить, являясь в этом отношении объектом добродушного издевательства со стороны экспериментаторов. Их задача

заключается в том, чтобы «наводить порядок» в обширном экспериментальном материале, накопленном другими исследователями, находить принципиальные основы физических явлений, вскрывать их внутренний механизм, давать общую математическую формулировку законов, ими управляющих, и путем математического анализа вычислять или предвычислять ход этих явлений в тех или иных конкретных условиях.

Необходимо подчеркнуть, что разрешение всех этих теоретических проблем физики не стало монополией физиков-теоретиков. Всякий крупный физик-экспериментатор является по существу и теоретиком, ставящим и решающим теоретические вопросы. Точно так же в решении таких проблем теоретической физики, которые упираются главным образом в сложные математические расчеты, принимают по-прежнему участие специалисты-математики.

В тех случаях, однако, когда вопрос, интересующий физика-экспериментатора, имеет слишком комплексный характер, т. е. связан с явлениями, не входящими непосредственно в изучаемую им область, решение его представляется обычно физику-теоретику. Преимущество физика-теоретика перед экспериментатором заключается именно в том, что теоретик, как правило, хорошо ориентируется в гораздо более широком круге физических явлений, относящихся к различным областям экспериментальной физики.

Широта физического образования часто обуславливает также преимущество физика-теоретика перед математиком при решении сложных физических проблем математического характера: не понимая надлежащим образом сущности рассматриваемых явлений, математик обычно бывает склонен искать точное решение там, где можно ограничиться сравнительно простым приближенным решением, получаемым в результате разумного, т. е. не изменяющего существа дела, упрощения задачи.\*<sup>2</sup>

---

\* Чем сложнее рассматриваемая система, тем, по необходимости, упрощение должно быть ее теоретическое описание. Невозможно требовать от теоретического описания сложного атома, а тем более молекулы или кристалла результатов столь же высокой точности, как от теории простейшего (водородного) атома. Впрочем, подобное требование является не только невыполнимым, но, по существу, и никчемным. Физическая теория может ставить себе двоякого рода

Таким образом, если отрицательной характеристикой физика-теоретика является неумение ставить физические эксперименты, то положительной характеристикой является энциклопедичность в вопросах физики, сочетаемая с достаточной математической вооруженностью.

В зависимости от соотношения между этими двумя факторами физик-теоретик может приближаться по своему профилю либо к физику-экспериментатору, либо к математику. Теоретики первого (экспериментального) типа занимаются преимущественно различными конкретными физическими или физико-химическими вопросами, волнующими экспериментаторов, с которыми они находятся в тесном контакте. Теоретики второго (математического) типа занимаются обычно абстрактными вопросами или же решением специальных математических задач, связанных с явлениями, вполне выясненными в принципиальном отношении, но требующими точного количественного описания. Последняя область обычно выделяется в особую специальность, называемую математической физикой. Представители ее являются скорее математиками, чем физиками; отнесение их к той или иной категории имеет сугубо условный характер и зависит от

---

задачи: принципиальные и практические. Принципиальные задачи сводятся к объяснению и предвидению физических явлений, практические — к расчету тех величин, которыми эти явления характеризуются, для более удобного их технического использования.

Точное вычисление констант, характеризующих простейшие физические системы, имеет существенное значение в качестве испытания правильности основных принципов теории. После того как, однако, она блестяще выдержала это испытание, нет никакого смысла подвергать ее новым испытаниям в применении к более сложным системам. Подобного испытания не может выдержать самая идеальная теория из-за практически непреодолимых математических трудностей, на которые она неизбежно наталкивается в применении к сложным системам. В этом случае от теории требуется лишь правильное истолкование общего характера величины и закономерностей, относящихся к подобной системе. Физик-теоретик в этом отношении подобен художнику-карикатуристу, который должен воспроизвести оригинал не во всех деталях, подобно фотографическому аппарату, но упростить и схематизировать его таким образом, чтобы выявить и подчеркнуть наиболее характерные черты. Фотографической точности можно и следует требовать лишь от теоретического описания простейших систем. Хорошая теория сложных систем должна представлять собой лишь хорошую «карикатуру» на эти системы, утрирующую те свойства их, которые являются наиболее типичными, и умышленно игнорирующую все остальные, несущественные свойства.

того, какими вопросами, помимо вышеуказанных, они занимаются — чисто математическими или физическими.

Установив, таким образом, место теоретической физики и ее представителей в общей системе физико-математических дисциплин, мы можем вернуться к теме данной статьи о развитии теоретической физики в нашей стране за последние 30 лет.

В дореволюционной России теоретическая физика как самостоятельная дисциплина была представлена далеко не достаточно, что объясняется очень слабым развитием физики и техники в тот период. Великая Октябрьская социалистическая революция, поставившая задачу превращения экономически и культурно отсталой страны в передовое индустриальное государство, естественно, вызвала бурное развитие физики как основы техники и создала, таким образом, важнейшую предпосылку для возникновения советской теоретической физики.

Выдающуюся роль в создании теоретической физики в России сыграл в начале второго десятилетия XX в. П. С. Эренфест, в то время работавший в Петербурге (впоследствии преемник Г. А. Лоренца на кафедре теоретической физики в Лейдене).<sup>3</sup>

В условиях царской России ростки новой дисциплины, вероятно, скоро бы погибли. В Советской России теоретическая физика сначала развивалась медленно ввиду крайней малочисленности первого отряда советских физиков-теоретиков, а затем, по мере роста этого отряда и развития экспериментальной и технической физики в нашей стране, все быстрее и быстрее. В дальнейшем мы остановимся на важнейших направлениях работы советских физиков-теоретиков.

## 2. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Первая существенная работа по эйнштейновской теории относительности и тяготения была сделана у нас в 1923 г. А. А. Фридманом, который показал, что космологические выводы из этой теории не ограничиваются замкнутым статическим миром Эйнштейна или Шварцшильда, но имеют гораздо более общий характер, совместный с монотонным (или периодическим) изменением радиуса кривизны мирового пространства с течением времени.

Работа Фридмана имела большое значение не потому, что она выдвигала новую космологическую теорию, более правильную, чем предыдущие, а потому, что она подрывала принципиальные основы прежних статических теорий, считавшихся ранее чуть ли не логическим следствием общей теории относительности.

Эйнштейн пытался сначала оспаривать выводы Фридмана, но, в конце концов, вынужден был согласиться с ними.

Работу Фридмана можно рассматривать как своего рода дискредитацию космологических теорий, базировавшихся на общей теории относительности и тяготения, т. е. как доказательство невозможности вывести из нее однозначным образом правильную космологическую теорию, что с философской точки зрения представляется весьма важным результатом.

Другой весьма крупной работой по эйнштейновской теории относительности и тяготения является работа В. А. Фока, опубликованная в 1939 г. и посвященная приближенному решению проблемы  $n$  тел (материальных точек). При этом Фок показал, что не только ньютоновский закон взаимного притяжения между этими телами, но и ньютоновский закон движения каждого из них под влиянием остальных может быть выведен из общих уравнений гравитационного поля, не прибегая к каким-либо добавочным принципам. Следует напомнить, что в первоначальной формулировке теории Эйнштейна движение какого-либо тела в заданном внешнем поле определялось как движение по геодезической линии, т. е. по прямой (или кратчайшей) линии в искривленном четырехмерном мире; это определение представляло собой, следовательно, обобщение принципа инерции. Таким образом, Фоку удалось показать, что в общей теории относительности принцип инерции не имеет самостоятельного значения и может быть нацело сведен к законам, определяющим гравитационное поле в зависимости от положения и движения создающих его и движимых им материальных тел. Этот результат напоминает основной результат лоренцевой динамики электромагнитного поля, содержащего электроны, заключающийся в том, что сила инерции каждого электрона трактуется как результирующая электромагнитных сил, с которыми действуют друг на друга элементы его электрического заряда; при этом

уравнение движения электрона в заданном внешнем поле сводится к равенству нулю полной силы, которую он испытывает, т. е. суммы внешней силы и силы электромагнитного «самовоздействия», что эквивалентно принципу сохранения энергии и количества движения поля.

Фока не ограничился первым, наиболее грубым приближением в решении уравнений задачи  $n$  тел, но рассмотрел также поправки к ньютоновским законам взаимодействия и движения, которые вытекают во втором приближении из эйнштейновской теории относительности.

Несколько позже Фока и независимо от него совершенно аналогичные результаты были получены Эйнштейном в сотрудничестве с Гофманом и Инфельдом.

Существенным вкладом в развитие эйнштейновской теории является также работа Г. А. Манделя (1930 г.), который показал, что путем присоединения к четырем измерениям пространственно-временного мира еще одного, особого, пятого измерения можно достигнуть формального объединения гравитационного и электромагнитного полей.\* Необходимо отметить, что подобное объединение гравитационных и электромагнитных эффектов в единую теорию поля выставлялось Эйнштейном в качестве одного из важнейших пунктов программы дальнейшего развития теории относительности.

Гораздо многообразнее работы советских теоретиков в области теории квантов и квантовой теории атомных явлений.

Работы эти относятся главным образом к дальнейшему развитию той обновленной и углубленной формы теории квантов, которую она получила в 1925—1928 гг. после работ Гейзенберга, де Бройля, Шредингера и Дирака.

Здесь следует упомянуть прежде всего ряд работ, связанных с дальнейшим обобщением квантовой механики в сторону общей теории относительности, со включением в уравнения Дирака членов, учитывающих гравитационные силы (работа Д. Д. Иваненко о матричной геометрии, в дальнейшем развивавшаяся другими исследователями, работа Иваненко и Фока о параллельном переносе спиноров и, в частности, волновой функции уравнения Дирака в смысле общей теории относительности, 1929 г.).

---

\* Несколько позже Манделя аналогичная теория была развита за границей Т. Калуцей.

К той же серии работ по релятивистской формулировке законов квантовой механики (в пределах, однако, специальной теории относительности) относятся работы Фока (отчасти, совместно с Дираком и Подольским) по релятивистской трактовке задачи о многих электронах в связи с применением принципов квантовой механики к электромагнитному полю. При этом оказывается возможным вывести как законы изменения этого поля, так и законы движения электронов, его создающих, из одного уравнения, трактуя поле и электроны как две взаимодействующие части одного целого.

Как впервые показал Дирак, число электронов, взаимодействующих с квантованным электромагнитным полем, может изменяться при одновременном появлении или исчезновении позитронов. В. А. Фок ввел для описания этих явлений изящный и удобный математический формализм, использующий понятие о функционалах, формализм, который может применяться и к другим аналогичным явлениям.

### **3. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНЫХ ЯДЕР**

Наиболее существенные и многочисленные вклады советских физиков-теоретиков в разработку квантовой теории сделаны главным образом в области ее применений к различным конкретным задачам, относящимся к свойствам элементарных частиц и образованных ими материальных тел.

Проблема элементарных частиц ставится в квантовой механике совсем по-иному, чем в механике классической. Прежде всего свойства этих частиц оказываются скрытыми в формализме описывающих их уравнений гораздо глубже, чем в классической теории. Так, например, пишущий эти строки, исходя из своей прежней релятивистской, но не квантовой теории вращающегося электрона, предложил в 1928 г. описывать соответствующие электронам волны системой уравнений, являющихся непосредственным обобщением уравнений Максвелла для световых волн.

Почти одновременно Дирак решил вопрос об электронных волнах своим знаменитым уравнением, в которое входили величины нового спинорного (полувекторного)





*И. Е. Тамм и Н. Бор. Москва, 1961 г.*

типа. А в 1937 г. французский физик Прока показал, что обобщенные уравнения Максвелла описывают не электроны, но новооткрытые частицы — мезоны, обладающие тем же зарядом, что и электроны, но большей массой и, главное, целочисленным спином (и, следовательно, подчиняющиеся статистике Бозе, а не Ферми).

Дирак показал в 1930 г., что состояния с отрицательной кинетической энергией или массой, в которых могут находиться электроны, описываемые найденным им уравнением, могут быть интерпретированы, если допустить, что почти все эти состояния заняты электронами и обнаруживаются при своей вакантности в виде позитронов, открытых экспериментально Андерсоном.

И. Е. Тамм, основываясь на теории Дирака, первый провел ряд интересных расчетов, относящихся к явлению аннигиляции, т. е. взаимного уничтожения, электронно-позитронных пар с образованием фотонов, а также к возникновению и исчезновению подобных пар на промежуточном этапе при рассеянии света свободными электронами. Эта работа содержала в зародыше различные нелинейные эффекты, связанные с теорией Дирака и осно-

ванной на ней электродинамике. Сюда относятся возникновение электронно-позитронных пар при столкновении заряженных частиц (Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц), рассеяние света на положительных ядрах путем возникновения и исчезновения подобных пар (А. И. Ахиезер и И. Я. Померанчук), рассеяние света на свете (Ахиезер) и ряд других эффектов.

К этим вопросам примыкают также расчеты эффективных сечений при различного рода столкновениях между элементарными частицами.

В последнее время молодые советские теоретики изощряются в весьма сложных вычислениях, относящихся к этой области и требующих превосходного владения математическим аппаратом квантовой механики. Некоторые вычисления, связанные с преодолением принципиальных затруднений (например, работы Д. Д. Иваненко и А. А. Соколова, а также В. Л. Гинзбурга по вопросу об устранении бесконечных эффективных сечений при рассеянии мезонов на ядерных частицах), представляют не только математический, но и принципиальный интерес.

Оставляя в стороне ряд работ чисто вычислительного характера, мы должны отметить работу, сделанную рядом советских «квантистов» по теории взаимодействия элементарных частиц. В свое время новый путь в этом направлении был проложен Дираком, который показал, что кулоновское взаимодействие между электронами может быть формально описано (при расчетах по методам теории возмущений) как результат «перекидывания» фотонами (фотон — испускаемый одной частицей и поглощаемый другой, как бы осуществляет взаимодействие между ними). И. Е. Тамм, а менее подробно также Д. Д. Иваненко (1935 г.) показали, что, пользуясь этим методом и заменяя фотоны электронно-нейтриновыми парами, которые, согласно теории Ферми, испускаются при  $\beta$ -распаде радиоактивных ядер, можно в принципе описать взаимодействие между ядерными частицами. Правда, полученные результаты оказались мало удовлетворительными. Однако они в дальнейшем были улучшены японским теоретиком Юкава, который объединил электронно-нейтринную пару в одну более тяжелую частицу, массу которой ему удалось определить приблизительно из радиуса действия ядерных сил. Эта гипотетическая частица, совпа-

дающая по всем признакам с найденным позже мезоном, способна спонтанно распадаться на электрон и нейтрино. Этот процесс наблюдается в космических лучах. По теории космических лучей советским квантистам также принадлежит ряд интересных работ, особенно по теории ливней, где И. Е. Тамму и Л. Д. Ландау, а также Д. Д. Иваненко и А. А. Соколову (1938 г.) и в последнее время И. Е. Тамму и С. З. Беленькому (1946 г.) удалось получить математически точные решения.

Возвращаясь к вопросам ядерной физики, исследованным или решенным советскими теоретиками, мы должны отметить высказанную Д. Д. Иваненко в 1932 г. идею о том, что сложные атомные ядра не содержат электронов, но состоят из протонов и нейтронов. Еще раньше (в 1930 г.) Иваненко выдвинул мысль о том, что появляющиеся при  $\beta$ -превращениях электроны не вылетают в готовом виде из ядер, а возникают при изменении заряда последних, подобно тому как фотоны возникают при переходе атомов из одного состояния в другое с меньшей энергией.

Эти идеи, несколько позже развитые Гейзенбергом, составляют основу современной теории строения атомных ядер.

Существенное значение для описания процессов возбуждения и распада сложных ядер имеют представления о температуре ядра, его нагревании при поглощении протона, нейтрона или какой-либо другой частицы и о последующем испарении, высказанные автором в 1936 г., после опубликования работы Бора о связи между частицами в сложном ядре. Эта статистическая теория получила также интересное развитие в работах Л. Д. Ландау по густоте уровней в ядре, которую он оценил путем применения к последнему статистики Ферми.

Тотчас же по опубликовании работы Гана и Штрассмана, сообщавшей о делении ядер урана под влиянием медленных нейтронов, мной (1939 г.) была развита теория электрокапиллярного деления этих ядер, основанная на представлении Бора о сложных ядрах как о капельках особого рода жидкостей и аналогичная рэлеевской теории дробления наэлектризованных капель проводящей жидкости. Эта теория позволяет объяснить то обстоятельство, что периодическая система элементов обрывается на уране; впрочем, для этого теорию электрокапиллярного деления

пришлось дополнить теорией, определяющей (на основании статистики Ферми) нормальное соотношение между зарядом и массой ядра, т. е. между числом образующих его протонов и нейтронов, обеспечивающее его устойчивость по отношению к  $\beta$ -превращениям. Аналогичные соображения, в значительно более разработанной форме, были развиты несколько позже Бором и Уилером.

Деление ядра урана или, точнее, его легкого изотопа  $U^{235}$  («актиноурана») под влиянием захвата медленного нейтрона сопровождается, как известно, появлением 2—3 новых, более быстрых нейтронов. Таким образом, оказывается обеспеченной предпосылка для развития цепной реакции взрыва большой массы актиноурана.

В обычном уране подобный взрыв не может иметь места, так как атомы основного тяжелого изотопа ( $U^{238}$ ), захватывая нейтроны, не расщепляются, но претерпевают последовательно два  $\beta$ -превращения, приводящих к образованию плутония. Особенно «жадно» они захватывают нейтроны с энергией около 25 в. В весьма интересной работе, опубликованной в 1940 г., Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон показали, что достаточно относительно небольшого обогащения обычного урана его легким изотопом для того, чтобы обеспечить возможность цепной реакции, приводящей к лавинообразному возрастанию числа нейтронов.

Из других работ советских физиков по теории ядерных процессов следует упомянуть о работе В. Б. Берестецкого и А. Б. Мигдала по кинетике деления ядра урана в связи с критикой вычислений Бора и Уилера, а также работу автора, пытавшегося объяснить характерную для этого деления асимметрию (неодинаковость массы обоих осколков) исходя из представления о туннельном эффекте.

К теоретическим достижениям советских физиков можно также отнести открытие Русиновым и Юзефовичем явления ядерной изомерии, или, вернее, интерпретацию этого явления как результата перехода ядра в возбужденное метастабильное состояние. Ряд молодых теоретиков, в особенности Берестецкий и Завелевич, немало потрудились над расчетом вероятности электронной конверсии при переходе из метастабильных состояний в нормальное, т. е. отдачи избыточной энергии ядра одному из ближайших электронов окружающей его оболочки.

Теория ядерных процессов находится в настоящее время в зачаточном состоянии. Развитие ее требует углубления наших знаний о природе элементарных частиц материи, их взаимных превращениях, их появлении и исчезновении. Эти метаморфозы элементарных частиц представляют собой явления совершенно нового типа, исключавшиеся в классической физике, где принцип сохранения материи сводится к принципу неизменности ее элементарных частиц. Следует также упомянуть новую работу автора (1945 г.), в которой показывается, что с точки зрения теории относительности сложные частицы должны трактоваться как материальные точки с внутренними степенями свободы и, в принципе, не могут быть описаны как совокупность более простых частиц.

#### 4. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Несовершенная и незаконченная форма современной квантовой теории вполне достаточна в качестве принципиальной основы для практически безукоризненного и исчерпывающего объяснения всех физических явлений, не затрагивающих целостности атомных ядер. В этом отношении современная квантовая механика играет такую же роль, как механика Ньютона с ее законом всемирного тяготения и законами движения по отношению к проблемам небесной механики. Несмотря на всю принципиальную грандиозность той перестройки, которой теория Ньютона подверглась у Эйнштейна, в применении к вопросам движения небесных тел, ввиду их сравнительно небольших относительных скоростей, теория Эйнштейна дает результаты, практически (в пределах точности обычных астрономических наблюдений) не отличающиеся от результатов, вытекающих из теории Ньютона.

Поскольку электроны в атомах и молекулах имеют скорости, далекие от скорости света, поведение их может быть описано с вполне достаточной даже для спектроскопии точностью нерелятивистской квантовой механикой Гейзенберга-Шредингера, в крайнем случае с введением релятивистских поправок, которые могут быть заимствованы из приближенной формы уравнения Дирака и уравнений квантовой электродинамики.

Основываясь на этой приближенной и, по существу, предварительной форме законов квантовой механики,

можно, в принципе, дать исчерпывающее объяснение всех физических, физико-химических и химических свойств атомов, молекул и материальных тел, а также установить теоретически характер и закономерности всевозможных явлений, разыгрывающихся в них (и не нарушающих целостности атомных ядер).

Не следует думать, что решение всех этих вопросов сводится к чисто математической задаче — интегрированию уравнений квантовой механики для рассматриваемой совокупности неизменных частиц (ядер, электронов).

При большом числе частиц такая задача является практически совершенно неразрешимой. Дело физика-теоретика заключается в том, чтобы заменить ее несравненно более простой математической задачей, допускающей фактическое решение и вместе с тем сохраняющей достаточную степень сходства с оригиналом по всем важнейшим признакам.

Советские физики-теоретики имеют немало заслуг в изучении на основе квантовой механики такого рода объектов, начиная от простейших атомов и кончая кристаллическими телами с охватом всевозможных электрических, магнитных и оптических явлений, которые обуславливаются взаимодействиями электрических зарядов электронов и ядер.

Здесь нужно прежде всего упомянуть работы В. А. Фока по расчету распределения электронов в сложных атомах и строению их спектров, основанные на применении метода самосогласованного поля, введенного Хартри и усовершенствованного Фоком с учетом эффекта квантового обмена. Можно также отметить несколько работ, посвященных вопросам квантовой химии, т. е. расчету строения и свойств простейших молекул. Однако наиболее существенные и многочисленные работы советских теоретиков по применению квантовой теории к вопросам строения и свойств материи относятся не к атомам и молекулам, а к твердым телам, в особенности к металлам, а также диэлектрикам и полупроводникам.

Из работ по теории металлов я позволю себе отметить свои собственные исследования, как хронологически наиболее ранние. Еще перед самой революцией (в начале 1917 г.) мной была развита теория скачков потенциала в поверхностном слое металлов, а также их поверхностного натяжения на основе представлений боровской квантовой

теории строения атомов. В 1924 г. эти представления были обобщены мной на случай движения так называемых свободных электронов в металлах, причем впервые было показано, что кинетическая энергия этих электронов, вопреки представлениям классической теории Друде, практически не зависит от температуры, но определяется чисто квантовыми условиями, связанными с тем, что характер орбитального движения валентных электронов около отдельных атомов частично сохраняется, дополняясь последовательным переходом их от одних атомов к соседним, в чем и заключается их «освобождение» или, вернее, коллективизация.

В этой же работе была впервые вычислена на указанной основе электропроводность металлов; однако эта первая теория электропроводности, несмотря на то что она приводила к правильным результатам, оказалась, по существу, неправильной, так как основывалась на использовании эйнштейновского соотношения между подвижностью и коэффициентом диффузии, предполагающем применимость законов классической статистики.

Наконец, в этой работе была дана теория сил сцепления в металлах, основанная на притяжении положительных ионов омывающей и пропитывающей их электронной жидкостью. Правильная и логически последовательная теория металлической проводимости, основанная на представлении о рассеянии электронных волн тепловыми флюктуациями плотности металлов в соответствии с принципами волновой механики Шредингера, была дана мной в 1927 г. В 1928 г. после появления работ Ферми, Паули и Зоммерфельда по квантовой статистике электронного газа я модернизировал свою старую теорию двойного электрического слоя на поверхности металлов, а также развил теорию релятивистского вырожденного газа и показал, что давление его может обеспечить равновесное состояние вещества в звездах при учете сил тяготения, но только в звездах ограниченной массы, близкой к массе Солнца.

Эта работа нашла свое дальнейшее развитие у Л. Д. Ландау, который показал, что при увеличении массы звезд и увеличении энергии электронов последние должны захватываться протонами, превращая их в нейтроны, что, в конце концов, может привести к образованию сверхплотного нейтронного «ядра» звезд. Таким образом,

оказывается возможным до некоторой степени восстановить старую теорию о том, что энергия, излучаемая сверхплотными звездами карликовых размеров, черпается за счет энергии сил тяготения.\*

Исходя из рассмотрения квантовомеханического эффекта электронного обмена в отдельных атомах и в металлах, я выдвинул в 1928 г. общепринятое ныне представление о происхождении спонтанного намагничивания в некоторых металлах. В 1930 г., совместно с Я. Г. Дорфманом, мной было впервые дано объяснение того факта, что ферромагнитные тела стремятся разбиваться на «домены», т. е. области с различными (в среднем компенсирующимися) направлениями спонтанного намагничивания, вследствие борьбы размагничивающих магнитных сил и намагничивающих обменных сил.

Две фундаментальные работы по теории магнетизма были опубликованы Л. Д. Ландау.

В первой из них (1930 г.) путем применения квантовой механики к модели электронного газа в металлах он показал, что этот газ, в противоположность выводам классической теории, обладает диамагнетизмом, составляющим одну треть спинового парамагнетизма, найденного Паули. Во второй работе (совместно с Лифшицем) Ландау дал полную теорию разбиения одноосного ферромагнетика на плоские домены, параллельные оси легкого намагничивания, учтя при этом энергию анизотропии, которая совершенно игнорировалась в нашей с Дорфманом теории. Следует отметить замечательный факт, вытекающий из обеих теорий и подтверждаемый на опыте, что размеры доменов зависят от размеров всего тела. Ландау и Лифшиц в своей работе также распространили теорию намагничивания на случай переменных магнитных полей, вычислив зависимость магнитной восприимчивости от частоты колебаний.

Фундаментальное значение для развития учения о ферромагнетизме и в особенности технической кривой намагничивания имела феноменологическая теория Н. И. Акулова (1930 г.) о явлениях магнитной анизотропии и магнитострикции (использованная частично

\* В случае обычных звезд излучение обесцвечивается энергией, выделяющейся при синтетических ядерных реакциях (в особенности превращения водорода в гелий), которые протекают в недрах звезд при температурах порядка десятков миллионов градусов.



и в только что упомянутой работе Ландау — Лифшица). В дальнейшей разработке теории технической кривой намагничивания путем перемещения границ между доменами и вращения вектора спонтанного намагничивания с учетом влияния внутренних и внешних упругих напряжений весьма существенное участие приняли советские физики С. В. Вонсовский и, в особенности, Е. И. Кондорский.

Большое принципиальное значение имеет полярная модель металлов, в частности, ферромагнитных металлов, разработанная в 1934—1935 гг. С. П. Шубиным и С. В. Вонсовским, основанная на модельном представлении об «электронных парах» и «дырках», наличием которых объясняется электропроводность металлов и разные аномалии в поведении ферромагнетиков. В этой теории переход части электронов с одних атомов, превращаемых в дырки, т. е. положительные ионы, к другим, превращаемым в двойки, или отрицательные ионы, предполагался спонтанным, т. е. не зависящим от температуры и связанным с уменьшением полной энергии системы.

#### **5. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ИЗОЛЯТОРОВ**

Совершенно аналогичные представления были введены мной несколько раньше (1932 г.) в теорию электронных полупроводников с той лишь разницей, что в этом случае рассматриваемый переход, приводящий к образованию подвижных электронов и положительных дырок, требует затраты энергии и поэтому совершается лишь под влиянием теплового движения.

Понятие о подвижных дырках было впервые введено мной в 1926 г. в связи с изучением нарушений правильности в строении ионных (солеобразных) кристаллов при повышении температуры и обусловленной этими нарушениями электропроводностью. Представление о том, что последняя объясняется тепловой диссоциацией части ионов, т. е. срывом их из узлов кристаллической решетки, было высказано Иоффе в 1924 г. Количественная же разработка теории электрических свойств гетерополярных диэлектрических кристаллов на основе этого представления, дополненного представлением о подвижных ионных дырках, была осуществлена мной. Ввиду большой массы

ионов квантовые эффекты при этом не играют практически никакой роли, в то время как в случае электронных полупроводников роль их весьма существенна.

Возвращаясь к электронным полупроводникам, необходимо отметить прежде всего ряд важных работ советских физиков-теоретиков по вопросам, связанным с прохождением электрического тока — электронного или дырочного — через контакт между двумя полупроводниками или между полупроводником и металлом. Сюда относятся в первую очередь работы Д. И. Блохинцева, Б. И. Давыдова и С. И. Пекара (1937 г.) о контактном сопротивлении и об эффекте выпрямления тока, а также работы Пекара и автора этой статьи о возрастании проводимости полупроводников в сильных полях (эффект Пуля).

В основе теории Давыдова и Пекара лежит представление о том, что изменение контактного сопротивления (в частности, асимметричное изменение, приводящее к выпрямлению) зависит от изменения концентрации электронов или дырок в сторону увеличения или уменьшения под влиянием внешнего электрического поля.

Интересные исследования были выполнены также по вопросам, связанным с внутренними свойствами полупроводников, зависимостью их проводимости от концентрации примесей (Френкель, 1940 г.), по теории различных гальваномагнитных эффектов и в особенности по теории своеобразного эффекта, открытого И. К. Кикоиным и М. М. Носковым и заключающегося в появлении электродвижущей силы при одностороннем освещении полупроводниковой пластинки, помещенной в параллельное ее плоскости магнитное поле. Качественное объяснение этого явления было дано мной, а количественная теория разработана Ландау.

Л. Д. Ландау, совместно с А. С. Компанейцем, дал статистическую или, вернее, кинетическую теорию немасвелловского распределения скоростей между электронами в полупроводнике под влиянием сильного электрического поля, обуславливающего повышение средней энергии электронов.

Совершенно аналогичная теория для электронов в плазме газового разряда была разработана голландским физиком Драйвестейном и затем разработана более совершенным образом Давыдовым (1937 г.). Им была предложена весьма интересная теория электрического пробоя

газов, основанная на представлении о ступенчатой ионизации атомов, т. е. ионизации атомов, предварительно возбужденных (по крайней мере дважды) электронным ударом. Ввиду того что пробой твердых кристаллических диэлектриков внешне весьма сходен с пробоем газов, необходимо допустить, в случае справедливости представлений Давыдова, что и в кристаллах диэлектриков атомы могут не только ионизироваться, но переходить в возбужденное состояние без отрыва от них соответствующего электрона.

Исследуя этот вопрос в 1931 г., я показал, что состояние возбуждения может при этом перемещаться от одного атома к другому, подобно электрону или дырке, т. е. путешествовать по всему кристаллу, подобно элементарной частице, в соответствии с общими законами квантовой механики. Эти псевдочастицы были названы мной экситонами. При этом было показано, что поглощение света в кристаллах сводится к образованию экситонов, найдены правила отбора, определяющие спектры поглощения света в диэлектрических кристаллах при низких температурах, и выяснен механизм превращения экситонов в фононы, т. е. в энергию теплового движения. В более поздней работе (1936 г.) мной была показана неприменимость вильсоновской схемы электронных уровней в полупроводниках к описанию нормальных и, отчасти, возбужденных состояний диэлектрических кристаллов. К сожалению, это обстоятельство до сих пор игнорируют многие физики, что при интерпретации фотоэлектрических явлений в диэлектриках и полупроводниках часто приводит их к разного рода фиктивным трудностям.

Интересные схемы электронных уровней в ионных кристаллах были предложены П. С. Тартаковским. В чрезвычайно интересной работе, опубликованной в 1932 г., И. Е. Тамм показал, что наряду с обычными уровнями, соответствующими движению электронов внутри кристалла, существуют дополнительные поверхностные уровни, соответствующие движению электронов по поверхности кристалла или, если угодно, закреплению его на этой поверхности.

Фундаментальное значение имеет также работа И. Е. Тамма и С. П. Шубина о внешнем фотоэлектрическом эффекте в металлах (1931 г.). В этой работе было показано, что фотоэффект складывается из двух состав-

ных частей — поверхностного, который обусловлен скачком потенциала на поверхности металла, и внутреннего, который зависит от периодических колебаний потенциала внутри металла.

Из других работ, связанных с оптическими явлениями в кристаллах (особенно диэлектриков), следует отметить работы Л. И. Мандельштама и М. А. Леонтовича и, в особенности, И. Е. Тамма (1929 г.) по теории комбинационного рассеяния света в кристаллах, открытого в 1928 г. И. Раманом, Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландсбергом.

При этом И. Е. Тамм впервые дал последовательную квантово-механическую теорию этого процесса, установив зависимость стоксовых и антистоксовых компонент от температуры, и ввел в физику представление о квантах звука или фононах.<sup>4</sup>

Весьма большой интерес имеет работа И. Е. Тамма и И. М. Франка по теории эффекта, открытого П. А. Черенковым в лаборатории С. И. Вавилова и под его руководством, — своеобразного излучения, испускаемого прозрачным телом (твердым или жидким) при движении в нем электрона со скоростью, превышающей скорость распространения света в этом теле (аналог маховской ударной волны в акустике).<sup>5</sup> Теория Тамма и Франка получила дальнейшее развитие в ряде работ В. Л. Гинзбурга.

Следует упомянуть также о работах М. А. Леонтовича по теории рассеяния света неравномерно нагретым телом, а также поверхностью жидкости и, в особенности, о работах Д. И. Блохинцева и В. В. Антонова-Романовского по теории фосфоресценции кристаллов. Последний автор экспериментально доказал, что высвечивание фосфоров обуславливается рекомбинационным механизмом, который в зависимости от концентрации положительных центров может иметь как бимолекулярный, так и мономолекулярный характер. Кроме того, Антонов-Романовский экспериментально обосновал представление о том, что тепловые электроны в кристалле имеют гораздо меньшую подвижность, чем электроны, обладающие большими энергиями (например, вырываемые светом в первое время своего существования). Эта малая подвижность объясняется процессом «самоареста», или прилипания, электронов в идеальной кристаллической решетке, правильность которой нарушается присутствием этих электронов, вызы-

вающих деформацию решетки около тех атомов, через которые они проходят и на которых в результате этой деформации задерживаются.

Вопрос этот был впервые рассмотрен Л. Д. Ландау, который связывал его с явлением активации, необходимой, по его мнению, для процесса «связывания» электрона и исключаящей возможность этого процесса при низких температурах, т. е. именно тогда, когда тенденция к этому связыванию, обусловленная сопутствующим уменьшением энергии, оказывается особенно сильно выраженной. Этот вопрос был несколько позже рассмотрен мной статистически в связи с различными явлениями в полупроводниках и в особенности диэлектриках, которые могут быть объяснены с этой точки зрения. При этом мной было указано, что аналогичное связывание должно иметь место в случае подвижных положительных дырок, а также в случае экситонов, ликвидация которых путем превращения их энергии в энергию фотонов оказывается, по-видимому, возможной только при переходе через такое связанное состояние. Наконец, в самое последнее время С. И. Пекар дал строгую квантовомеханическую теорию связывания электронов в ионных решетках, для которых сопутствующее уменьшение энергии особенно велико. Ему удалось фактически вычислить эту энергию и применить полученные результаты к количественному объяснению многих интересных оптических свойств ионных кристаллов.

Из других исследований теоретического характера по физической оптике следует упомянуть об интересных работах С. И. Вавилова и его сотрудников (особенно В. Л. Левшина) по люминесценции растворов, в которых были теоретически выяснены и экспериментально проверены различные стороны этого явления, в частности вопрос о тушении флюоресценции под влиянием различных факторов и ее поляризации в зависимости от возраста раствора (точнее, растворителя).

Большой интерес представляют работы А. А. Власова и В. С. Фурсова по теории поглощения света в газах в связи со взаимодействием между атомами и вытекающая отсюда форма спектральных линий в спектре испускания и поглощения газов. Эти работы являются, по-видимому, наиболее удачным решением данного вопроса.

К указанным выше работам по теории кристаллов относится также ряд работ И. Я. Померанчука и

А. И. Ахиезера по квантовой теории магнитных и, в особенности, тепловых свойств кристаллов при низких температурах. В частности, Померанчуку удалось объяснить некоторые аномалии в тепловых свойствах ферромагнитных тел путем использования понятия о «магнонах», т. е. частицах, связанных со спиновыми волнами, которые были исследованы ранее Ф. Блохом в связи с теорией ферромагнетизма. Далее, Померанчук показал, что для объяснения конечной теплопроводности кристаллов необходимо рассматривать ангармонические эффекты, связанные с членами не только третьего порядка (как это предполагалось раньше), но и четвертого порядка малости. Померанчук также впервые развил теорию рассеяния и дифракции медленных нейтронов в кристаллах с учетом дополнительных эффектов, вызываемых наличием беспорядочно распределенных изотопов.

Последнее обстоятельство было несколько ранее принято во внимание И. М. Лифшицем в его теории рассеяния инфракрасных лучей ионными кристаллами. Наличие изотопов проявляется в этом случае в появлении, наряду с наиболее быстрыми резонансными колебаниями (остаточные лучи), колебаний меньших частот (соответствующих конечным длинам волн). Рассматриваемая работа интересна не только по своим результатам, относящимся также к влиянию посторонних примесей, но и в методическом отношении; И. М. Лифшиц разработал чрезвычайно удобный и изящный матричный метод расчета разнообразных явлений, связанных с колебаниями кристаллической решетки. Несколько ранее тем же автором был опубликован ряд других интересных работ о нарушениях правильности в строении реальных кристаллов твердых растворов, а также различных явлений, обусловленных этими нарушениями, в особенности при рассеяниях рентгеновских лучей.

## **6. ТЕОРИЯ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Одной из главных областей физики, развитие которой связано с успехами советских теоретиков, является теория жидкого состояния. Прежние теории исходили из сближения жидкого состояния с газообразным. В 1926 г. мной была впервые развита кинетическая теория жидкостей

на основе представления о сходстве жидкостей при температурах, близких к температуре кристаллизации, со свойствами соответствующих твердых тел. При этом мной была использована модель жидкости,<sup>6</sup> объединяющая в смысле характера теплового движения свойства твердых тел, с одной стороны, и газов — с другой (комбинация колебательного движения около некоторых равновесных положений с перескоком из одних положений в соседние). Исходя из этого представления, можно построить количественную теорию (обычной) вязкости жидкостей, позволяющую объяснить наблюдаемую на опыте зависимость ее от температуры и от давления. Эту теорию удалось развить дальше, правда, несколько формальным образом, в сторону молекулярно-кинетического объяснения механических, электрических и отчасти оптических свойств жидкостей (с анизотропными молекулами), связанных с разного рода релаксационными явлениями. Кроме того, кинетическая теория жидкостей позволила объяснить прерывный характер процесса плавления и кристаллизации, исходя из принципиальной непрерывности между твердым (кристаллическим) и жидким (аморфным) состояниями, при неустойчивости или отчасти метастабильности ряда промежуточных состояний (подобно тому, как это имеет место в теории Ван-дер-Ваальса). С позиций современной кинетической теории жидкостей представляет большой интерес их вторая, или объемная, вязкость, обнаруживающаяся весьма резким образом в связи с тем фактом, что поглощение звуковых и в особенности ультразвуковых колебаний в жидкостях бывает обычно во много раз, иногда даже в сотни и тысячи раз больше, чем то, которое вытекает из учета обычной вязкости жидкостей по теории Навье—Стокса. Факт этот с формальной стороны объясняется весьма просто тем обстоятельством, что жидкости обладают двоякого типа вязкостью, из коих одна (обычная) связана с тангенциальными усилиями, возникающими при изменениях формы, т. е. при обычном течении, а другая — с нормальными напряжениями, обусловленными изменениями объема (плотности). Последнее обстоятельство, т. е. наличие у жидкостей объемной вязкости, до недавнего времени совершенно игнорировали.

Полуфеноменологическая теория ее происхождения в связи с различными релаксационными процессами

в жидкостях была дана в 1935 г. М. А. Леонтовичем и Л. И. Мандельштамом, а также мной и Ю. Н. Образцовым.

Упомянутые выше теории совершенно не учитывают квантовых эффектов, которые должны обнаруживаться при достаточно низких температурах. Единственной жидкостью, не замерзающей (при обычном давлении) даже при абсолютном нуле температуры, является жидкий гелий. Экспериментальные исследования ряда физиков, в особенности П. А. Капицы, обнаружили наличие у гелия при температурах ниже  $2.19^{\circ}\text{K}$  своеобразное явление сверхтекучести, которое Л. Д. Ландау удалось объяснить путем применения к этой жидкости новой квантовой гидродинамики, основанной на представлении о возможности совмещения в каждой точке жидкого потока двух различных скоростей — «мертвого», или вырожденного, гелия и «живого», невырожденного, в связи с представлением о существовании некоторой «щели», т. е. разрыва, в спектре энергии этого вещества. Эти парадоксальные идеи привели Ландау к предсказанию существования в жидком гелии II, наряду с обычными звуковыми колебаниями, связанными с колебаниями давления, колебаний второго рода, связанных в основном с колебаниями температуры (или энтропии). Теория эта, приведенная к более конкретной форме Е. М. Лифшицем, была затем блестяще подтверждена на опыте Пешковым. Несмотря на эти успехи, концепция Ландау в ряде отношений представляется спорной и, по-видимому, может быть заменена менее парадоксальной концепцией, основанной на последовательном применении к гелию статистики Бозе, которой должны подчиняться атомы гелия. Последняя концепция была развита еще в 1937 г. Ф. Лондоном. Однако Лондону не удалось учесть взаимодействия между атомами гелия, который он трактовал как идеальный газ, ввиду чего намеченная им программа оставалась невыполненной. Эту программу удалось недавно (в 1946 г.) выполнить советскому математику Н. Н. Боголюбову, который показал, что свойство сверхтекучести гелия может быть объяснено исходя из статистики Бозе при учете преобладания сил отталкивания между атомами над силами притяжения. Этим, между прочим, можно было бы объяснить отсутствие сверхтекучести у жидкого водорода, молекулы которого характеризуются сравнительно большим сцепле-



нием друг с другом. Явление сверхтекучести жидкого гелия внешне весьма сходно с явлением сверхпроводимости, наблюдаемым у ряда металлов и сплавов при очень низких температурах. Хотя удовлетворительной молекулярной теории сверхпроводимости до сих пор не существует,<sup>7</sup> однако Л. Д. Ландау удалось показать, что переход сверхпроводящего сплава в обычное состояние (с нормальным электрическим сопротивлением) под влиянием магнитного поля осуществляется через ряд промежуточных состояний, которые характеризуются чередованием сверхпроводящих слоев с постепенно утолщающимися (за их счет) слоями с конечным сопротивлением. Существование этой слоистой структуры, напоминающей слоистое строение одноосных ферромагнетиков, было на опыте подтверждено А. И. Шальниковым.

## 7. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Наиболее отсталой областью современной теоретической физики является, как это ни странно, область явлений, наиболее, казалось бы, обыденных и понятных с качественной стороны, а именно, явлений, связанных с механическими свойствами твердых тел — кристаллических и поликристаллических. Сюда относится, например, проблема пластичности кристаллов, в которую до сих пор не удалось внести ясности, несмотря на ряд попыток.

Одной из таких попыток, относящихся к линейной модели кристалла, является работа автора совместно с Т. А. Конторовой (1938 г.), в которой была впервые решена задача о распространении дислокаций, лежащих, согласно Тейлору, в основе пластической деформации.

Представляет интерес работа Т. А. Конторовой о межкристаллических прослойках между сдвойникованными областями, в которой развита теория, совершенно аналогичная теории переходных зон между соседними доменами, т. е. областями спонтанного намагничивания в ферромагнетиках.

Следует также отметить несколько работ того же автора совместно со мной по статистической теории прочности, а также работы А. П. Александрова и С. Н. Журкова.

Более серьезные успехи были достигнуты, в частности, советскими физиками в вопросе о технической прочности

твердых тел, т. е. о малости этой прочности по сравнению с теоретической прочностью, вытекающей из электронной теории междучастичных сил. Здесь следует в особенности отметить классические работы А. Ф. Иоффе, которому удалось объяснить дефицит прочности поверхностными трещинами, механизм возникновения которых остается, впрочем, до сих пор еще не вполне выясненным, несмотря на обнадеживающие в этом отношении работы А. В. Степанова, который связывает их возникновение с предварительными пластическими деформациями.<sup>8</sup>

В последние годы Степанов пытается развить новую теорию прочности твердых тел, связанную с представлением о зародышах разрушения, которые могут обратимо возрастать и уменьшаться, пока не достигнут некоторого критического размера, после чего наступает необратимое разрушение тела. В случае кристаллических тел характер этого разрушения существенным образом зависит от их анизотропии.

К аналогичным представлениям, независимо от Степанова, пришел Гарбер в отношении процесса двойникования кристаллов. В последнее время основы количественной теории этих процессов были заложены И. В. Обреимовым и И. М. Лифшицем.

## 8. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ И СТАТИСТИКИ

Наряду с указанными выше специальными вопросами советские теоретики выполнили ряд существенных работ в области общих вопросов статистической и термодинамической теории материальных тел. Из относящихся сюда работ нужно прежде всего назвать работы Л. Д. Ландау по общей термодинамической теории фазовых превращений (1936 г.). Эти работы являются, пожалуй, наиболее крупным вкладом в термодинамику гетерогенных систем со времени классических исследований Гиббса. Теория Ландау относится, впрочем, лишь к превращениям второго рода, связанным с точками Кюри (пиками теплоемкости и коэффициента теплового расширения), в частности, к превращениям, характеризуемым исчезновением дальнего порядка в расположении частиц, и почти не касается превращений первого рода, связанных со скачкообразным изменением энтропии и объема. Кроме того,

Ландау не принимает во внимание флуктуаций, за исключением одной работы о сверхструктурных рентгеновских линиях в бинарных сплавах вблизи точек Кюри. Это обстоятельство существенным образом ограничивает физическую значимость его выводов, так как термодинамическая теория, игнорирующая флуктуации, принципиально исключает как неустойчивые, так и метастабильные состояния, тогда как последние осуществляются и наблюдаются в действительности. Она приводит, между прочим, к физически не вполне оправданному противопоставлению кристаллических и жидких тел, несмотря на сохранение в последних ближнего порядка, который можно трактовать как флуктуации дальнего порядка или анизотропии, свойственной кристаллам.

В 1946 г. Н. Н. Боголюбов опубликовал две фундаментальные работы по основам статистической механики, связанные с развитием идеи о введении последовательности функций распределения частиц молекулярной системы — по одной, по две, по три и т. д. Эта идея высказывалась и ранее разными авторами, но не получала сколько-нибудь значительного математического развития. Боголюбов дал общий метод составления этой последовательности функций как для статистически равновесного состояния, описываемого обычно распределением Гиббса, так и для неравновесного, для которого общей теории до сих пор вовсе не существовало. Он указал также некоторые приближенные методы решения соответствующих уравнений для уже ранее исследованных случаев разреженных газов и разбавленных растворов электролитов. Я уверен, однако, что метод Боголюбова удастся применить и к более сложным конденсированным системам, в частности, к жидкостям.\*

Следует также отметить несколько работ Б. И. Давыдова, посвященных вопросу об увеличении энтропии молекулярных систем, в которых он пытается свести это увеличение к вмешательству экспериментатора при измерении энтропии (в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга). Соображения Б. И. Давыдова,

---

\* По-видимому, аналогичный метод, независимо от Боголюбова, был несколько позже разработан Борном (в Англии). Следует заметить, что этот метод можно рассматривать как обобщение метода самосогласованного поля.<sup>9</sup>

безусловно, интересны; однако мне лично они представляются весьма сомнительными.

Выше упоминались работы Давыдова по статистической кинетике, т. е. статистической теории необратимых процессов, связанных с приближением к равновесному состоянию. К этому же вопросу относятся некоторые работы Л. Д. Ландау, а также Л. Э. Гуревича, выпустившего книгу «Основы физической кинетики».

Большой принципиальный интерес представляют также работы молодого, безвременно скончавшегося в 1947 г., теоретика Н. С. Крылова, собранные в его докторской диссертации (но, к сожалению, до сих пор еще не опубликованные),<sup>10</sup> о новой общей теории необратимых процессов, не пользующейся вовсе понятием энтропии и ограничивающейся исследованием «распыления» точек, представляющих состояние рассматриваемой молекулярной системы в конфигурационном пространстве с течением времени.

#### 9. ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ, ГЕОФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

К работам по теоретической физике можно было бы отнести ряд интересных теоретических исследований А. Н. Фрумкина, Б. В. Дерягина, П. А. Ребиндера, В. Г. Левича и других по различным вопросам молекулярной физики, в особенности в области капиллярных и электрокапиллярных явлений, а также работы Н. Н. Семёнова и Я. Б. Зельдовича по теории распространения горения и взрывов.

Однако эти исследования производились под знаменем физической химии или химической физики и реферируются в соответствующих статьях, ввиду чего мы можем лишь весьма бегло коснуться их в этом обзоре. А. Н. Фрумкину принадлежат фундаментальные работы по теории электрокапиллярной кривой и диффузного ионного слоя, обуславливающего явления электрокапиллярности, по образованию пузырьков пара (при кипении) или газа при электролитическом выделении, по скачку электрического потенциала в растворах электролитов.

Далее, А. Н. Фрумкин дал термодинамическое обоснование явления расклинивающего действия тонких слоев жидкости, открытого и экспериментально изученного

Б. В. Дерягиным, который построил на его основе количественную теорию стабилизации и коагуляции коллоидов.

П. А. Ребиндер установил экспериментально и теоретически понижение твердости под влиянием адсорбции поверхностно-активных веществ и обнаружил весьма важный для теоретического понимания структуры твердых тел факт существования в них микропористости, связанной, вероятно, с мозаичной структурой.

В. Г. Левич дал интересное решение вопроса о поверхностной вязкости адсорбированных слоев, а также об успокаивающем действии тонких масляных пленок на волнение водной поверхности.

Среди работ по теории поверхностных явлений отмечу также свою работу 1924 г. о теории явлений адсорбции и конденсации молекулярных пучков на поверхности твердых тел, в которой было дано количественное объяснение критической температуры конденсации; существование ее было открыто Кнудсенем и изучено Н. Н. Семеновым и Ю. Б. Харитоновым.

Различные области науки, в частности физики, не могут быть резко разграничены. Поэтому расчленение физики на теоретическую физику и экспериментальную и выделение из нее вопросов физико-химического и даже «чисто» химического характера связаны с очень болезненными и уродливыми ампутациями. Следуя, однако, общепринятой классификации наук, мы не будем рассматривать дальнейшее развитие советской теоретической физики в области физической химии и химии.

Я считаю, однако, необходимым прибавить несколько слов о работах советских теоретиков в области дисциплин, связанных с применением общих физических теорий к специальным явлениям на Земле и на небе, т. е. к геофизике и астрофизике.

Что касается геофизики, то здесь на первое место следует поставить работы И. А. Кибеля по теоретическому прогнозу погоды, исходя из развитых им методов приближенного решения уравнений гидродинамики атмосферы. В последнее время в связи с установлением ряда центров активности атмосферы методы Кибеля дают возможность создания долгосрочных прогнозов на целый сезон. Далее, необходимо указать на работы В. В. Шулейкина, относящиеся отчасти к той же теме, а также проблеме движе-

ния земных полюсов и, в особенности, к физике моря (включая несколько весьма интересных и оригинальных работ о механике движения рыб и других обитателей пресных и морских вод).

Советские теоретики добились за последнее время ряда важных результатов в области турбулентности, в частности атмосферной турбулентности. Следует особенно отметить работы А. М. Обухова по этим вопросам.

Наконец, я должен упомянуть о новой теории явлений атмосферного электричества, которая была развита мной за последние 3 года, исходя из рассмотрения облаков как аэрозоля, взвешенного в ионизованной атмосфере. Сюда же примыкает новая концепция о происхождении земного магнетизма в результате самовозбуждения электрических токов в жидком металлическом ядре земного шара, трактуемого как особого рода турбогенератор. Эта концепция была развита мной на основе аналогичной концепции, которую Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский развили для объяснения магнитного поля солнечных пятен.

Я уже упоминал выше о некоторых работах (своих и Ландау), относящихся к проблеме строения звезд. К этому следует прибавить чрезвычайно интересные новые работы О. Ю. Шмидта о происхождении кратных звезд, а также планетной системы путем «захвата» одних небесных тел (в частности, метеоров) другими (например, растущими планетами).

## 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В заключение этой статьи мы рассмотрим вкратце развитие теоретической физики в СССР в направлении математики, или математической физики. Последняя, как правило, заключается в решении на высоком математическом уровне задач, в частности, технического характера, совершенно ясных с качественной стороны, но требующих точного количественного решения.

Наиболее крупные работы в этом весьма важном направлении, которое до сих пор еще не получило у нас должного развития, принадлежат В. А. Фоку и Г. А. Гринбергу.

В 1927 г., развивая идеи, высказанные Н. Н. Семеновым и А. Ф. Вальтером, Фок дал исчерпывающую тео-

рию теплового электрического пробоя диэлектриков, т. е. электрического пробоя, обусловленного их саморазогревом. Далее, В. А. Фок разрабатывал теорию скин-эффекта в кольце, воспользовавшись для этого тороидальными функциями. В. А. Фок обнаружил и исправил ошибку в известной теории Зоммерфельда о распространении радиоволн вдоль земной поверхности. Ему принадлежат блестящие работы математического характера по всевозможным вопросам физики и техники — от квантовой механики многоэлектронных систем до теории фотометрии или теории каротажа.

В последние годы (1945—1946) В. А. Фок занимался теорией распространения радиоволн вдоль земной поверхности. При этом ему впервые удалось решить весьма трудную задачу, поставленную еще Пуанкаре, об огибании радиоволнами поверхности земного шара, а также различных локальных неровностей этой поверхности.

Г. А. Гринберг проложил ряд новых путей в математической физике, систематически развивая и применяя к решению конкретных электростатических и магнитостатических задач мощные новые математические методы, основанные на использовании, с одной стороны, интегральных уравнений, связывающих электрическое и магнитное поля с поверхностными зарядами погруженных в него диэлектриков или намагничивающих тел, и, с другой стороны, теории интегральных преобразований типа преобразований Лапласа, лежащих в основе операционного исчисления (1937 г.). Аналогичные методы были применены им в последнее время с исключительным успехом к решению задач о распространении радиоволн вдоль земной поверхности при произвольном изменении электропроводности и диэлектрической постоянной с высотой или глубиной, и притом не только для «плоской», но и для шарообразной Земли, т. е. в гораздо более общих предположениях, чем в теории Зоммерфельда. Особенно интересный и изящный приближенный метод, основанный на использовании работ С. М. Рытова по теории скин-эффекта, был применен им для решения задач о береговой рефракции радиоволн, т. е. распространении их вдоль поверхности моря (идеально проводящей), ограниченной произвольными береговыми линиями (при конечной проводимости земной поверхности).

Наряду с теорией электромагнитного поля Г. А. Гринберг с большим успехом разрабатывал математическую теорию различных электронных и ионных приборов или, вернее, совершающихся в них колебательных процессов, преодолев ряд трудностей, перед которыми спасовали крупнейшие математики как у нас, так и за границей. В частности, им была впервые развита (совместно с В. С. Лукошковым) теория разрезного магнетрона (1934 г.), цилиндрического диода с магнитным полем и исследованы начальные стадии прохождения тока в плоском диоде при импульсном приложении анодного напряжения. Весьма интересная работа по этому вопросу была также сделана И. М. Лифшицем.

Из этой серии работ следует особенно отметить работу Г. А. Гринберга (1942 г.) о фокусировке катодных лучей в постоянных электромагнитных полях, в которой решается вопрос о выборе поля, обеспечивающего желаемый тип фокусировки. Эта работа внесла совершенно новую и свежую струю в электронную оптику и будет, несомненно, иметь большое значение для практики.

Наконец, Г. А. Гринбергом совместно с сотрудниками (М. И. Конторовичем и Н. Н. Лебедевым) была решена задача о развитии во времени теплового пробоя конденсаторов, исследован и решен труднейший вопрос о коротком замыкании в маслonaполненной кабеле и ряд других кабельных задач.

Все эти исследования Г. А. Гринберга имеют весьма существенное значение для электротехники и радиотехники.

Следует также отметить ряд интересных работ учеников и сотрудников Г. А. Гринберга — Н. Н. Лебедева и М. И. Конторовича — по теории дифракции радиоволн с помощью методов, разработанных Гринбергом. К этому же вопросу относятся исследования В. А. Введенского, Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси по распространению радиоволн вдоль земной поверхности, в которых некоторые новые результаты были получены использованием старых громоздких методов Зоммерфельда, Ватсона и других иностранных исследователей (1940—1941 гг.).

Важные для физики и техники работы по теории нелинейных колебаний были выполнены Л. И. Мандельштамом и его сотрудниками (в частности, А. А. Андронно-



вым), а также Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым (монография которых переведена на английский язык).

Наконец, необходимо указать на большую роль, которую сыграли для развития математической физики в нашей стране, а также для создания в ней школы прикладной математики и математической физики работы А. Н. Крылова и, в частности, его капитальный труд «О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих применения к техническим вопросам».

## АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ОСВОБОЖДЕНИЕ

### I. ПРЕВРАЩЕНИЕ ВОДОРОДА В ТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

#### § 1. ГИПОТЕЗА ПРОУТА И ЯВЛЕНИЕ ИЗОТОПИИ

**А**томные веса большинства легких элементов по отношению к наиболее легкому из них (водороду) выражаются, как известно, приблизительно целыми числами. Это обстоятельство еще на заре развития атомистической теории (свыше ста лет тому назад) привело англичанина Прюта к мысли о том, что атомы различных элементов, более тяжелых чем водород, состоят из атомов водорода в количестве, равном их весу по отношению к водороду.

Дальнейшее усовершенствование методов определения атомных весов подорвало, однако, гипотезу Прюта, так как в ряде случаев, особенно в случае тяжелых элементов, были обнаружены резкие отступления атомных весов от целочисленности по отношению к водороду. Эти отступления подразделяются на два вида, из которых первый имеет систематический, а второй случайный характер. Систематические отступления сводятся к тому, что атомные веса большинства элементов выражаются числами, близкими к целым, не по отношению к водороду, а к некоторой единице, которая примерно на 8<sup>0</sup>/<sub>100</sub> (8 десятых процента) меньше массы водородного атома, составляя примерно 1/4 атомного веса гелия, 1/12 атомного веса углерода, 1/16 атомного веса кислорода и т. д. В современной химии в качестве единицы атомного веса принимается обычно 1/16 массы кислородного атома. При таких

условиях атомный вес водорода выражается цифрой 1.008; атомные же веса других элементов, в особенности не очень тяжелых, выражаются, если не всегда, то как правило, числами, близкими к целым.

Применение новых электромагнитных методов точного взвешивания атомов при движении их в условиях электрического разряда в газах, когда они приобретают положительные заряды вполне определенной величины (см. ниже), показало, что в случаях более или менее резкого отступления от указанного выше «исправленного» правила целочисленности, атомы соответствующего элемента разделяются на две или более группы с приблизительно целочисленными весами, отличающимися друг от друга на одну, две или несколько единиц. В обычных условиях эти группы смешаны друг с другом в вполне определенных неизменных пропорциях, так что средний атомный вес образуемого ими элемента может значительно отличаться от целого числа. Так, например, металлический элемент литий, средний атомный вес которого (по отношению к  $1/16$  атомного веса кислорода) равен 6.94, представляет собой смесь атомов с весом 6 и 7, со значительным численным преобладанием последних. Инертный элемент неон, имеющий средний атомный вес 20.18, представляет собой в действительности смесь двух неонов с различными целочисленными весами: «легкого» неона с атомным весом, близким к 20, и «тяжелого» неона с атомным весом, близким к 22. Аналогичным образом хлор состоит из двух различных хлоров с атомными весами 35 и 37, смешанных друг с другом в отношении, приблизительно равном 3:1, что соответствует среднему атомному весу 35.5.

Не останавливаясь на других примерах, заметим лишь, что различные разновидности одного и того же химического элемента, отличающиеся друг от друга по своему весу (при одинаковости всех других физико-химических свойств), называются изотопами, так как они занимают одно и то же место в периодической системе элементов Менделеева; они обозначаются одним и тем же символом, к которому присоединяется в качестве верхнего индекса целое число, близкое к их атомному весу (по отношению к  $1/16$  атомного веса кислорода), например  $\text{Li}^6$  и  $\text{Li}^7$ ,  $\text{Ne}^{20}$  и  $\text{Ne}^{22}$  и т. д. Число изотопов у некоторых тяжелых элементов может достигать десятка и даже

более (например, у ртути их имеется 12). Атомные веса соседних изотопов отличаются обычно на 1—2 единицы. При этом один из изотопов находится обычно в резко преобладающем количестве, определяя собой средний вес соответствующего элемента. Так, например, кислород наряду с основным изотопом  $O^{16}$  содержит в качестве незначительной примеси изотопы  $O^{17}$  и  $O^{18}$ . Гелий<sup>1</sup> является одним из немногих чистых элементов, представленных всего лишь одним  $He^4$ . Что же касается водорода, то, наряду с основным изотопом  $H^1$ , он содержит примесь тяжелого изотопа  $H^2$  с атомным весом, близким к 2. Этот тяжелый изотоп водорода, открытый в 1933 г., получил название «дейтерий»; в отличие от него легкий изотоп называется «протием».

На первый взгляд представляется естественным объяснить отклонение среднего атомного веса водорода от 1 на  $8^0/_{00}$  примесью тяжелого изотопа. Для этого последний должен был бы составлять  $8^0/_{00}$  по числу атомов или  $16^0/_{00}$  по своему общему весу в смеси с легким изотопом. В действительности, однако, как показывает опыт, содержание тяжелого водорода в обычном (смешанном) элементе оказывается в 16 раз меньше (один атом тяжелого изотопа приходится на 5000 атомов легкого).

## § 2. ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРЕВРАЩЕНИИ ВОДОРОДА В БОЛЕЕ ТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Открытие явлений изотопии является блестящей реабилитацией гипотезы Проута в несколько уточненной форме, а именно: при учете смешанного состава обыкновенного водорода она заключается в том, что легкий изотоп водорода (протий) представляет собой структурную единицу всех других более тяжелых атомов, в том числе и атомов тяжелого водорода (дейтерия).

Наличие систематического отклонения от правила целочисленности атомных весов по отношению к протию, выражающееся в том, что атомные веса чистых изотопов представляют собой числа, близкие к целым по отношению к единице, на  $8^0/_{00}$  меньшей веса протия, в настоящее время не может считаться возражением против этой гипотезы, так как со времени установления Эйнштейном в 1905 г. теории относительности мы знаем, что закон

сохранения массы в его обычной форме является неточным. Масса любой системы частиц изменяется с ее энергией на величину, равную изменению энергии, деленному на квадрат скорости света; в частности, масса системы, образованной соединением нескольких частиц, должна быть меньше суммы масс этих частиц на величину, равную энергии, выделяющейся при их соединении друг с другом (и измеряющей прочность их связи), деленной на квадрат скорости света. Таким образом, уменьшение массы атомов протия при соединении их в более тяжелые атомы на  $7-8^0/_{00}$  является непосредственным следствием эйнштейновского закона эквивалентности между энергией и массой и может быть использовано для непосредственного вычисления энергии, выделяющейся при этом соединении. Нетрудно видеть, что энергия, соответствующая  $8^0/_{00}$  массы протия, равна кинетической энергии, которой обладал бы атом протия, двигаясь со скоростью, равной примерно  $1/8$  скорости света, т. е. около 40 тыс. км/сек. (скорость света равна 300 тыс. км/сек.). В переводе на тепловые единицы (калории) это означает, что при соединении одного грамма атомов водорода, точнее, протия, в более сложные атомы (сопровождающемся потерей веса около  $8^0/_{00}$ ) выделяется энергия порядка 200 млн. больших калорий. Для того чтобы составить себе представление о величине этой энергии, заметим для сравнения, что она примерно в миллион раз больше той энергии, которая выделяется при соединении одного грамма свободных водородных атомов друг с другом (в двухатомные молекулы) или с атомами каких-либо других элементов, обладающих химическим сродством к водороду. Другими словами, энергия, которая должна была бы выделиться при превращении одного грамма водорода, скажем, в гелий или какой-либо другой более тяжелый элемент равна по порядку величины энергии, выделяющейся в форме тепла при сгорании 1 т водорода, т. е. химическом соединении его с 8 т кислорода.

То обстоятельство, что при химических реакциях изменения массы не наблюдается, объясняется относительной малостью энергии связи атомов (водорода и других элементов) в молекулах по сравнению с энергией связи атомов протия в более тяжелых атомах, ими образуемых.

### § 3. ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ И ТРАНСМУТАЦИИ ВОДОРОДА В ЗВЕЗДАХ

Итак, мы видим, что превращение водорода в более тяжелые элементы должно сопровождаться выделением колоссальной атомной энергии, превышающей в миллионы раз энергию обычных химических реакций. Естественно, возникает вопрос: почему же это превращение не осуществляется само собой в обычных условиях, существующих на земном шаре? Мы привыкли думать, что всякая материальная система, обладающая повышенной энергией, стремится перейти в состояние с меньшей энергией, отдавая свою избыточную энергию окружающим телам в форме кинетической энергии, тепла, света и т. д. Такое положение вещей встречается, однако, скорее как исключение, нежели как правило. В большинстве случаев система, даже при наличии у нее избыточной энергии, находится в относительно устойчивом состоянии.

Эта относительная устойчивость, или метастабильность, выражается в том, что для выведения системы из исходного состояния необходимо сначала еще более увеличить ее энергию, или, как говорится, сообщить ей некоторую энергию активации, после чего она уже самопроизвольно переходит на более низкий энергетический уровень. Степень устойчивости метастабильного состояния характеризуется высотой потенциального или активационного барьера, отделяющего его от абсолютно неустойчивого состояния, которое служит как бы водоразделом между исходным состоянием и конечным, с меньшей энергией. Простейшим примером этих соотношений может служить небольшое количество воды, налитое в стакан, стоящий на столе. Для того чтобы вода могла пролиться на пол, что соответствует уменьшению ее энергии, необходимо сначала поднять ее до уровня краев стакана (в предположении, что последний не может опрокинуться). Аналогичным образом обстоит дело с химическим равновесием. Так, например, водород и кислород не соединяются друг с другом при комнатной или более низкой температуре, хотя это соединение сопровождается выделением большого количества тепла. Эта метастабильность образуемой ими смеси (гремучего газа) объясняется тем, что оба газа состоят из двухатомных молекул. Для того чтобы обеспечить соединение молекулы водорода

с атомом кислорода, необходимо предварительно расщепить молекулу кислорода на два атома. Энергия, необходимая для этого расщепления, и представляет собой, грубо говоря, энергию активации для рассматриваемой реакции. При достаточном повышении температуры эта энергия активации может быть заимствована у энергии теплового движения, мерой которого является абсолютная температура системы.

В случае химических реакций температура, необходимая для преодоления активационного барьера, т. е. для «зажигания» реакции, измеряется тысячами градусов. Так как энергия активации имеет тот же порядок величины, что и энергия, выделяющаяся при реакции (последняя бывает обычно в несколько раз больше), то естественно предположить, что в случае «алхимических» реакций, связанных с превращением водорода в более тяжелые элементы, энергия активации также примерно в миллион раз превосходит энергию активации химических процессов и что поэтому температура, необходимая для осуществления этих алхимических реакций, должна измеряться не тысячами, но миллиардами градусов. Такая температура в земных условиях недостижима. Наиболее высокая температура, которой удавалось достигнуть на Земле искусственным путем, если не считать атомной бомбы (см. ниже), не превышала нескольких десятков тысяч градусов.<sup>2</sup>

Заметим для сравнения, что температура наружных слоев Солнца составляет около  $6000^{\circ}\text{C}$ . Существуют, однако, весьма веские основания в пользу того, что в недрах Солнца, а равным образом и других звезд, в особенности вблизи их центра, температура может достигать значений порядка нескольких десятков миллионов градусов. При таких температурах, как мы увидим ниже, алхимические реакции трансмутации легкого изотопа водорода (протия) в более тяжелые атомы (дейтерия, гелия и т. д.) могут происходить со значительной скоростью. Выделяемая при этом атомная энергия оказывается достаточной для поддержания столь высоких температур, подобно тому, как теплота, выделяющаяся при горении угля, достаточна для поддержания температуры, необходимой для этого горения, несмотря на отток тепла наружу.

В случае Солнца и других звезд атомная энергия, освобождающаяся в их недрах за счет «синтетических»

атомных процессов, изливается наружу в форме света. Расчеты показывают, что атомной энергии, связанной с расходом начального запаса водорода в Солнце, достаточно для поддержания его излучения на нынешнем уровне в течение по крайней мере 100 млрд. лет.

До обнаружения этого атомного или алхимического источника энергии, излучаемой Солнцем, источником последней считалась потенциальная энергия силы тяжести. При этом, как показал еще Гельмгольц, энергии, выделяемой при сжатии Солнца от гипотетического чрезвычайно разреженного состояния до нынешнего состояния с плотностью, близкой к плотности воды, хватило бы для поддержания излучения Солнца всего лишь на 80 млн. лет, тогда как твердая оболочка Земли существует уже свыше 5 млрд. лет. Отсюда видно, что энергии силы тяжести, выделяющейся при постепенном сжатии Солнца и других звезд, может хватить лишь для того, чтобы довести температуру их недр до величины порядка нескольких десятков миллионов градусов, при которой начинается процесс «сгорания» водорода, т. е. его превращения в более тяжелые элементы, тогда как дальнейшее продолжение этого алхимического горения поддерживается благодаря сопровождающему его выделению атомной энергии.

Любопытно, что, живя за счет энергии, излучаемой Солнцем, видя ее непосредственно в форме света, человечество до последнего времени не подозревало о том, что она представляет собой не что иное, как трансформированную атомную энергию, выделяющуюся в недрах Солнца.

## II. СТРОЕНИЕ СЛОЖНЫХ АТОМОВ И ДЕЛЕНИЕ ИХ НА ПРОСТЫЕ

### § 4. СТРОЕНИЕ АТОМА ВОДОРОДА (ПРОТИЯ)

Изложенные выше соображения и выводы имеют несколько спекулятивный или, вернее, формальный характер, поскольку они вытекают лишь из рассмотрения атомных весов различных элементов в связи с явлением изотопии и эйнштейновским соотношением между массой и энергией, представляя собой дальнейшее развитие воскресшей и модернизированной гипотезы Проута о том, что атомы водорода (протия) являются элементарными кир-



пичиками, из которых сложены все остальные, более тяжелые атомы.

Для конкретизации более солидного обоснования этой гипотезы, т. е. для превращения ее в настоящую физическую теорию, необходимо выяснить, каким образом осуществляется это сложение или, вернее, слияние атомов водорода, другими словами, каким образом построены сложные атомы. Для этого, однако, необходимо прежде всего выяснить, что представляет собой атом водорода.

Атом водорода, или, точнее, протий, не является простейшей неделимой частицей, каким его представлял себе Прюит. Он состоит из двух частиц с равными и противоположными электрическими зарядами — электрона и протона. Электрон имеет отрицательный заряд, равный приблизительно  $5 \cdot 10^{-10}$  абсолютных электростатических единиц (CGSE), и чрезвычайно малую массу, примерно в 2000 раз меньшую, чем масса водородного атома; таким образом, носителем всей этой массы практически является положительно заряженный протон.

О геометрических размерах электрона и протона нельзя сказать ничего определенного. Возможно, что само понятие об этих размерах (соответствующее представлению о твердых шариках) в применении к элементарным частицам не имеет смысла. Можно лишь утверждать, что во всех наблюдаемых явлениях электроны и протоны ведут себя как заряженные точки.

При прохождении быстро движущихся протонов, разогнанных с помощью сильного электрического поля до больших скоростей, через газообразный водород они испытывают в основном торможение, зависящее от их взаимодействия с электронами атомов водорода, и лишь сравнительно редко отклоняются от первоначального направления на значительные углы в результате столкновений с принадлежащими этим атомам протонами. Подобные столкновения не следует представлять себе как удар двух упругих шариков. В действительности они сводятся лишь к кратковременному сближению обоих протонов — движущегося и неподвижного, при котором сила электрического отталкивания, возрастающая обратно пропорционально квадрату расстояния, становится достаточно большой для того, чтобы вызвать значительное отклонение налетающего протона от первоначального направления движения, причем ранее неподвижный протон отбрасы-

вается в сторону под прямым углом к новому направлению движения первого протона.

Подробный анализ столкновений протонов с протонами показывает, что они ведут себя как заряженные точки вплоть до расстояний порядка  $10^{-13}$  см, которые поэтому можно трактовать как верхний предел для их геометрических размеров. Заметим, что протон, движущийся с начальной скоростью порядка  $1/10$  скорости света, может пройти в газообразном водороде при обычном давлении путь, равный приблизительно 1 м и обнаруживающийся благодаря ионизации встречных атомов, т. е. вырыванию связанных с ними электронов, прежде чем затормозится вследствие отдачи энергии этим электронам. При этом большинство протонов не испытывает значительных отклонений; для того чтобы испытать отклонение порядка  $90^\circ$ , протон, летящий с указанной скоростью, должен сблизиться с одним из неподвижных протонов на расстояние порядка  $10^{-12}$  см.

#### § 5. СТРОЕНИЕ БОЛЕЕ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ И СЛОЖНЫЕ АТОМНЫЕ ЯДРА

Ионы водорода, встречающиеся, например, при электролизе воды или при электрическом разряде в газообразном водороде и трактующиеся обычно как атомы водорода, потерявшие электрон, представляют собой не что иное, как протоны. Впрочем, наряду с протонами при этом встречаются, хотя и относительно редко (в одном случае на 5000), ионы тяжелого водорода, или дейтерия, имеющие такой же заряд, как и ионы протия, но вдвое большую массу. Таким образом, атом дейтерия состоит из одного электрона, так же как и атом обыкновенного легкого водорода, но роль протона в нем играет частица с тем же зарядом, но с вдвое большей массой — так называемый дейтон.

Можно ли при таких условиях говорить о том, что атом дейтерия состоит из двух атомов протия? Это утверждение может считаться справедливым лишь в том случае, когда элементы атома дейтерия слагаются из элементов двух атомов протия, т. е. двух протонов и двух электронов. При этом возникает существенное осложнение, заключающееся в том, что один из электронов исче-

зает, компенсируя положительный заряд одного из протонов, который тем самым превращается в нейтральную частицу с практически той же массой, которая прочно связывается с другим протоном, образуя «ядро» атома дейтерия — дейтон. Изучение столкновений протонов с дейтонами показывает, что размеры последних, характеризующиеся расстоянием между образующими их двумя частицами, близки к  $10^{-13}$  см.

Таким образом, нейтральная частица, образованная слиянием протона и электрона, в отношении своих размеров (поскольку о них вообще может идти речь) не отличается существенным образом от протона. Эту нейтральную частицу называют нейтроном.

Нейтроны могут быть получены в свободном состоянии путем бомбардировки дейтерия быстрыми протонами или же в результате столкновения двух быстро движущихся дейтонов друг с другом. В последнем случае, наряду со свободным нейтроном, возникает частица с атомным весом 3 и зарядом, равным заряду двух протонов. Эта частица представляет собой ядро легкого изотопа атома гелия ( $\text{He}^3$ ), практически не встречающегося в природе в естественных условиях.

Нормальный гелий имеет атомный вес 4 при том же самом заряде ядра, которое, следовательно, состоит из 2 протонов и 2 нейтронов. В нейтральном атоме гелия с этим ядром связано 2 электрона, компенсирующих его положительный заряд. Линейные размеры нейтральных атомов водорода (легкого и тяжелого) и гелия, если судить об этих размерах по длине пути, проходимого соответствующими атомами в газообразном водороде или гелии от одного столкновения до другого, имеют порядок  $10^{-8}$  см. Эти так называемые «газокинетические» размеры определяются величиной орбит, по которым электроны движутся вокруг положительных ядер под влиянием электрической силы притяжения. Таким образом, среднее расстояние между этими ядрами и электронами измеряется стомиллионными долями сантиметра. Эти, казалось бы, ничтожно малые расстояния оказываются, однако, чрезвычайно большими по сравнению с размерами, которые можно приписать ядрам дейтерия и гелия, т. е. частицам (ионам), остающимся после изъятия электронов. Размеры, определяемые столкновениями рассматриваемых ядер друг с другом и измеряемые наибольшими

расстояниями между образующими их протонами и нейтронами, имеют порядок нескольких десятибиллионных долей сантиметра ( $10^{-13}$  см), т. е. оказываются примерно в 100 тысяч раз меньше размеров нейтральных атомов.

Изложенная выше схема строения атомов дейтерия и гелия из атомов протия или, вернее, из составляющих их элементов — протона и электрона, а также из результата их слияния (нейтрона) применима и к другим, более тяжелым атомам. Так, например, элемент литий (третий по величине своего среднего веса среди существующих элементов) состоит, как мы знаем, из двух изотопов с атомным весом 6 и 7. Оба изотопа имеют одинаковую электронную оболочку, состоящую из 3 электронов, и ядра с одинаковым положительным зарядом, равным заряду 3 протонов. Это означает, что оба ядра состоят из 3 протонов, причем легкое содержит, помимо них, 3 нейтрона, а тяжелое — 4. Самый тяжелый из встречающихся на Земле в естественных условиях элементов — уран состоит из двух изотопов с атомным весом 238 и 235 (последний составляет примерно полпроцента по отношению к первому). Оба они имеют одинаковую электронную оболочку, состоящую из 92 электронов. Соответственно этому ядра их содержат по 92 протона, причем ядро тяжелого урана содержит, кроме того,  $238 - 92 = 146$  нейтронов, а ядро легкого урана, или, как его иногда называют, «актиноурана» — на 3 нейтрона меньше.

#### **§ 6. ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРОТОНОВ И НЕЙТРОНОВ В СЛОЖНЫХ ЯДРАХ**

Из приведенных примеров явствует, что различие между изотопными элементами сводится к различию между числом нейтронов в ядре, тогда как заряды этих ядер, а вместе с ними и числа электронов в оболочке оказываются одинаковыми.

К сказанному следует добавить, что при одинаковости этих оболочек (и соответствующих ядерных зарядов) все физико-химические свойства атомов, за исключением их веса, являются тождественными. Стандартность физических и химических свойств атомов одинакового сорта, а равным образом стабильность этих свойств, т. е. восстановление их после временного нарушения под влия-

нием различных воздействий, представляют собой характерную черту атомов, отличающую их от планетных систем, миниатюрной копией которых они являются. Дальнейшим примером подобной стандартности и стабильности, неизвестной в обычном мире микроскопических величин и явлений, может служить стандартность и стабильность тех элементарных частиц, из которых состоят атомы — электронов, протонов и нейтронов. Стандартность и стабильность сложных частиц, образуемых ими при соединении друг с другом, удалось в настоящее время объяснить с помощью новой квантовой или волновой механики, заменяющей старую механику Ньютона в явлениях атомного масштаба. Несомненно, что стандартность и стабильность самих элементарных частиц также представляет собой некоторый квантовый эффект, покамест, однако, еще не вполне выясненный.

В дальнейшем изложении мы не будем углубляться в вопрос об этих эффектах и ограничимся замечанием, что они обычно выражаются в дискретном характере состояний, в которых может находиться любая атомная система, и, в частности, в дискретности значений, которые может принимать ее энергия, причем наименьшее из этих возможных значений представляется нормальным, т. е. способным сохраняться при отсутствии внешних воздействий неограниченное время и восстанавливаться автоматически после устранения этих воздействий.

Сказанное относится как к электронным оболочкам, атомов, так и к их ядрам, и, в частности, к соотношению между массой ядер и их зарядом, т. е. между числом протонов и нейтронов в ядре.

В случае относительно легких ядер эти числа бывают обычно равны друг другу (например, в дейтерии, нормальном гелии, легком изотопе лития, а также углерода, азота, кислорода и др.). При переходе к более тяжелым элементам замечается тенденция к постепенному возрастанию пропорции нейтронов по отношению к протонам; в уране первых оказывается примерно на 50% больше последних. Эта естественная пропорция между протонами и нейтронами отнюдь не является случайной; она вытекает из основного условия — минимума общей энергии образуемой ими системы в нормальном ее состоянии, в связи с возможностью взаимного превращения протонов в нейтроны.

Выше говорилось уже о том, что протон может превратиться в нейтрон в результате слияния с электроном.\* Подобный процесс на самом деле наблюдается в случае некоторых неустойчивых атомов, выражаясь в исчезновении одного из внутренних (ближайших к ядру) электронов и одновременном уменьшении заряда ядра на единицу.\*\* Опыт показывает, однако, что тот же самый результат достигается обычно в случае ряда неустойчивых атомов другим способом, а именно, путем испускания протоном его положительного заряда в виде так называемого позитрона (или положительного электрона) с одновременным превращением протона в нейтрон.\*\*\* Что касается испущенного позитрона, то при столкновении (тесном сближении) его с одним из обыкновенных отрицательных электронов в оболочке ли данного или обычно какого-либо другого атома происходит так называемое явление аннигиляции, т. е. взаимного уничтожения позитрона и встречного электрона. При этом выделяется энергия, равная массе обеих частиц, умноженной на квадрат скорости света, испускаемая в окружающее пространство в виде одного или двух фотонов, т. е. световых квантов. Заметим, что экспериментально изучен и обратный процесс: возникновение пары электрон—позитрон при поглощении фотона с достаточно большой энергией. Именно таким путем были впервые обнаружены или, вернее, «созданы» позитроны.

Подобно тому как протон может превращаться в нейтрон путем слияния с электроном или испускания позитрона, нейтрон может превращаться в протон путем испускания электрона или слияния с позитроном. Однако эти превращения фактически осуществляются лишь в том случае, если они являются «выгодными» в энергетическом

---

\* Общие соображения, связанные с законами сохранения энергии, количества движения и момента количества движения, показывают, что при этом слиянии должна испускаться нейтральная частица с ничтожно малой массой, называемая «нейтрино», т. е. маленьким нейтроном.

\*\* Этот процесс называется *K*-захватом, так как ближайший к ядру слой электронной оболочки атома называется слоем *K*. Сложное строение электронной оболочки сложных атомов вытекает из принципов квантовой теории. В частности, химические свойства атомов определяются числом электронов в самом наружном слое.

\*\*\* И испусканием нейтрино.

отношении, т. е. если сопровождаются уменьшением энергии рассматриваемой системы, причем сбрасываемый последней энергетический балласт вылетает наружу в виде фотона, электрона или какой-нибудь другой частицы. Так как нейтрон обладает массой, несколько большей (на 1%), чем масса протона, то представляется возможным превращение свободного нейтрона в протон. Однако в действительности подобные превращения протонов в нейтроны наблюдаются лишь в случае сложных ядер, в которых пропорция между числом протонов и нейтронов отклоняется от нормального значения, отвечающего, очевидно, минимуму энергии всей системы, если избыточная энергия ее в исходном состоянии достаточна для рождения электрона или позитрона, т. е. больше произведения его массы на квадрат скорости света.

Мы не будем вдаваться здесь в рассмотрение вопроса о том, почему и каким образом энергия ядра зависит от соотношения между числом протонов и нейтронов, его образующих. Для нас имеет существенное значение лишь то обстоятельство, что такая зависимость существует и что минимум энергии ядра достигается в случае легких ядер при равенстве между числом нейтронов и протонов, а в случае тяжелых ядер — при некотором избытке первого по отношению к второму.

Этим обстоятельством объясняется тот факт, что в природе не существует устойчивых атомов, ядра которых состояли бы из одних только протонов (например, гелия с атомным весом 2) или одних только нейтронов. В результате ряда процессов, связанных с испусканием  $\beta$ -лучей (быстрых электронов или позитронов), они должны были бы более или менее быстро превратиться в элементы с нормальным, устойчивым соотношением между зарядом ядра и его массой.

Процессы этого рода наблюдаются в случае большого числа радиоактивных элементов, к которым принадлежат наиболее тяжелые элементы, существующие на Земле в естественных условиях, а также еще большего числа искусственных радиоактивных элементов, которые получают из обычных устойчивых элементов путем бомбардировки их свободными нейтронами.

Захватываясь ядром соответствующего элемента, нейтрон превращает его в изотопный элемент с большим

(на 1) атомным весом. Если этот исходный атом являлся наиболее тяжелым из различных устойчивых изотопов, то новый сверхтяжелый изотоп оказывается обычно неустойчивым; избыточный нейтрон превращается в протон с испусканием более или менее быстрого электрона ( $\beta$ -частицы). Этот процесс радиоактивного превращения, так же как и все процессы, связанные со сбрасыванием атомами энергетического балласта в любой форме, протекает по следующему простому закону: в единицу времени превращение испытывает вполне определенная доля исходных атомов. Таким образом, число атомов, не испытавших превращения за некоторое время, убывает с увеличением этого времени по показательному закону. Время, в течение которого превращению подвергается половина исходного числа атомов, называется средним временем их жизни и представляет собой (наравне с максимальной энергией испускаемых  $\beta$ -частиц) характерную для них постоянную величину.

Искусственное получение  $\beta$ -радиоактивных изотопов различных элементов имеет большое значение для физики, химии и биологии, так как позволяет легко обнаружить с помощью меченых радиоактивных атомов различные процессы (распределения, диффузии и т. д.), в которых они участвуют наравне с обычными устойчивыми атомами. Кроме того, искусственные радиоэлементы могут быть использованы для терапевтических целей, заменяя в этом отношении радий или, вернее,  $\beta$ -радиоактивные продукты его распада. В настоящее время с помощью мощных циклотронов, которыми оборудованы многие американские госпитали и которые позволяют получать свободные нейтроны в большом количестве, эти искусственные радиоэлементы готовятся в количествах, эквивалентных многим килограммам радия.

## § 7. ПРИРОДА И ХАРАКТЕР ЯДЕРНЫХ СИЛ

До сих пор мы совершенно не касались вопроса о природе и характере тех сил, которые связывают протоны и нейтроны в ядрах сложных элементов. По этому поводу следует прежде всего отметить тот факт, что это силы притяжения, досточно мощные для того, чтобы противостоять громадным силам электрического отталкивания,



которые действуют между протонами, входящими в состав сложного ядра, на ничтожно малых расстояниях, порядка  $10^{-13}$ — $10^{-12}$  см. Простые соображения, основанные на сравнении энергии различных ядер (по их атомному весу, с использованием эйнштейновского соотношения между энергией и массой) и их геометрических размеров (по столкновениям их с протонами и в особенности с нейтронами, сближению которых с ядрами не мешают электрические поля последних), показывают, что ядерные силы сцепления в одном существенном отношении сходны с обычными силами междумолекулярного или междуатомного сцепления, а именно, в том, что они представляют собой силы «короткодействующие», т. е. обладающие значительной величиной лишь на малых расстояниях, сравнимых с размерами соответствующих частиц. Иными словами, радиус действия ядерных сил сцепления имеет такой же порядок величины (около  $10^{-13}$  см), как и расстояния между соседними частицами (протонами или нейтронами) в сложном ядре, подобно тому как радиус действия обычных междучастичных сил, связывающих друг с другом атомы и молекулы в твердых и жидких телах, имеет порядок  $10^{-8}$  см, т. е. порядок размеров электронных оболочек атомов и, вместе с тем, расстояния между центрами соседних атомов в этих телах. Отличие между ядерными силами и силами междучастичного сцепления сводится к тому, что радиус действия первых в 100 тысяч раз меньше, чем у вторых, а энергия связи — в миллион раз больше.

Эти заключения вытекают из следующих экспериментально установленных фактов.

1) Объемы различных (не слишком легких) ядер, вернее, кубы их радиусов (определенные из столкновений с быстрыми нейтронами в предположении, что ядра имеют шарообразную форму), оказываются пропорциональными их массе, т. е. атомному весу соответствующих элементов. Это означает, что атомные ядра подобны капелькам обыкновенной жидкости в том отношении, что они обладают одинаковой плотностью, не зависящей от размеров (или массы). Нетрудно видеть, что плотность ядерной жидкости примерно в несколько миллиардов раз больше плотности обычных жидкостей.

Учитывая величину ядерных сил и радиусы их действия, можно далее показать, что поверхностное натяже-

ние капель ядерной жидкости имеет порядок  $10^{20}$  дин на см, т. е. что оно примерно в  $10^{18}$  раз больше поверхностного натяжения воды.

2) Связь атомов (или молекул) в обыкновенной жидкости характеризуется скрытой теплотой ее испарения (или конденсации ее пара). Вследствие малости радиуса действия междучастичных сил эта энергия, так же как и плотность жидкости, практически не зависит от размеров образуемой ею капли, за исключением того случая, когда эти размеры малы, т. е. когда капля состоит из небольшого числа частиц (порядка нескольких десятков или сотен). В последнем случае, который как раз соответствует атомным ядрам (наиболее тяжелое из них содержит всего лишь 238 элементарных частиц), энергия испарения оказывается несколько меньше нормы, притом тем меньше, чем меньше размеры капли. Если капля состоит из двух, трех или нескольких частиц, это обстоятельство объясняется весьма наглядным образом. А именно, связь каждой частицы в подобной капле пропорциональна числу ее ближайших соседей, так как с более далекими частицами она практически не взаимодействует. В капле больших размеров энергия связи одной из поверхностных частиц, непосредственно отрывающейся при испарении, также определяется числом ее ближайших соседей, которое уменьшается при увеличении кривизны поверхности капли, т. е. уменьшении ее радиуса. Это соотношение может быть выражено количественным образом, если принять во внимание то обстоятельство, что поверхностное натяжение капли представляет собой меру ее избыточной поверхностной энергии, отнесенной к единице поверхности, и что относительное значение поверхности, т. е. отношение последней к объему или массе капли, возрастет с уменьшением ее радиуса.

Рассматриваемая зависимость энергии связи частиц в капле обыкновенной жидкости от ее радиуса обнаруживается и в случае капель ядерной жидкости, образующих сравнительно легкие атомные ядра. А именно, если судить об энергии связи протонов и нейтронов в ядрах по атомным весам соответствующих элементов по отношению к водороду, то оказывается, что энергия связи не имеет строго постоянной величины, но, по мере увеличения атомного веса, сначала довольно быстро возрастает, достигая максимума при атомном весе около 60, в соот-

ветствии с изложенными выше представлениями,\* а затем, вопреки этим представлениям, начинает снова убывать, несколько более медленным образом, вплоть до урана.

Это убывание объясняется тем обстоятельством, не учтенным нами выше, что капли ядерной жидкости, в противоположность каплям обыкновенной жидкости, имеют электрические заряды, связанные с входящими в их состав протонами. Так как число протонов равно или приблизительно равно числу нейтронов, то заряды ядер растут приблизительно пропорционально атомному весу, а энергия соответствующих электрических сил отталкивания возрастает приблизительно пропорционально квадрату атомного веса.

Так как эти силы действуют против ядерных сил сцепления, то при вычислении энергии связи протонов и нейтронов в тяжелых ядрах электрическую энергию, так же как и поверхностную энергию, следует вычитать из энергии связи, вычисленной при неучете указанных эффектов, т. е. путем простого умножения постоянной энергии связи одной частицы на общее число частиц в ядре. Эти соображения позволяют объяснить не только качественно, но даже, в известном приближении, и количественно зависимость атомных весов различных элементов (по отношению к  $^{1/4}\text{He}$  или  $^{1/16}\text{O}$ ) от соответствующих «массовых чисел», т. е. близких к ним целых чисел, равных сумме числа протонов и нейтронов в ядре, или, следовательно, числу атомов протия, из которых состоит рассматриваемый атом.

#### § 8. ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНАЯ ТЕОРИЯ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР\*\*

Значение вышеизложенной простой теории не ограничивается сказанным. Она приводит к непосредственному объяснению того, на первый взгляд, совершенно непонятного факта, что система устойчивых (или отно-

---

\* Заметим, что связь протона с нейтроном в дейтерии в 4 раза слабее, чем связь каждой из этих частиц в ядре гелия. В более тяжелых ядрах эта разница в значительной мере сглаживается.

\*\* Эта теория была предложена в начале 1939 г. автором настоящей статьи; более подробно она была разработана Бором и Унлером (в Америке).

сительно устойчивых) элементов внезапно обрывается и притом на вполне определенном элементе — уране. Этот обрыв объясняется тем обстоятельством, что в более тяжелых элементах ядерные силы сцепления оказываются не в состоянии уравновесить электрические силы отталкивания, стремящиеся разорвать ядро; если бы поэтому могли бы возникнуть каким-либо образом атомы, более тяжелые, чем уран, то ядра этих атомов должны были бы сразу «разорваться» или распасться.

Этот распад отнюдь не следует представлять себе как испарение, т. е. как разделение ядра на составные элементы — протоны и нейтроны. Энергия связи этих частиц остается положительной даже в уране, где она, однако, оказывается примерно на 30% меньшей, чем в относительно легких атомах (кроме, впрочем, дейтерия). Таким образом, разрыв тяжелого и, следовательно, сильно заряженного ядра, близкого к ядру урана, может быть энергетически выгодным, т. е. сопровождаться выделением энергии лишь при делении исходного ядра на небольшое число крупных осколков и, прежде всего, на два равных осколка в виде двух капель с вдвое меньшей массой и вдвое меньшим зарядом.

Подобное электрокапиллярное деление сверхтяжелых и сверхзаряженных ядер (не существующих в действительности вследствие своей неустойчивости) может быть иллюстрировано поведением капли обыкновенной жидкости, скажем ртути, соединенной с источником высокого электрического напряжения, т. е. имеющей достаточно большой электрический заряд (любого знака). Разделим каплю мысленно на два полушария. Благодаря своему заряду, равному половине общего заряда капли, эти два полушария должны стремиться оторваться друг от друга. Этому стремлению препятствуют, однако, ядерные силы сцепления, влияние которых можно свести к силе поверхностного натяжения, действующей вдоль экватора капли. Пока последняя сила больше первой — капля является устойчивой (или метастабильной). Как только это электрическое отталкивание превысит капиллярную силу — капля разделится на две капли половинных размеров.

Мы привыкли видеть, что две маленькие капли ртути или какой-либо другой жидкости при сближении до касания сливаются друг с другом. Это слияние является

выгодным, так как оно сопровождается уменьшением поверхностной энергии. Если, однако, капли жидкости зарядить до достаточно высокого потенциала, то капли не только будут сливаться, но, наоборот, бóльшие из них будут спонтанно делиться на вдвое меньшие; связанное с этим делением увеличение поверхностной энергии может быть скомпенсировано уменьшением суммарной электрической энергии.\*

Простой расчет показывает, что в каплях ядерной жидкости подобная компенсация должна была бы иметь место уже у элементов с атомным весом, близким к 100. То обстоятельство, что ядра этих элементов не обнаруживают тенденции к делению, объясняется следующим образом.

Деление капли на две дочерние капли осуществляется не сразу, но путем постепенного вытягивания, при котором она сначала превращается в вытянутый эллипсоид; затем центральное сечение этого эллипсоида сужается, образуя шейку, которая постепенно утоньшается, пока она, наконец, не разрывается, после чего процесс деления может считаться законченным.

Тот факт, что при окончании этого процесса потенциальная энергия системы, т. е. сумма ее поверхностной и электрической энергии, оказывается уменьшенной, еще не означает, что она монотонно уменьшается на всех его промежуточных стадиях. Напротив, при не слишком большом заряде капли уменьшение ее электрической энергии в начальных стадиях процесса деления происходит медленнее, нежели возрастание капиллярной энергии, так что сумма этих энергий возрастает. Это возрастание создает потенциальный барьер, для преодоления которого требуется предварительная затрата некоторой энергии активации (ср. § 3). И хотя уменьшение электрической энергии при окончании процесса деления может превосходить возрастание капиллярной энергии, капля все же не разделится до тех пор, пока не получит недостающую ей активационную энергию от какого-либо внешнего источника.

---

\* Так как электрическая энергия капли пропорциональна квадрату ее заряда, то при делении капли на две равные капли суммарная электрическая энергия уменьшается примерно в два раза, а поверхностная энергия возрастает в  $\sqrt[3]{2} = 1.25$  раза.

Мы можем, следовательно, сказать, что ядра элементов с атомным весом более 100 находятся в метастабильном состоянии по отношению к процессу деления: электрические силы отталкивания вызывают стремление к делению, которое, однако, не реализуется вследствие потенциального барьера, создаваемого ядерными силами.

По мере увеличения веса, а следовательно, и заряда ядер этот барьер постепенно снижается, пока, наконец, у какого-то элемента, который должен был бы следовать за ураном, он практически исчезает, что должно привести к внезапному обрыву системы элементов на некоторой границе. Эта граница, вычисленная теоретически, оказывается весьма близкой к наблюдаемой границе, составляемой ураном.

В изложенные соображения, которые в основных чертах одинаково применимы к делению как обыкновенной наэлектризованной капли ртути, так и капли ядерной жидкости, необходимо ввести только одну существенную поправку, связанную с неприменимостью обычной механики макроскопических тел к таким маленьким частицам, какими являются протоны, нейтроны и образуемые ими ядра. А именно, подобные частицы оказываются способными «пробивать» потенциальные барьеры методом туннельного эффекта при наличии энергии, не достигающей энергии активации. Такой туннельный эффект оказывается при этом тем более вероятным, чем меньше дефицит активационной энергии. Таким образом, согласно новой волновой механике, которой подчиняются элементарные частицы материи, наличие активационного барьера для деления ядер тяжелых элементов не полностью исключает возможность этого деления, но лишь делает его маловероятным. Это значит, что среднее время жизни соответствующего элемента оказывается очень большим. Так, например, для легкого изотопа урана, обладающего меньшей устойчивостью, чем тяжелый, это время составляет около  $10^{15}$  лет (в 1 кг обыкновенного смешанного урана делятся каждую секунду всего лишь два—три атома). У трансуранового элемента плутония, ядро которого состоит из 94 протонов и 145 нейтронов (атомный вес 239), длительность жизни оказывается значительно короче и является недостаточной для того, чтобы обеспечить существование этого элемента в естественных

условиях в сколько-нибудь заметном количестве. Поэтому плутоний может быть получен в достаточно больших количествах (необходимых для атомных бомб) только искусственным путем (см. ниже).

При делении тяжелых ядер дочерние ядра под влиянием сил электрического отталкивания приобретают громадные скорости, достигающие у «осколков» урана  $\frac{1}{10}$  скорости света. Этому соответствует освобождение колоссальной энергии того же порядка величины, как и та энергия, которая, согласно подсчетам, проведенным нами в первой части этой статьи, освобождается при образовании тяжелых атомов из атомов водорода, т. е. порядка миллиарда больших калорий на 1 г. Однако фактическое извлечение этой внутриатомной энергии в количествах, которые могли бы иметь практическое значение, исключается необходимостью затратить для этого хотя и значительно меньшую, но все же огромную энергию активации. Запертая на замок потенциальным барьером атомная энергия, которая могла бы хлынуть мощным потоком при одновременном делении большого числа метастабильных тяжелых атомов, просачивается через этот барьер тонкими струйками, которые не могут быть использованы для каких-либо практических целей.

Заметим, что в аналогичном положении мы оказываемся по отношению к атомной энергии, которая должна была бы выделяться при превращении легкого водорода в более тяжелые элементы и вообще при процессах слияния легких ядер друг с другом, поскольку увеличение электрической энергии компенсируется при этом уменьшением капиллярной энергии. В этом случае освобождение атомной энергии за счет работы ядерных сил притяжения затрудняется активационным барьером, создаваемым силами электрического отталкивания. Мы уже указывали, что преодоление этого барьера методом туннельного эффекта осуществляется в достаточно большом масштабе в недрах звезд при температуре порядка нескольких десятков миллионов градусов. Для того чтобы обеспечить достаточно быстрое протекание соответствующих процессов на Земле, нужно было бы поднять температуру еще примерно на 1 порядок — до нескольких сот миллионов градусов. Механические и химические средства, которыми мы располагаем в настоящее время, для этого совершенно недостаточны.

Значит ли это, что освобождение атомной энергии тем или иным путем (дробления или соединения ядер) в технически приемлемых масштабах невозможно?

### III. ТЕХНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

#### § 9. ДЕЛЕНИЕ АКТИННОУРАНА ПУТЕМ ЦЕПНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Потенциальный барьер, образованный электрическим полем какого-либо ядра, является эффективным лишь для заряженной ядерной частицы — протона, дейтона и т. д., проникновение которой в это ядро оказывается возможным (или, по крайней мере, достаточно вероятным) лишь при очень больших скоростях ее движения. Принимая во внимание, что для достижения этих скоростей с помощью внешних электрических сил требуется затрата большой энергии, а также учитывая то обстоятельство, что из миллионов или сотен тысяч быстро движущихся протонов или других положительно заряженных частиц только единичным частицам удастся попасть в одно из ядер, не растеряв значительной части своей начальной энергии на электроны (при ионизации встречных атомов), мы видим, что с помощью этих частиц задача освобождения атомной энергии в практически приемлемых масштабах решена быть не может.

Наряду с заряженными ядерными частицами существуют, однако, нейтроны, для которых электрический потенциальный барьер ядер не имеет никакого значения. Если бы мы располагали возможностью получать свободные нейтроны в большем количестве, то затрата активационной энергии на их разгон, а также потери энергии на электроны, с которыми нейтроны вовсе не взаимодействуют, отпали бы.

Для нейтронов, хотя бы и движущихся сколь угодно медленно, материальное тело представляется совокупностью маленьких ядер с радиусом, не превышающим  $10^{-12}$  см. При таких условиях нейтрон проходит даже через твердое тело, не испытывая никаких столкновений, путь порядка нескольких миллиметров или сантиметров. Сталкиваясь с одним из ядер, нейтрон либо захватывается последним, либо рассеивается, т. е. отклоняется от



начального направления движения, с некоторой потерей скорости согласно обычным законам соударения упругих шаров. После ряда подобных столкновений он все же, в конце концов, захватывается ядром, в особенности в том случае, если скорость его близка к нулю или же к резонансному значению, которое соответствует одному из возбужденных квантовых энергетических уровней образующегося при этом сложного ядра.

Таким образом, в свободном состоянии нейтроны могут существовать лишь очень недолго. При этом для получения нейтронов в свободном состоянии их необходимо выбить из ядер, обстреливая последние искусственно разогнанными наэлектризованными частицами — протонами, дейтонами и т. д., на что, как мы только что видели, необходимо затратить энергию в миллионы раз большую той, которая освобождается при захвате одного нейтрона (вследствие «разбазаривания» энергии заряженных частиц при их взаимодействии с электронами).

В результате создается впечатление о полной безнадежности проблемы освобождения атомной энергии. Это впечатление существовало у большинства физиков до тех пор, пока в конце 1938 г. Ган и Штрассман (в Германии) не показали, что при захвате медленного нейтрона ядро урана, точнее его легкого изотопа ( $U^{235}$ ), претерпевает практически мгновенное деление на два приблизительно одинаковых ядра, разлетающихся с колоссальной скоростью (около  $1/10$  скорости света),\* а Ф. Жолио (во Франции) установил, что при каждом подобном акте вынужденного деления появляются 2 или 3 новых нейтрона, двужущихся с большой скоростью.

Эти вторичные нейтроны, благодаря своей большей скорости, имеют меньше шансов захватываться ядрами  $U^{235}$  или  $U^{238}$ , нежели медленные первичные нейтроны. Поэтому они оказываются менее эффективными в отношении деления ядер  $U^{235}$ , испытывая при столкновении с ними преимущественно лишь упругое рассеяние, связанное с небольшой потерей скорости. При захвате нейтрона ядром тяжелого изотопа  $U^{238}$  последний превращается

---

\* При захвате нейтрона ядром  $U^{235}$  образуется ядро урана с атомным весом 236 в возбужденном состоянии, т. е. в состоянии с повышенной энергией, которая получается за счет энергии, выделяющейся при присоединении нейтрона, и играет роль энергии активации для деления новообразующегося ядра.

в сверхтяжелый с атомным весом 239; максимальной эффективностью в этом отношении, т. е. максимальной вероятностью захвата, обладают не наиболее медленные нейтроны, а «резонансные» нейтроны с энергией в 25 эв, соответствующей одному из энергетических уровней возбужденного ядра  $U^{239}$ .

С опубликованием этих работ положение проблемы освобождения атомной энергии мгновенно изменилось. Действительно, стоит только выделить легкий изотоп урана — так называемый «актиноуран» в достаточно большом количестве, чтобы в результате быстро ускоряющегося «размножения» свободных нейтронов и связанного с этим лавинообразного ускорения процесса деления ядер актиноурана получить взрыв колоссальной силы. Энергия, выделяемая при подобном цепном взрыве 1 кг актиноурана, равна приблизительно энергии, которая выделилась бы при взрыве 1000 т обычных взрывчатых веществ.

Вышеизложенные соображения, которые были известны уже в конце 1939 г., и составляют принципиальную основу решения проблемы создания атомной бомбы.

Однако практическое решение этой проблемы наталкивается на очень большие технические трудности. Во-первых, разделенные изотопных элементов с относительно небольшим различием атомных весов, какими являются  $U^{235}$  и  $U^{238}$ , в количествах, необходимых для практических целей, а не только для точного взвешивания их (по электромагнитному методу), представляет собой чрезвычайно трудную техническую задачу. Во-вторых, необходимо учесть то обстоятельство, что чистый актиноуран, выделенный в достаточно большом количестве (в виде металлического тела), должен мгновенно взорваться спонтанным образом, т. е., следовательно, совсем не там и не тогда, где и когда это представлялось бы желательным.

Дело в том, что ядра  $U^{235}$ , ввиду своей метастабильности и сравнительно малой энергии активации, делятся спонтанно, т. е. без всякого воздействия извне, хотя и чрезвычайно редко.\* Это спонтанное деление может поло-

---

\* Существование подобного спонтанного деления было установлено Флеровым и Петржаком в 1940 г. Необходимо, впрочем, заметить, что, и помимо этого обстоятельства, начало процессу цепного деления актиноурана могут положить быстрые нейтроны, связанные с космическими лучами.

жить начало процессу цепного деления, развивающемуся столь стремительно, что он практически заканчивается в ничтожную долю секунды.

Таким образом, при создании атомной бомбы возникает своеобразная трудность, заключающаяся не в том, чтобы заставить ее взорваться, а в том, чтобы предотвратить ее взрыв.

Эта трудность легко преодолевается благодаря тому обстоятельству, что спонтанный взрыв актиноурана может произойти лишь при достаточно большом количестве последнего (порядка нескольких килограммов). В случае, если это количество меньше некоторой критической величины, зависящей от формы образуемого им тела, то развитие нейтроновой цепи (процесса размножения нейтронов) оказывается невозможным вследствие относительно большой утечки нейтронов через поверхность тела наружу. Таким образом, необходимо приготовить чистый актиноуран в виде отдельных кусков докритических размеров. Если два таких куска, суммарный вес которых превышает критическое значение, соединить вместе в один кусок, то последний практически мгновенно взрывается. Ввиду необычайно большой скорости развития этого взрыва, процесс соединения обоих докритических кусков необходимо осуществить с максимально возможной скоростью, что можно, например, сделать с помощью специальной небольшой пушки, используя один из них в качестве снаряда, а другой — в качестве мишени.

При шарообразной форме образца актиноурана критическому весу соответствует радиус, несколько больший средней длины пути, проходимого вторичными нейтронами внутри препарата до захвата их новыми атомами. Для быстрых нейтронов, каковыми являются вторичные нейтроны в момент своего появления, этот путь измеряется несколькими сантиметрами.

Его можно было бы значительно уменьшить, затормозив нейтроны до тепловых скоростей путем разведения актиноурана каким-либо веществом с легкими атомами, ядра которых не имеют тенденции захватывать нейтроны, но отнимают у них при упругих столкновениях значительную долю их кинетической энергии. Идеальными замедлителями этого рода являются атомы тяжелого водорода, хотя бы в соединении с атомами кислорода, в виде

«тяжелой воды».\* Впрочем, более удобным в качестве замедлителя оказывается графит, тщательно очищенный от всяких примесей, способных захватывать нейтроны.

Однако торможение нейтронов в атомной бомбе оказывается недопустимым по той причине, что в случае замедленных нейтронов размножение их также происходило бы в столь замедленном темпе, что бомба разлеталась бы на относительно большие куски (докритических размеров) до того, как эти куски успели бы взорваться. Даже при использовании быстрых нейтронов фактически взрывается лишь 1% всего актиноурана, т. е. бомба разлетается на отдельные пылинки, содержащие в среднем по 99% атомов, не успевших взорваться.

#### § 10. УРАНОВЫЙ «КОТЕЛ» И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ

Вместо того чтобы путем сложных процессов, связанных с затратой большого количества энергии, выделять легкий изотоп урана из его смеси с тяжелым, можно ускорить процесс деления атомов легкого изотопа следующим способом, разработанным Ферми и его сотрудниками. Обыкновенный уран разделяется на отдельные небольшие куски, которые помещаются в среду, служащую замедлителем (графит), на определенных расстояниях друг от друга. Нейтроны, освобожденные при распаде атомов актиноурана в одном из этих кусков, частично остаются в нем, захватываясь ядрами  $U^{235}$  и вызывая деление последних, или же захватываясь ядрами  $U^{238}$  и превращая их в  $\beta$ -радиоактивные ядра сверхтяжелого изотопа урана  $U^{239}$ . Как уже упоминалось выше, тенденция нейтронов к захвату тяжелым изотопом  $U^{238}$  особенно сильно выражена при резонансной энергии, равной приблизительно 25 в. Размеры отдельных кусков (стержней) урана и расстояния между ними подбираются таким образом, чтобы наиболее опасную (в смысле захвата  $U^{238}$ ) часть своего пути нейтроны проходили не внутри урана, но в графите. При таких условиях нейтрон, возникший в одном из кусков урана с начальной энергией, скажем, в 2 Мэв, попадает в другой кусок (соседний или более

---

\* Атомы кислорода малоэффективны как в отношении торможения, так и в отношении захвата нейтрона.

отдаленный) с энергией, значительно меньшей, чем 25 эв. Такие сильно замедленные нейтроны имеют больше шансов захватиться легким изотопом урана и вызвать его деление, нежели тяжелым, несмотря на численное преобладание последнего. Рациональной конструкцией этого уранового «котла» можно добиться достаточно большой скорости процесса деления актиноурана, еще очень далекой от взрыва, но обеспечивающей выделение весьма значительного количества энергии в единицу времени в виде тепла. Этим теплом можно воспользоваться для приведения в движение обычных тепловых двигателей весьма значительной мощности. Таким образом, созданием уранового «котла»<sup>3</sup> проблема использования атомной энергии для мирных целей может считаться до известной степени разрешенной.\*

Эффективность этого «котла» еще более увеличивается благодаря тому обстоятельству, уже отмеченному выше, что сверхтяжелый изотоп урана  $U^{239}$ , образующийся при захвате нейтрона ядром  $U^{238}$ , оказывается неустойчивым в отношении  $\beta$ -превращений. А именно, в пределах нескольких минут он испытывает превращение, соответствующее переходу лишнего нейтрона в протон с испусканием быстрого электрона (и нейтрино). Образующийся при этом новый элемент с тем же весом (239) и с зарядом 93, получивший название нептуния, также является  $\beta$ -неустойчивым и в течение нескольких дней превращается в следующий трансурановый элемент — плутоний, с атомным весом 239 и атомным номером 94. Этот элемент устойчив по отношению к  $\beta$ -превращениям, но еще менее устойчив по отношению к делению, чем актиноуран. Выделение его из урана представляет собой сравнительно простую техническую задачу, так как плутоний, не будучи изотопом урана, отличается от него (хотя и не очень сильно) в отношении своих физико-химических свойств. Чистый плутоний может быть использован для изготовления атомной бомбы таким же точно путем, как и чистый актиноуран.

Таким образом, процесс, происходящий в вышеописанном «адском котле», не только выделяет громадное коли-

---

\* Поскольку дело касается стационарных установок очень большого веса и, соответственно, больших размеров.

чество энергии, которая может быть использована для мирных целей, но, вместе с тем, приводит к образованию нового взрывчатого материала с громадным дополнительным запасом энергии, который может быть использован для атомной бомбы.

К сказанному необходимо добавить, что продукты деления как актиноурана, так и плутония сами являются  $\beta$ -радиоактивными веществами, которые могут быть получены в колоссальных количествах в качестве, так сказать, «отбросов производства» и использованы для научных и практических целей.

#### § 11. ВОЗМОЖЕН ЛИ ТЕПЛОВЫЙ ВЗРЫВ ОТНОСИТЕЛЬНО УСТОЙЧИВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ?

Изложенные соображения не являются технической тайной изготовления атомных бомб или применения атомной энергии для мирных целей, но представляют собой лишь достаточно твердо установленную принципиальную основу для практического решения этих задач.

Возникает вопрос, будет ли человечество вынуждено в дальнейшем, при решении этой задачи, пользоваться только актиноураном и плутонием, являющимися, так сказать, производными от обычного урана? При положительном ответе на этот вопрос атомная энергия вряд ли сможет получить широкое применение, в особенности для мирных целей, ввиду крайней ограниченности запасов урановой руды на Земле.

Вспомним, однако, что не только уран, но и более легкие и более распространенные элементы, например висмут и свинец, также могли бы быть использованы в качестве источников атомной энергии, если бы удалось «облегчить» их деление, т. е. добыть энергию активации, необходимую для этого деления. В случае свинца, например, последняя всего лишь в 3—4 раза больше, чем в случае актиноурана. Однако кинетическая энергия вторичных нейтронов, возникающих при делении ядер последнего, вместе с энергией, освобождающейся при захвате этих нейтронов ядрами свинца, оказывается раза в два меньше энергии активации, необходимой для искусственного деления этих ядер. Таким образом, использование цепной реакции размножения свободных нейтронов (продуктов деления) оказывается в этом случае невозможным

Будучи захвачены ядрами свинца, эти нейтроны, так сказать, погибают для потомства.

При таких условиях представляется, однако, другая возможность вызвать взрыв свинца и ему подобных метастабильных по отношению к делению элементов, а именно, в результате колоссального разогрева, которым должен сопровождаться цепной взрыв больших количеств актиноурана или плутония. Температуры, получаемые при взрыве этих веществ в атомной бомбе, достигают (правда, лишь на очень короткое время) значений порядка сотен миллионов градусов. Для взрыва относительно устойчивых элементов, например обычного (тяжелого) урана, не говоря уже о свинце, даже такие температуры могут быть еще недостаточными. Они могут, однако, оказаться достаточными для того, чтобы при наличии водорода вызвать процессы превращения протия в дейтерий или в гелий. Для этого, как показывает пример звезд, достаточны температуры порядка десятков миллионов градусов.

Таким образом, не исключена возможность того, что актиноуран и плутоний в будущем будут применяться как своего рода инициирующие вещества или детонаторы для взрыва более стойких элементов и притом как элементов тяжелых, взрывающихся путем деления, так и легких элементов, способных взрываться при соединении с водородом или друг с другом. Взрывы эти должны протекать при температурах, соответствующих энергиям активации, обусловленных ядерными силами в первом случае и электрическими силами — во втором и поддерживающихся благодаря выделению энергии за счет электрических сил в первом случае и ядерных сил — во втором <sup>4</sup>

Если эта программа — превращения цепного атомного взрыва в тепловой — окажется осуществимой, то выполнение ее приведет либо к гибели человечества, при злонамеренном или неправильном применении атомной энергии, либо же к необыкновенному процветанию его, если эту энергию удастся взнуздать так, чтобы она не вырывалась практически мгновенно в виде испепеляющего взрыва потрясающей силы, но вытекала бы наружу потоком умеренной, произвольно контролируемой мощности, растекающимся по различным каналам.

## КОММЕНТАРИИ

\*

### Кванты и радио

Статья опубликована в журнале «Телеграфия и телефония без проводов» (8, № 43, 375, 1927).

1. См. статью Я. И. Френкеля «Механические и электромагнитные свойства световых атомов (квантов)», см. наст. сб., стр. 69.

2. Я. И. Френкель был, по свидетельству акад. И. Е. Тамма, первым в нашей стране, кто должным образом оценил работу де Бройля. Уже в 1924 г. он посвятил ей большой реферат, опубликованный в журнале «Успехи физических наук» [33]. Этот и следующие параграфы данной статьи излагают основное содержание классических работ Луи де Бройля [34].

3. Интересно напомнить [35, стр. 58] историю создания волновой механики Шредингера. П. Дебай предложил Шредингеру прореферировать работу де Бройля на семинаре, на что тот возразил: «О такой чепухе я не хочу рассказывать». Но именно в процессе подготовки к докладу, сделать который его все же убедил Дебай, Шредингер пришел к своему знаменитому уравнению.

4. Релятивистским обобщением квантовой механики занимались многие физики еще в 20-е годы, в частности Э. Шредингер, О. Клейн, В. А. Фок, В. Гордон, Я. И. Френкель. Однако основоположником релятивистской квантовой механики является П. Дирак, который в 1928 г. получил релятивистски-инвариантное волновое уравнение электрона и вообще частиц со спином  $1/2$ .

### Частицы и волны

Статья опубликована в журнале «Научное слово» (№ 8, 20, 1928).

1. См. примечание 1 к статье «Механические и электромагнитные свойства световых атомов (квантов)», см. наст. сб., стр. 369.

### Механические и электромагнитные свойства световых атомов (квантов)

Статья опубликована в журнале Успехи физических наук (7, вып. 2, 107, 1927). Этот выпуск посвящен памяти Исаака Ньютона в связи с 200-летием со дня его смерти. В этом же номере жур-



нала со статьями исторического характера выступили В. К. Фредерикс, С. И. Вавилов и др.

1. Развитие физики показало, что свойство неразрушимости, которое трактуется здесь Я. И. Френкелем как основной признак того, что он называет материальностью, не присуще электронам, протонам и другим элементарным частицам в той же мере, как и фотонам. Фотоны противопоставляются другим частицам по тому признаку, что они обладают массой покоя, равной нулю, в отличие от других элементарных частиц (см. наст. сб., стр. 72).

2. Эта работа вошла в 3-й том Собрания избранных трудов А. Эйнштейна (изд-во «Наука», М., стр. 393).

### **Происхождение и развитие полноволновой механики**

Статья опубликована в журнале «Природа» (№ 1, 30, 1930).

1. Здесь Я. И. Френкель хочет подчеркнуть, что атомистические гипотезы греческих философов практически не имели никакой научной почвы, являясь просто удачными догадками. Идея прерывности материи находилась у них в связи с дискретностью ряда натуральных чисел.

2. Здесь излагается донейтронная теория строения атомного ядра.

3. По предложению американского физика Льюиса.

### **Принципы квантовой статистики**

Статья опубликована в журнале «Природа» (№ 9, 811, 1930).

1. Учитывая этот фундаментальный вклад Дирака в развитие квантовой статистики, распределение, которое в статье Я. И. Френкеля называется «распределением Паули—Ферми», сейчас именуется «распределением Ферми—Дирака».

2. Дырки в состояниях с отрицательной энергией, введенные в рассмотрение П. Дираком, в действительности оказались тождественными с позитронами, открытыми через два года после опубликования данной статьи Я. И. Френкеля. В соответствии с этим внесены поправки в следующий абзац этой статьи.

### **Мистика мирового эфира**

Статья опубликована в журнале «Вестник знания», издававшемся в Ленинграде (№ 6, 424, 1925). Главным редактором журнала был знаменитый русский и советский психиатр В. М. Бехтерев. Борьба со старым понятием об эфире, которую вел на страницах статьи Я. И. Френкель, не была борьбой с ветряными мельницами. Сторонники доэйнштейновских представлений о пространстве и времени, а также модельных представлений Фарадея и Максвелла, уже отживших, но сыгравших свою положительную роль, имелись не только на Западе, но и у нас в СССР. В 20-е годы Я. И. Френкель неоднократно принимал участие в дискуссиях и

публичных диспутах со своими идейными противниками (в стенах Ленинградского политехнического института и Московского университета), а также читал лекции, в которых излагал и пропагандировал последние достижения физики. Данная статья отражает эту сторону деятельности Я. И. Френкеля.

1. Приводимые Я. И. Френкелем слова взяты из оды Г. Державина «Бог» (Г. Р. Державин, Стихотворения, Л., 1933, стр. 105).

2. Здесь излагается старая, донейтронная модель ядра.

3. О. Лодж (1851—1940) — английский физик, известный своими работами по электромагнитным волнам. Его обращение к спиритизму связано с тяжелой душевной травмой — гибелью сына на фронте в первую мировую войну.

4. Ф. Ленард (1862—1947) — немецкий физик. Его книга, о которой упоминает Я. И. Френкель, была издана в СССР в 1922 г. [36]. Ленард был человеком крайне реакционных взглядов не только в физике, но и в политике; он активно поддерживал гитлеровский режим. В молодости провел ряд важных исследований по физике катодных лучей; эти работы были отмечены Нобелевской премией 1905 г.

### Теория относительности Эйнштейна

Основу публикуемой статьи составляет работа Я. И. Френкеля того же названия, напечатанная в журнале «Фронт науки и техники» (№ 5—6, 38, 1935). Наряду с этим в настоящую публикацию введены два отрывка из другой статьи Я. И. Френкеля «Две теории Эйнштейна» («Научное слово», № 4, 1930).

### Теория металлов

Статья представляет собой изложение доклада, сделанного Я. И. Френкелем на юбилейной сессии Академии наук СССР, посвященной 15-летию Октябрьской революции (ОНТИ, М., 1932).

1. Указанное противоречие получило название «катастрофы с теплоемкостью» (П. С. Эренфест). Выход из него был дан Я. И. Френкелем в 1924 г. (см. иаст. сб., стр. 181 и далее).

2. Этот неучет объясняется тем, что к 1924 г. не существовало квантовой статистики Паули—Ферми—Дирака (1927 г.), да и самой квантовой механики де Бройля—Гейзенберга—Шредингера—Борна (1925—1926 гг.).

3. См., например, статью Я. И. Френкеля «Вращающийся электрон» [37].

4. См., например, более подробное изложение этого вопроса в книге Я. И. Френкеля [38].

5. Содержание этого параграфа, за исключением двух первых и двух последних его абзацев, составляет один из параграфов более поздней статьи Я. И. Френкеля «Современная теория металлических тел» [39, стр. 71—73].

6. См. примечание 3 к статье «Об элементарном выводе некоторых соотношений электронной теории металлов», см. иаст. сб., стр. 371.

7. Критика теорий Ф. Блоха и Р. Пайерлса дана Я. И. Френкелем в работе [39].

8. Работа Я. И. Френкеля по ферромагнетизму, которая вскользь упоминается в настоящей статье, была опубликована в июньском номере немецкого журнала *Zs. f. Phys.* [40] и получена редакцией этого журнала 30 марта 1928 г. В ней впервые для объяснения природы ферромагнетизма было привлечено понятие об обменных силах, введенных Гейзенбергом в его теории атома гелия. Спустя месяц, в июльском выпуске того же журнала [41] появилась и более детальная работа В. Гейзенберга (полученная редакцией 20 мая 1928 г.). В результате авторами квантовой теории ферромагнетизма считают Я. И. Френкеля и В. Гейзенберга (см., например, известные монографии: С. В. Вонсовский и Я. С. Шур [42, стр. 103], Ф. Блох [43, стр. 92], Н. Мотт и Г. Джонс [44, стр. 229], Ч. Киттель [45, стр. 285]).

9. Теория Я. И. Френкеля и А. Ф. Иоффе, опубликованная в 1932 г. [46], лежит в основе действия новых полупроводниковых приборов — туннельных диодов, разработанных в 1958 г. Л. Есака. Есака в своей первой публикации о туннельных диодах [47] непосредственно ссылается на указанную работу советских авторов.

### Об элементарном выводе некоторых соотношений электронной теории металлов

Статья опубликована в советском журнале *Physikalische Zs. der Sowjet Union* (7, 452, 1935), издававшемся на немецком и английском языках (перевод с английского сделан Т. А. Конторовой). Акад. С. В. Вонсовский писал по поводу этой работы Я. И. Френкеля [48, стр. 25]: «В удивительно простой и в то же время строгой форме автору удалось получить выражения для удельной электропроводности и теплопроводности металлов... Эта работа до сих пор не потеряла своей свежести и может служить прекрасным введением при изложении курса теории твердого тела».

1. Значения электропроводности, вычисленные по обоим методам, отличаются друг от друга численным множителем порядка единицы.

2. Теорема Луивилля гласит, что фазовый объем, т. е. объем в пространстве скоростей и координат частиц системы, занимаемый системой частиц, не изменяется в процессе движения этой системы.

3. Сопоставление коэффициента рассеяния и длины свободного пробега основано на следующих простых соображениях, впервые развитых Я. И. Френкелем в его работе 1924 г. Интенсивность пучка частиц, прошедших слой толщиной  $x$ , уменьшается в  $e^{-\mu x}$  раз (где  $\mu$  — коэффициент рассеяния). Вместе с тем, по формуле Клаузиуса, относительное число частиц, прошедших слой  $x$  без столкновений, равно  $e^{-\frac{x}{l}}$ , где  $l$  — длина свободного пробега. Отсюда и получается приведенное соотношение:  $l = \frac{1}{\mu}$ .

## Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости

Статья опубликована в «Журнале физической химии» (т. 14, вып. 3, 305, 1940). Она написана на основе экспериментального материала, полученного С. Е. Бреслером [49] в Физико-техническом институте, и привлекает красивой и простой моделью, положенной в основу объяснения свечения жидкостей (особенно растворов электролитов) под влиянием ультразвуковых колебаний. Математика, использованная Я. И. Френкелем, крайне проста: он оперирует основными соотношениями теории вероятностей и электростатики. Как всегда его интересуют порядки величин (в отличие от так называемых «охотников за  $\frac{\pi}{2}$ », стремящихся получить точный результат на основе сугубо приближенной модели); так, среднее значение модуля разности  $\left| \nu - \frac{1}{2}\nu_0 \right|$  Френкель заменяет квадратным корнем среднего квадрата этой разности  $\left( \sqrt{\left( \nu - \frac{1}{2}\nu_0 \right)^2} \right)$ , что справедливо с точностью до числового множителя порядка единицы. Данная статья позволяет понять, почему экспериментаторы считали Френкеля «теоретиком для экспериментаторов». См. также опубликованную к 75-летию со дня рождения Я. И. Френкеля его статью на эту же тему [50].

### Теория жидкого состояния

Данная статья написана Я. И. Френкелем на основе стенограммы лекции, прочитанной им в конце 1947 г. в Центральном лектории Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний в Москве. Незадолго до этого, в июне 1947 г., Я. И. Френкель был удостоен Государственной премии первой степени за свои исследования по кинетической теории жидкостей. В связи с ее присуждением С. И. Вавилов в статье «Праздник советской науки», опубликованной в газете «Правда» от 8 июня 1947 г., писал: «Я. И. Френкель — один из известнейших у нас и за границей советских физиков-теоретиков. Он премириван за научные исследования по теории жидкого состояния, изложенной им в большой книге «Кинетическая теория жидкостей». Несмотря на то что жидкости исследовались в течение тысячелетий (со времен Архимеда), до сего времени нет общепринятой кинетической, т. е. молекулярной, теории жидкостей. Трудности с этим вопросом таковы, что некоторые теоретики приходили к печальному выводу о невозможности построения такой теории. Я. И. Френкель своей более чем 20-летней работой прояснил многое в этом вопросе. В отличие от всех своих предшественников он подошел к теории жидкостей из сравнения свойств жидкостей со свойствами твердых кристаллов. До Френкеля само собой разумеющимся родственником жидкостей считался газ. Я. И. Френкелю удалось с несомненностью обнаружить в жидкостях многие черты, свойственные кристаллам, и с этой точки зрения объяснить иногда весьма запутанные особенности в свойствах реальных жидкостей».

В данной статье Я. И. Френкеля в популярной форме изложены основные представления и идеи автора по теории жидкого состояния. Книга Я. И. Френкеля «Кинетическая теория жидкостей» выдержала ряд отечественных изданий (1945 и 1955 гг.), а также переведена и издана в других странах: в Англии (1946 г.), США (1955 г.), ФРГ (1957 г.).

Лекция Я. И. Френкеля опубликована в виде отдельной брошюры («Правда», М., 1948).

### **Действие электрического поля на струю жидкости**

Статья опубликована в журнале Известия Академии наук СССР (сер. географ. и геофиз., 12, 3, 1948). Она написана совместно с Г. П. Вагером на основе работы, проведенной по инициативе Я. И. Френкеля в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, в которой Яков Ильич работал в течение 8 лет (1944—1952 гг.). Экспериментальная часть исследования, привлекающая своей крайней простотой, выполнена Г. П. Вагером. Я. И. Френкель предложил теоретическую интерпретацию полученных результатов и провел приведенные в статье оценочные расчеты. Интересно отметить, что к проблеме баллоэлектричества Я. И. Френкель пришел после своих классических работ по электрокапиллярной теории деления тяжелых атомных ядер (1939 г.), на которые он непосредственно ссылается в данной статье. Механизму электризации твердых и жидких тел при распылении посвящена специальная статья Я. И. Френкеля [51]. Нильс Бор, напротив, начал свою деятельность с экспериментального и теоретического изучения капиллярных волн (1910 г.), а потом, уже в 1939 г., обратился к проблемам, связанным с капиллярными свойствами заряженной ядерной жидкости.

### **О возможности замены шариков и подшипниках каплями**

Эта статья в качестве письма в редакцию была опубликована в Журнале технической физики (20, вып. 8, 1027, 1950). Она является одной из целой серии публикаций, связанных с работой Я. И. Френкеля в качестве научного руководителя лаборатории физики трения и смазки одного из московских НИИ (1945—1951 гг.).

### **Международный физический конгресс в память А. Вольты и г.<sup>1</sup> Комо**

Статья опубликована в журнале «Научное слово» (№ 1, 64, 1928).

Конгресс в память А. Вольты проходил в Италии в сентябре 1927 г. Я. И. Френкель, давший в своей работе 1917 г. [10] правильное объяснение эффекта Вольты на основании теории Бора, был делегатом этого съезда. Некоторые из изложенных в статье Я. И. Френкеля концепций (в порядке комментирования докладов, прочитанных на съезде) в настоящее время заменены новыми в свете новейших экспериментальных и теоретических работ, выпол-

иенных за минувшие 4 десятилетия. Это особенно относится к космическим лучам и строению атомных ядер. Мы не будем загромождать данию статью Я. И. Френкеля примечаниями тем более, что соответствующие изменения нашли свое отражение в ряде статей, опубликованных в настоящем сборнике.

1. С этой речью выступил ректор Павийского университета проф. Росси, сказавший (текст его выступления на русском языке набран латинскими буквами в Докладах конгресса [52]): «Я благодарю от всего сердца депутатов, которые приехали из далекой страны и желаю вашей родине, чтобы как можно скорее мы [могли быть] счастливы [и сказать] с поэтом: „Широка ты, Русь!.. По седым морям, из далеких стран на поклон тебе корабли идут!“».

2. Эта точка зрения на природу космических лучей оказалась, как известно, неверной. Интересно отметить, однако, что ряд космических объектов и, в частности, Солнце, являются источниками рентгеновского излучения. Это излучение привело к развитию так называемой рентгеновской астрономии [53].

### Метод аналогий и физике

Во время своей годичной командировки в США, где Я. И. Френкель был гостевым профессором Миннеаполисского университета, он выступил 3 марта 1931 г. в Иельском университете с докладом о методе аналогий в физике. В порядке подготовки к этому докладу, повторенному позднее, по возвращении в СССР, на одной из физических конференций, Я. И. Френкель написал расширенные тезисы к нему, которые представлены здесь в виде статьи (перевод с англ. В. Я. Френкеля и Т. А. Конторовой). Статья обрывается на половине фразы. Ранее публиковались лишь небольшие отрывки из этой статьи.

1. Приведем здесь аналогичное высказывание Макса Борна, сделанное в лекции, прочитанной им при вступлении в должность заведующего кафедрой натуральной философии Эдинбургского университета в 1935 г. [54, стр. 84]: «Физики — не революционеры, скорее они консервативны, и только вынуждающие обстоятельства побуждают их жертвовать хорошо ранее обоснованными представлениями».

2. В связи с этим напомним получившее широкую известность замечание Нильса Бора по поводу нелинейной квантовой механики Гейзенберга (конец 50-х годов). Бор сказал [55]: «Это, конечно, сумасшедшая теория. Однако мне она кажется недостаточно сумасшедшей, чтобы быть правильной новой теорией».

3. Я. И. Френкель имеет в виду, вероятно, П. С. Эренфеста, преемника Г. Лоренца по кафедре теоретической физики Лейденского университета. По свидетельству своего ученика Г. Юленбека, Эренфест любил говорить, что «Jede Konsequenz führt zum Teufel», т. е. любая последовательность в мышлении ведет к дьяволу [56].

4. Я. И. Френкель говорит здесь о квантовой механике Гейзенберга, де Бройля, Шредингера и Борна, возникшей в 1925—1926 гг.

5. В. Гейзенберг в своей статье, посвященной памяти Нильса Бора [57], свидетельствует, что «презирал всякие наглядные кар-

тины». Таким образом, шутя, можно сказать, что физика для Гейзенберга из любимой науки стала просто ненаглядной!

6. Упомянутое в статье высказывание звучит примерно так: специализация знаний приводит к тому, что физики, в конце концов, знают «все ни о чем», в то время как философы, занимающиеся общими вопросами и проблемами, «знают ничего обо всем».

7. Эти слова Я. И. Френкель адресует американским слушателям. Он имеет в виду работы по дифракции электронов при отражении от монокристалла никеля, выполненные К. Дэвиссоном и Л. Джермером в США в 1927 г. В СССР аналогичные опыты несколько позднее были поставлены П. С. Тартаковским.

8. На этом рукопись обрывается. Я. И. Френкель принадлежат две работы, выполненные на эту тему в 1926 и 1928 гг. Подробнее см. в [1].

### Проблемы современной физики

Статья опубликована в журнале «Вестник Академии наук СССР» (№ 4—5, 89, 1943) и переведена в следующем году на английский язык [58]. Отделенная от наших дней четвертью века, она представляет интерес с той очевидной точки зрения, что прогнозы автора на будущее могут быть проверены с позиций сегодняшнего дня. Мы не будем здесь комментировать правильно предсказанные Я. И. Френкелем тенденции (например, развитие и прогресс биофизики, решение проблемы урана, открытие новых частиц и т. д.), а ограничимся несколькими конкретными справками и уточнениями.

1. С конца 40-х и начала 50-х гг. получила бурное развитие теория дислокаций, в рамках которой стали понятными также и процессы пластической деформации. Существенное значение для этого прогресса имели работы Я. И. Френкеля и Т. А. Конторовой по теории подвижных дислокаций [59].

2. Здесь следует обратить внимание на публикуемую в настоящем сборнике статью Я. И. Френкеля «Метод аналогий в физике», см. стр. 259.

3. Такая проверка была осуществлена в 1944 г. в опытах В. П. Пешкова, подтвердивших теоретические соображения Л. Д. Ландау.

4. Теория сверхпроводимости была разработана в трудах американских физиков Бардина, Купера и Шриффера и советского физика Н. Н. Боголюбова. Для процесса сверхпроводимости характерно своеобразное парное взаимодействие (благодаря обмену виртуальными фотонами) электронов, образующих так называемые «квази-молекулы», или «куперовские пары».

5. Кпд современных солнечных батарей, сделанных из монокристаллического кремния, достигает 15%. Однако использование их в целях энергоснабжения не только искусственных спутников, где они с успехом применяются, но и в масштабах, обеспечивающих замену ими современных источников энергии, в настоящее время не представляется возможным из-за дороговизны соответствующих материалов.

6. Экситоны — кванты возбуждения, образующиеся в полупроводниках. В последнее время появились работы, свидетельствующие о существовании экситонов в металлах и газах. Понятие об этих

квазичастицах и их теория были развиты Я. И. Френкелем в 1931 г. Исследования в этом направлении особенно интенсивно проводятся в последние 15 лет. Прямое экспериментальное наблюдение экситонов (по их водородоподобному спектру в закиси меди) было осуществлено Е. Ф. Гроссом и Н. А. Каррыевым в 1951 г.

7. Проблемы фазовых переходов продолжают и сейчас оставаться в центре внимания теоретической физики. Микроскопическая теория фазовых переходов II рода все еще не разработана.

8. В лабораторных условиях получена плазма, температура которой (рассчитанная по энергии электронов) составляет величину порядка десятков миллионов градусов. Однако в силу характерной для плазмы неустойчивости такие рекордные температуры «существуют» крайне непродолжительное время, порядка миллисекунд.

9. В работах Л. Ф. Верещагина в возглавляемом им Институте высоких давлений АН СССР достигнуты давления порядка нескольких сотен тысяч атмосфер. При таких давлениях и высоких температурах (до  $3000^{\circ}\text{C}$ ) там, в частности, удалось осуществить синтез алмазов.

10. Современная радиотехника перекрыла эту «пустую» область спектра частот. В настоящее время существуют генераторы и усилители миллиметровых и субмиллиметровых волн (лампа с бегущей и обратной волной, клистроны). Эта экспериментальная техника, в соответствии с предсказаниями Я. И. Френкеля, послужила основой для создания новой области физики — молекулярной радиоспектроскопии.

11. Представление о сложном промежуточном ядре (компаунд-ядро) было введено Н. Бором в 1936 г.

12. Подобной «фабрикой» радиоактивных элементов явились не ускорители, как полагал Я. И. Френкель, а ядерные реакторы. Впрочем, в середине 40-х годов первые заметные количества плутония были получены на циклотронах.

13. В связи с этим обращаем внимание на приведенное в статье «К биографии Я. И. Френкеля» письмо Я. И. Френкеля к П. А. М. Дираку, датированное 1933 г. (см. наст. сб., стр. 21).

14. Изложенные здесь предварительные соображения Я. И. Френкеля получили дальнейшее развитие в его более поздних работах [61, 62].

## Теоретическая физика в СССР за 30 лет

Статья написана по предложению Редакционной коллегии журнала «Успехи физических наук» для юбилейного (ноябрьского) номера журнала, посвященного 30-летию Октябрьской революции (33, 294, 1947).

1. Первым «чистым» физиком-теоретиком был Макс Планк (1858—1947). Максвелл, Больцман, Лоренц — гиганты XIX в. — наряду с теоретическими работами занимались и экспериментальными исследованиями.

2. Данное подстрочное примечание взято из другой статьи Я. И. Френкеля, написанной годом ранее [39]. Оно получило широкое признание, цитируется, например, в статье И. Е. Тамма памяти Я. И. Френкеля [6] и в недавно вышедшей книге американ-



ского физика М. Фишера «Природа критического состояния» [63], который пишет в предисловии к своей книге: «Предметом моих лекций будет скорее теоретический анализ явления в целом, чем детальное описание конкретных физических и химических систем. Такой подход прекрасно сформулирован Я. И. Френкелем в обзорной статье по теории металлов», после чего приводит помещенную выдержку.

3. Первыми «чистыми» физиками-теоретиками в России следует считать учеников П. С. Эренфеста Ю. А. Круткова (1890—1953) и В. Р. Бурсиана (1886—1945).

4. Термин фононы по отношению к квантам звука, введенным в физику твердого тела И. Е. Таммом, был предложен Я. И. Френкелем (1932 г.) [64].

5. Как известно, в 1958 г. за эти исследования И. Е. Тамм, И. М. Франк и П. А. Череев получили Нобелевскую премию по физике.

6. Первый эскиз кинетической теории жидкостей был намечен Я. И. Френкелем в июле 1924 г. в докладе на заседании Ученого совета Государственного рентгеновского и радиологического института (ныне Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР).

7. См. примечание 4 к статье «Проблемы современной физики», наст. сб., стр. 375.

8. В дальнейшем эти представления А. В. Степаиова получили полное подтверждение и сейчас являются общепринятыми.

9. Указанный метод изложен в монографии Бориа и Грина [65].

10. Диссертационная работа Николая Сергеевича Крылова (1917—1947) была опубликована посмертно [66].

## Атомная энергия и ее освобождение

Статья является одной из первых отечественных публикаций на тему об атомной энергии и принципиальных основах действия атомного (и ядерного) оружия. Опубликована в журнале «Природа» (№ 5, стр. 7, 1946).

1. У гелия имеется три изотопа:  $\text{He}^3$ ,  $\text{He}^4$  и  $\text{He}^6$  (последний нестабилен, период полураспада 0.8 сек.). У водорода обнаружен еще один изотоп — тритий  $\text{H}^3$ , иногда обозначаемый через Т. Тритий посредством  $\beta$ -распада переходит (с периодом полураспада 12 лет) в  $\text{He}^3$ :  $\text{H}^3 \rightarrow \beta^- + \text{He}^3$ .

2. См. примечание 8 к статье «Проблемы современной физики», наст. сб., стр. 376, а также § 10 настоящей статьи.

3. В СССР первый урановый котел был построен и пущен в ход 24 декабря 1946 г. группой ученых и инженеров, работавших под общим руководством И. В. Курчатова.

4. Как известно, именно на этом принципе «работают» водородные бомбы. Первый взрыв нетранспортабельного термоядерного устройства был произведен США 1 ноября 1952 г.; первая водородная бомба была испытана в СССР 12 августа 1953 г.

Составил В. Я. Френкель.

## ДАТЫ ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ Я. И. ФРЕНКЕЛЯ

- 1894 г., 10 февраля — родился в г. Ростове-на-Дону.
- 1909 г., осень — переезд семьи Френкелей в Петербург (из Минска).
- 1910 г. — работа над трактатом «Прогрессивное исчисление».
- 1912 г., февраль-октябрь — работа над трактатом «Соличная система с электромагнитной точки зрения».
- 1913 г., весна — окончил с золотой медалью гимназию К. Мая.
- 1913 г., сентябрь — поступил на физико-математический факультет Петербургского университета.
- 1916 г., осень — окончил физико-математический факультет Петроградского университета по «математическому разряду».
- 1916—1917 гг. — оставлен при университете для подготовки к профессорской деятельности (аналог теперешней аспирантуры).
- 1916 г. — выход в свет первой печатной работы.
- 1917 г., сентябрь-октябрь — сдача магистерских экзаменов при Петроградском университете.
- 1917 г., декабрь — отъезд из Петрограда в Крым.
- 1918—1921 гг. — приват-доцент Таврического университета.
- 1919 г., апрель-июнь, 1920 г., ноябрь—1921 г., январь — заместитель Наркома просвещения Крыма, заведующий отделом высших школ и технического образования.
- 1919 г., август—1920 г., февраль — заключен в денкинскую тюрьму с последующим отстранением от преподавательской деятельности.
- 1920 г., декабрь — женитьба на С. И. Гординой, студентке биологического факультета Таврического университета.
- 1921 г., февраль — возвращение в Петроград.
- 1921—1952 гг. — работа в качестве старшего физика, руководителя работ и заведующего теоретическим отделом Физико-технического института (бывшего Государственного рентгеновского и радиологического института).
- 1921—1952 гг. — профессор, заведующий кафедрой теоретической физики физико-механического факультета Политехнического института им. М. И. Калинина.
- 1922 г. — выход в свет первой книги Я. И. Френкеля — «Строение материи», ч. I.

- 1925—1926 г. — получил стипендию рокфеллеровского фонда, командирован Наркомпросом в Германию, Францию, Англию.
- 1927 г., сентябрь—октябрь — делегат Международного конгресса памяти А. Вольты в Комо (Италия).
- 1929 г., 22 февраля — избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.
- 1930 г., октябрь—1931 г., июль — гостевой профессор теоретической физики Миннеаполисского университета, США.
- 1931 г. — избран членом Американского физического общества и Национального географического общества.
- 1934 г. — присуждена ученая степень доктора Физико-математических наук (без защиты диссертации).
- 1941 г., 23 августа — эвакуация вместе с ФТИ из Ленинграда в Казань.
- 1942 г., январь—1945 г., январь — заведующий кафедрой теоретической физики Казанского государственного университета им. В. И. Ульянова (Ленина).
- 1943—1946 гг. — работа в Институте теоретической геофизики АН СССР.
- 1944 г., апрель — возвращение в Ленинград.
- 1944—1952 гг. — сотрудник и член Ученого совета Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (Ленинград).
- 1945—1951 гг. — научный руководитель лаборатории НИИ авиационной промышленности (Москва).
- 1947 г., май — присуждена Государственная премия I степени за монографию «Кинетическая теория жидкостей».
- 1952 г., 23 января — скончался в Ленинграде.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Френкель. Яков Ильич Френкель. Изд-во «Наука», М.—Л., 1966.
2. Архив А. Н. Крылова. Лен. отд. Архива АН СССР, ф. 759, оп. 4, ед. хр. 104.
3. А. Эйнштейн. Собрание научных работ, т. 3. Изд-во «Наука», М., 1966.
4. Ф. Загородских и др. История Крымского педагогического института. Крымиздат, Симферополь, 1960.
5. А. И. Ансельм, УФН, **47**, вып. 3, 470, 1952.
6. И. Е. Тамм, УФН, **76**, вып. 3, 397, 1962.
7. О. Д. Хвольсон, ЖРФХО, **56**, 447, 1924.
8. Я. И. Френкель. Строение атомов в свете радиоактивных излучений. ЖРФХО, ч. физ., **49**, вып. 1, 2, 3—10; **50**, вып. 4—6, 1917—1919.
9. Я. И. Френкель. Строение материи, ч. I—III. Книгоизд. «Сеятель», Пггр., 1922—1925.
10. Я. И. Френкель, ЖРФХО, ч. физ., **49**, вып. 2, 100, 1917; Phil. Mag., **33**, 297, 1917.
11. Я. И. Френкель. Проект выступления на Всесоюзном совещании физиков. Архив В. Я. Френкеля.
12. В. Я. Савельев. Письмо к Я. И. Френкелю. Архив В. Я. Френкеля.
13. М. П. Броиштейн. Атомы, электроны, ядра. ОНТИ, Л.—М., 1935.
14. А. Ф. Иоффе. О научном наследии Я. И. Френкеля. В кн.: Я. И. Френкель, Собр. избр. тр., т. II. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1958.
15. Я. И. Френкель. Выступление в прениях по докладу Д. В. Скобельщина. Изв. АН СССР, сер. физ., № 1—2, 101, 1938.
16. В. Я. Френкель, УФН, **96**, вып. 3, 529, 1968.
17. В. Л. Гинзбург, УФН, **94**, вып. 1, 182, 1968.
18. И. Е. Тамм, Теоретическая физика, «Наука и жизнь», 1967, № 10.
19. J. Frenkel, Zs. f. Phys., **37**, 243, 1926; см. также: Я. И. Френкель. Собр. избр. тр., т. II. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1958.

20. J. Frenkel, *Zs. f. Phys.*, **50**, 234, 1928.
21. Э. Резерфорд, УФН, **6**, 53, 1928.
22. Я. И. Френкель. Письмо П. А. М. Дираку от 5 мая 1933 г. Архив В. Я. Френкеля (фотокопия письма).
23. L. Infeld. *Jakov Frenkel, Postępy Fizyki*, v. **4**, z. **1**, III, 1953.
24. N. Bohr, *Nature*, **137**, 344, 1936; см. также: УФН, **16**, 425, 1936.
25. И. Е. Тамм, Изв. АН СССР, сер. физ., **13**, 34, 1936.
26. Я. И. Френкель. Там же, стр. 343.
27. Я. И. Френкель, ЖЭТФ, **9**, 641, 1939; *J. of Physics (USSR)*, **55**, 987, 1939.
28. Н. Бор и Ф. Калькар, УФН, **20**, 1, 1938.
29. L. Meitner a. O. Frisch, *Nature*, **143**, 239, 1939.
30. А. Р. Регель, М. С. Соминский. Полупроводники. В кн.: Развитие физики в СССР, т. I. Изд-во «Наука», М., 1967.
31. Л. В. Грошев, УФН, **14**, вып. 6, 808, 1934.
32. А. Ф. Иоффе, ЖТФ, **22**, 1905, 1952.
33. Я. И. Френкель, УФН, **4**, 329, 1924.
34. Л. де Бройль, УФН, **93**, 178, 1967.
35. П. Л. Капица. Жизнь для науки. Изд-во «Знание», М., 1965.
36. Ф. Ленард. О принципе относительности, эфире, тяготении (критика теорий относительности). Под ред. А. К. Тимирязева. ГИЗ, М., 1922.
37. Я. И. Френкель, УФН, **7**, 202, 1927.
38. Я. И. Френкель. Волновая механика, т. I. ГТТИ, Л.—М., 1933.
39. Я. И. Френкель, Вестник АН СССР, № 10, 61, 1946.
40. J. Frenkel, *Zs. f. Phys.*, **49**, 31, 1928 (см. также: Собр. избр. тр., т. II. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1958, стр. 98).
41. W. Heisenberg, *Zs. f. Phys.*, **49**, 619, 1928.
42. С. В. Вонсовский и Я. С. Шур. Ферромагнетизм. ГТТИ, М.—Л., 1948.
43. Ф. Блох. Молекулярная теория магнетизма. ОНТИ, Л.—М., 1936.
44. N. Mott a. H. Jones. *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*. Oxford, 1936.
45. Ч. Киттель. Элементарная физика твердого тела. Изд-во «Наука», М., 1965.
46. J. Frenkel a. A. Ioffe, *Phys. Zs. d. Sow. Union*, **1**, 60, 1932.
47. L. Esaki, *Phys. Rev.*, **109**, 613, 1958.
48. С. В. Вонсовский. Работы Я. И. Френкеля по электронной теории твердых тел. В кн.: Я. И. Френкель. Собр. избр. тр., т. II. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1958.
49. С. Е. Бреслер, ЖФХ, **14**, 309, 1940.
50. Я. И. Френкель, ИФЖ, **16**, 342, 1969.
51. Я. И. Френкель, ЖЭТФ, **18**, 799, 1948.
52. O. Rossi, *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici*, Cap. IV, Bologna, 1928, p. 605.
53. См., напр. И. С. Шкловский, УФН, **75**, 351, 1961.

54. М. Борн. Физика в жизни моего поколения. ИЛ, М., 1963, стр. 84.
55. И. Е. Тамм. Нильс Бор и современная физика. В сб.: Развитие современной физики. Изд-во «Наука», М., 1964, стр. 13.
56. Г. Юлейбек, УФН, **67**, 1967, 1959.
57. В. Гейзенберг. Квантовая теория и ее интерпретация. В сб.: Нильс Бор. Жизнь и творчество. Изд-во «Наука», М., 1967, стр. 10.
58. J. Frenkel, Nature, **154**, 417, 450, 1944.
59. Я. И. Френкель и Т. А. Коиторова, ЖЭТФ, **8**, 89, 1340, 1349, 1938.
60. Е. Ф. Гросс и Н. А. Каррыев, ДАН СССР, **84**, 261, 471, 1952; см. также: Е. Ф. Гросс, УФН, **76**, 433, 1962.
61. Я. И. Френкель, УФН, **42**, 69, 1950.
62. Я. И. Френкель, УФН, **44**, 110, 1951.
63. М. Фишер. Природа критического состояния. Изд-во «Мир», М., 1968.
64. J. Frenkel. Wave Mechanics, Elementary Theory. Oxford, 1932, p. 267.
65. M. Born a. H. S. Green, A General Theory of Liquids. Cambridge, University Press, 1949.
66. Н. С. Крылов. Работы по обоснованию статистической физики. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие редактора . . . . .	3
<i>В. Я. Френкель</i> . К биографии Я. И. Френкеля . . . . .	5
<i>I. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА</i>	
Кванты и радио . . . . .	27
Частицы и волны . . . . .	55
Механические и электромагнитные свойства световых атомов (квантов) . . . . .	69
Происхождение и развитие волновой механики . . . . .	85
Принципы квантовой статистики . . . . .	109
<i>II. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ</i>	
Мистика мирового эфира . . . . .	136
Теория относительности Эйнштейна . . . . .	147
<i>III. ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ</i>	
Теория металлов . . . . .	174
Об элементарном выводе некоторых соотношений электронной теории металлов . . . . .	201
<i>IV. ФИЗИКА ЖИДКОСТЕЙ</i>	
Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обуслов- ленной ультразвуковыми колебаниями в жидкостях . . . . .	209
Теория жидкого состояния . . . . .	215
Действие электрического поля на струю жидкости . . . . .	238
О возможности замены шариков в подшипниках каплями . . . . .	244

*У. ИСТОРИЯ ФИЗИКИ. РАЗНОЕ*

Международный физический конгресс в память А. Вольты в г. Комо . . . . .	247
Метод аналогий в физике . . . . .	259
Проблемы современной физики . . . . .	275
Теоретическая физика в СССР за 30 лет . . . . .	306
Атомная энергия и ее освобождение . . . . .	338
Комментарии . . . . .	368
Даты жизни и деятельности Я. И. Френкеля . . . . .	378
Литература . . . . .	380

**Яков Ильич Френкель**  
**НА ЗАРЕ НОВОЙ ФИЗИКИ**

*Утверждено к печати*  
*Секцией научно-популярной литературы АН СССР*

Редактор издательства *Т. И. Сушкова*. Художник *М. И. Разуевич*  
Технический редактор *М. Н. Кондратьева*  
Корректоры *Н. А. Абрамова* и *Е. А. Гинстлин*

Сдано в набор 4/XI 1969 г. Подписано к печати 30/IV 1970 г. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. л. 6<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Печ. л. 12 +1 вкл. (1<sup>1</sup>/<sub>16</sub>) = 20,16 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 20,42.  
Бумага № 2. Изд. № 4116. Тип. вак. № 530. М-09655. Тираж 16000.

*Цена 1 р. 57 к.*

Ленинградское отделение издательства «Наука»  
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1





*Яков Ильич Френкель*  
(1894—1952)