ГЕЙЗЕНБЕРГ, ШРЕДИНГЕР, ДИРАК

СОВРЕМЕННАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

ТРИ НОБЕЛЕВСКИХ ДОКЛАДА

★ ГТТИ ★ 1934 ★

W. HEISENBERG, E. SCHRÖDINGER,
P. A. M. DIRAC

MODERN QUANTUM MECHANICS

THREE NOBEL REPORTS

TECHNICO-THEORETICAL STATE PRESS
LENINGRAD 1934 MOSCOW

В. ГЕЙЗЕНБЕРГ, Э. ШРЕДИНГЕР,
П. А. М. ДИРАК

СОВРЕМЕННАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

ТРИ НОБЕЛЕВСКИХ ДОКЛАДА

scanned by octopus

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1934 МОСКВА

ПЕРЕВОД С РУКОПИСИ
Д. ИВАНЕНКО

Художественное оформление
М. Вл. Ушакова-Поскочина

Редактор *Д. Д. Иваненко.* Технический редактор *Р. В. Эмдина.*
Корректор *В. О. Шпринг.*
Сдана в набор 9/IV 1934 г. Подписано к печати 14/V 1934 г.
Формат 82×111½₃₂. ГТТИ № 256. Бум. листов 1⁹/₁₆. Тип. зн. в 1 бум. л. 128.000.
Ленгорлит № 9487. Тираж 5.000 — авт. л. 3³/₄. Заказ 2567.

2-я тип. ОНТИ им. Евг. Соколовой. Ленинград, пр. Кр. Команд., 29.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Настоящий сборник составлен из докладов, читанных в Стокгольме тремя нобелевскими лауреатами. Получение премий за 1932 г. (Гейзенберг) и 1933 г. (Дирак и Шредингер) тремя физиками-теоретиками несомненно является отзвуком необычайно возросшего значения теоретической физики вообще и квантовой механики в частности.

В написанных достаточно популярно докладах читатель, помимо чисто физического материала, найдет указания и на философские воззрения авторов. Гейзенберг, являющийся ортодоксальным последовате-

лем «копенгагенской» школы, представляющей собою новейшую версию позитивизма, развивает взгляды на физическую теорию, чрезвычайно близкие к тем, которые защищали Дюгем и Мах и которые в свое время были подвергнуты основательной марксистской критике. Центральным мотивом философского credo Гейзенберга является защита «начала принципиальной наблюдаемости», этой новой формулировки старого принципа «чистого описания». Дирак, представляющий «оперативную» «кэмбриджскую» школу, не останавливается в своем докладе специально на философских вопросах. Однако, оппозиция его установкам «копенгагенцев», сказывающаяся например в введении непосредственно ненаблюдаемых отрицательных энергий, проявляется в его докладе достаточно определенно. Что касается Шредингера, то, не примыкая ни к одной из упомянутых школ, он занимает позицию, приближающуюся к защите «модельности» и «наглядности» физической теории. Признавая важность абстрактного математического формализма для физической теории, он (хотя и с оговорками) протестует против «начала принципиальной наблюдаемости», указывая при этом, что вытекающий из «начала» отказ от гипотез о том, «как в действительности устроен мир», есть просто-напросто уклонение от трудностей, которые ставит природа перед стремящейся раскрыть ее механизм человеческой мыслью.

В общем все три доклада представляют собою довольно яркие документы, характеризующие теоретические контуры идейного размежевания, имеющего место в современной физике.

Краткие биографии докладчиков, помещенные ниже, дают общие сведения об основных вехах их жизни.

* * *

Вернер Гейзенберг (Werner Heisenberg) родился в Вюрцбурге в 1901 г. Его отец, выдающийся византист, был членом-корреспондентом Академии Наук СССР. Гейзенберг прошел исключительную школу, работая в Мюнхене у Зоммерфельда, затем в Геттингене у Борна и, наконец, ассистентом Бора в Копенгагене.

Еще студентом Гейзенберг начал, с ряда статей по теории спектров, свою удивительную по разносторонности и плодотворности научную работу. В 1925 г. Гейзенберг печатает первую работу по новой квантовой механике, создавая тем самым ее первый вариант: матричную квантовую механику. В 1927 г. Гейзенберг публикует работу о принципе неопределенности, дающем обоснование новой механики.

Гейзенберг является главным представителем Боровской «копенгагенской» школы, защищающей положение о построении теории на основе «принципиально наблюдаемых» величин. Кроме создания основ, Гейзенбергу принадлежат фундаментальные работы по самым разнообразным вопросам квантовой механики, в частности, по задаче многих тел, квантовой электродинамике, а также теории ферромагнетизма и строению ядер.

С 1927 г. Гейзенберг — профессор теоретической физики Лейпцигского университета; в 1933 г. он получает премию Нобеля по физике за 1932 г.

Книга Гейзенберга: «Физичеекие принципы квантовой теории», издана ГТТИ, Л. 1932 г.; теория ядра изложена в докладе на Сольвейском конгрессе 1933 г. (печатается перевод). Большинство работ Гейзенберга напечатано в «Zeitschrift für Physik».

* * *

Эрвин Шредингер (Erwin Schrödinger), сын известного ботаника, родился в Вене в 1887 г.; окончил Венский университет и начал там же работу по экспериментальной и теоретической физике в 1911 г. После профессур в Штуттгарте, Бреслау, Цюрихе Шредингер в 1929 г. избирается членом Прусской Академии Наук и становится профессором Берлинского университета (кафедра Планка). После фашистского переворота в Германии Шредингер из протеста уехал в Оксфорд, хотя ему и не угрожал параграф о «неарийцах».

Кроме ряда отдельных работ по классической и квантовой физике, написанных, как и все его труды, замечательно ясным и остроумным языком, Шредингер создает, основываясь на идеях де Бройля, волновую механику (1926 г.) и строит законченную теорию цветов (1920—26 гг.). Прекрасные исследования по теории Дирака напечатаны Шредингером в 1929—1932 гг. в «Известиях Прусской Академии». В 1933 г. Шредингер делит вместе с Дираком премию Нобеля по физике за 1933 г.

Работы Шредингера по волновой механике перепечатаны из «Annalen der Physik» в отдельном сбор-

нике: *Abhandlungen über Wellenmechanik*, J. A. Barth, имеется французский перевод.

Теория цветов изложена в V томе, 2-го выпуска, 11-го издания книги J. Müller — C. Pouillet, Braunschweig, 1928; «Naturw.», *12*, 1923, и *13*, 1925.

* * *

Поль Адриен Морис Дирак (Paul Adrien Maurice Dirac), сын учителя языков, родился в Бристоле в 1902 г. После получения высшего технического образования Дирак специализируется по теоретической физике у Фаулера в Кэмбридже, где он получает стипендию.

В 1925 г., сразу же после первой работы Гейзенберга, Дирак начинает печатать свои фундаментальные работы по основам квантовой механики, используя метод скобок Пуассона. В 1927 г. Дирак строит одновременно с Йорданом общую теорию преобразований и создает теорию излучения и метод вторичного квантования. В 1928 г. появляется уравнение Дирака, в 1930 г. объяснение отрицательных энергий. С 1930 г. Дирак член Королевского Общества. Осенью 1932 г. Дирак получает после Лармора знаменитую старейшую Лукасианскую кафедру в Кэмбридже, которую ранее занимали Ньютон и Стокс. В 1933 г. Дирак вместе со Шредингером получает премию Нобеля по физике за 1933 г. Дирак неоднократно читал лекции в Америке, Японии, Франции. Друг советской науки, Дирак пять раз посетил Советский Союз, принимая здесь участие в съездах, конференциях, консультациях.

Книга Дирака: «Основы квантовой механики», издана ГТТИ, Л. 1932 (с дополнениями автора).

Основные работы Дирака напечатаны в «Proceedings of the Royal Society», London.

Все лауреаты — члены-корреспонденты Академии Наук СССР.

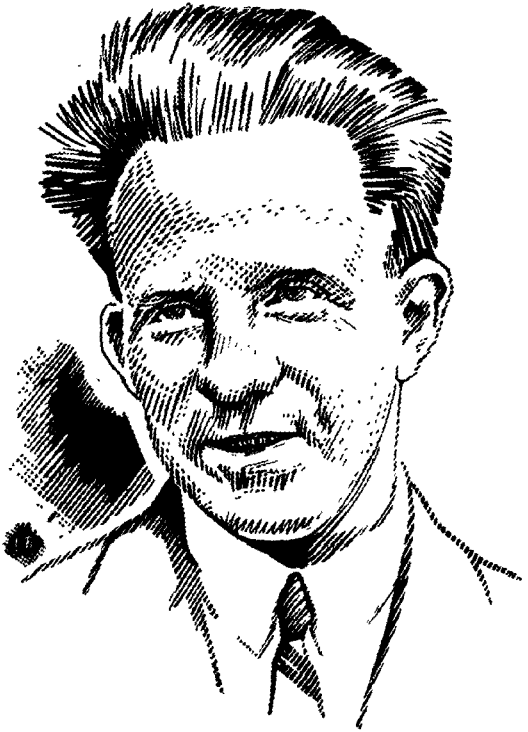
■

В. ГЕЙЗЕНБЕРГ

РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

W. HEISENBERG

DIE ENTWICKLUNG DER QUANTENMECHANIK



В. ГЕЙЗЕНБЕРГ

вантовая механика, о которой я буду здесь докладывать, по своей внешней форме возникла из попытки построить стройную математическую схему путем уточнения высказываний Боровского принципа соответствия. Физически новая точка зрения, которой квантовая механика отличается от классической физики, была подготовлена трудами многих исследователей, занимавшихся анализом трудностей, вскрытых в Боровской теории строения атома и в теории света.

В 1900 г. Планк, исследуя найденный им закон черного излучения, открыл в явлениях света совершенно чуждый классической физике прерывный элемент. Через несколько лет эта прерывность нашла

свою наиболее яркую формулировку в гипотезе световых квантов Эйнштейна. Невозможность объединить теорию Максвелла с наглядными представлениями, связанными с гипотезой световых квантов, принудила впоследствии физиков сделать вывод, что понимания явлений излучения возможно достигнуть только путем далеко идущего отказа от наглядного описания. Открытое уже Планком и использованное затем Эйнштейном, Дебаем и другими теоретиками обстоятельство, что элемент прерывности, найденный в явлениях излучения, играет важную роль также и в материальных процессах, нашло позднее свое выражение в Боровских основных постулатах квантовой теории. Эти постулаты вместе с квантовыми условиями атомного строения Бора—Зоммерфельда привели к качественному толкованию химических и оптических свойств атомов. Допущение основных постулатов квантовой теории стояло в непреодолимом противоречии с применением классической механики к атомным системам; с другой стороны, классическая механика, по крайней мере качественно, казалась необходимой для понимания свойств атомов. Это обстоятельство послужило новым аргументом для предположения, что понимание явлений природы, в которых играет существенную роль постоянная Планка, возможно только при значительном отказе от наглядного описания этих явлений. Классическая физика оказалась наглядным предельным случаем принципиально ненаглядной микрофизики, случаем, который осуществляется тем точнее, чем меньше Планковская постоянная сравнительно со значениями величины действия в системе. Из этого понимания

классической механики, как предельного случая квантовой, и возник принцип соответствия Бора, благодаря которому оказалось возможным перенести, по крайней мере качественно, ряд выводов классической механики на механику квантовую. В связи с началом соответствия дискутировалась возможность, что законы квантовой механики могут иметь принципиально статистический характер; особенно ясно статистическая природа их сказывалась в Эйнштейновском выводе Планковского закона излучения. Наконец, анализ связи теории излучения и теории атома, проделанный Бором, Крамерсом и Слэтером, привел к следующему положению вещей.

Согласно основным постулатам квантовой теории атомная система может находиться в дискретных стационарных состояниях, т. е. принимать дискретный ряд значений энергии; излучение и поглощение света подобной системой происходит внезапно, скачком, если речь идет об энергии атома. С другой стороны, наглядные свойства испущенного излучения описываются волновым полем, частота которого связана с разностью энергий атома в начальном и конечном состояниях соотношением: $E_1 - E_2 = h\nu$. Каждому стационарному состоянию атома сопоставлена совокупность величин, которые определяют вероятности перехода с испусканием света из этого состояния в какое-либо другое. Непосредственной связи между излучением, которое было бы испущено по классическим законам электроном, вращающимся на орбите, и этими величинами, определяющими вероятность испускания, не существует. Однако, согласно принципу соответствия Бора, каждому переходу

атома можно сопоставить определенный член разложения в ряд Фурье классической орбиты, и вероятность перехода подчиняется качественно тем же законам, как и интенсивность данной компоненты Фурье. Таким образом, хотя аналогия атома с планетной системой электронов в исследованиях Резерфорда, Бора, Зоммерфельда и других авторов и привела к качественному толкованию оптических и химических свойств атомов, все же коренное отличие атомного спектра от классического спектра электронной системы принуждает нас к отбрасыванию понятия орбиты электрона и к отказу от наглядного описания атома.

К пересмотру понятия орбиты электрона вынуждает также анализ экспериментов, необходимых для наблюдения этой орбиты. Именно, задав вопрос, каким образом возможно наблюдать движение электрона на его орбите в атоме, мы придем к выводу, что наиболее непосредственным способом будет наблюдение электрона, скажем, в микроскоп исключительно большой разрешающей силы. Но так как освещение объекта наблюдения в этом микроскопе должно быть произведено светом весьма малой длины волны, то уже первый световой импульс, который доходит от источника света к электрону и к нашему глазу, согласно законам эффекта Комптона выбросит электрон из его орбиты Таким образом, из всей орбиты возможно будет наблюдать только одну точку.

При такой ситуации казалось наиболее разумным с самого начала отбросить вообще понятие орбиты электрона, хотя оно и оправдывается опытами Вильсона, и только впоследствии уже исследовать, на-

сколько понятие орбиты электрона окажется допустимым в квантовой механике.

В классической теории задание частоты, амплитуды и фазы всех испущенных атомом световых волн было бы полным эквивалентом заданию электронной орбиты. Действительно, имея амплитуду и фазу испущенной волны, мы можем однозначно определить коэффициент соответственного члена в разложении электронной орбиты в ряд Фурье; таким образом, из знания всех амплитуд и фаз вполне определяется орбита электрона. Подобным же образом в квантовой механике совокупность всех амплитуд и фаз испущенного атомом излучения можно рассматривать как полную характеристику атомной системы, хотя истолкование этих величин в смысле наличия электронной орбиты, движение по которой ведет к излучению, и невозможно. На место координаты электрона в квантовой механике становится поэтому совокупность величин, соответствующих коэффициентам Фурье классического движения. Однако, эти коэффициенты не будут уже расположены по энергиям состояний и номерам гармонических обертонов, но будут соответствовать каждый раз двум стационарным состояниям атома и будут играть существенную роль для вероятностей перехода атома из одного стационарного состояния в другое. Подобная совокупность коэффициентов будет аналогична матрице, встречающейся в алгебре линейных преобразований. Совершенно таким же образом мы можем каждой величине классической механики, например, импульсу или энергии электронов сопоставить соответствующую матрицу в квантовой ме-

ханике. Чтобы выйти затем из круга простого представления эмпирического материала, необходимо связать закономерным образом матрицы, сопоставленные различным величинам, так же, как соответствующие величины классической механики связываются в ней уравнениями движения. Если мы стремимся при этом к наиболее близкому соответствию между классической и квантовой механикой и берем сложение и умножение рядов Фурье за образец для сложения и умножения матриц квантовой теории, то наиболее естественным будет определить произведение двух величин, представленных матрицами, через матрицу произведения в смысле линейной алгебры; последнее допущение напрашивается уже в виду результатов теории дисперсии Крамерса-Ладенбурга.

В виду всего этого представлялось последовательным просто перенести уравнения движения классической физики в квантовую механику, понимая их как соотношение между матрицами, соответствующими классическим переменным. Квантовые условия Бора-Зоммерфельда, которые также оказалось возможным истолковать как соотношение между матрицами квантовой механики, вместе с уравнениями движения были достаточны теперь для определения всех матриц и тем самым всех экспериментально наблюдаемых свойств атома.

Заслугой Борна, Йордана и Дирака была разработка набросанной только что математической схемы в последовательный и практически пригодный теоретический аппарат. Прежде всего этими авторами было замечено, что квантовые условия могут быть написаны как перестановочные соотношения между матри-

цами, представляющими координату и импульс электрона. При этом имеют место следующие уравнения (p_r — матрицы импульса, q_r — матрицы координат):

$$p_r q_s - q_s p_r = \frac{h}{2\pi i}\delta_{rs};$$

$$q_r q_s - q_s q_r = 0;$$

$$p_r p_s - p_s p_r = 0; \quad \delta_{rs} = \begin{cases} 1 \text{ при } r = s \\ 0 \text{ при } r \neq s \end{cases}$$

При помощи этих перестановочных соотношений удалось и в квантовой механике доказать наличие законов, играющих основную роль в механике классической, именно постоянство энергии, импульса и момента количества движения. Построенная таким образом математическая схема в конце концов внешне весьма похожа на классическую теорию и отличается от последней только наличием перестановочных соотношений, при помощи которых впрочем уравнения движения могут быть выведены из функции Гамильтона.

Однако физические следствия квантовой теории существенно отличны от выводов классической механики, что принуждает нас к подробному анализу наглядного содержания квантовой механики. В описанной до сих пор форме квантовая механика позволяет произвести рассмотрение излучения, испущенного атомом, значений энергии стационарных состояний и других характерных для этих состояний величин. Таким образом, теория согласуется с опытным материалом, накопленным исследованиями атомных спектров. Однако, во всех тех случаях, когда

речь идет о наглядном описании течения процесса во времени, например об истолковании Вильсоновских фотографий, математический аппарат теории повидимому не дает никаких средств к адэкватному описанию экспериментальных фактов. В этом пункте квантовой механике пришла на помощь волновая механика, развитая Шредингером на основе тезисов де Бройля.

В своих исследованиях, о которых будет здесь говорить сам автор, Шредингер свел вычисление значений энергии атома к проблеме собственных значений, определяемой некоторой краевой задачей в координатном пространстве соответствующей атомной системы. После того как Шредингер доказал математическую эквивалентность построенной им волновой механики с механикой квантовой, плодотворное соединение обеих столь различных физических идей привело к чрезвычайному расширению и обогащению математического аппарата квантовой теории. С одной стороны, только волновая механика позволила приступить к математическому анализу сложных атомных систем, с другой стороны, анализ связи обеих теорий привел Дирака и Йордана к развитию так называемой теории преобразований. Не имея возможности останавливаться сейчас детально на математической стороне последней теории, я ограничусь только формулировкой ее принципиального физического значения. Теория преобразований, использовав физические принципы квантовой механики в своем обобщенном математическом аппарате, позволила совершенно общим образом вычислить для атомных систем вероятность наступления определенного экспе-

риментально наблюдаемого события при заданных экспериментальных условиях. Предполагавшаяся уже ранее в исследованиях по теории излучения и сформулированная точно в Борновской теории столкновений гипотеза, что волновая функция определяет вероятность наличия частицы, оказалась частным случаем общей закономерности и естественным следствием основных положений квантовой механики. Благодаря этому статистическому истолкованию волновой механики, а также полному выяснению того обстоятельства, что теория Шредингера имеет дело с волнами в многомерном координатном пространстве, связь идей Шредингера с первоначальными тезисами де Бройля оказалась, конечно, не столь близкой. Однако, Шредингеру и позднее Йордану, Клейну и Вигнеру удалось разработать до конца в рамках математического аппарата теории также и первоначальную мысль де Бройля, возникшую еще до создания квантовой механики, о наглядных материальных волнах, распространяющихся в пространстве и времени. Я позволю себе, прежде чем перейти к наглядному истолкованию квантовой механики, остановиться несколько на этом вопросе о существовании волн материи в трехмерном пространстве, так как решение его удалось только благодаря объединению волновой и квантовой механики.

Еще задолго до развития квантовой механики Паули на основании закономерностей периодической системы элементов установил известный принцип, что в определенном квантовом состоянии всегда может находиться не больше одного электрона. Перенесение этого принципа в квантовую механику

оказалось возможным на основании следующего результата, показавшегося сначала совершенно неожиданным: совокупность стационарных состояний, которые может принимать атомная система, распадается на определенные классы таким образом, что атом из некоторого состояния, принадлежащего к одному классу, иногда не может перейти в какое-либо состояние другого класса под влиянием каких бы то ни было возмущений. Подобный класс состояний, как было затем совершенно ясно установлено работами Вигнера и Хунда, характеризуется определенным свойством симметрии Шредингеровской собственной функции по отношению к перестановке координат двух электронов. В виду принципиальной тождественности электронов, всякое внешнее возмущение атома остается неизменным при перестановке двух электронов и поэтому не дает повода к каким бы то ни было переходам между состояниями различных классов. Принцип Паули и установленная на его основе статистика Ферми — Дирака эквивалентны допущению, что в природе осуществляется только тот класс стационарных состояний, в котором собственная функция меняет знак при перестановке двух электронов. Выбор же симметричной системы термов привел бы согласно Дираку не к принципу Паули, но к так называемой статистике Бозе — Эйнштейна для электронов.

Между понятием классов стационарных состояний, подчиняющихся принципу Паули или статистике Бозе — Эйнштейна, и представлением де Бройля о волнах материи существует своеобразная связь. Пространственный волновой процесс подлается трак

товке согласно принципам квантовой теории, если проанализировать его согласно теореме Фурье и рассматривать затем каждую отдельную компоненту Фурье волнового движения как систему с одной степенью свободы по обычным законам квантовой механики. Если применить этот метод квантового описания волновых процессов, оказавшийся весьма плодотворным также и в исследованиях Дирака по теории излучения, к волнам материи де Бройля, то мы получим точно те же результаты, какие дает квантовая механика совокупности материальных частиц в случае выбора симметричной системы термов. Оба метода будут согласно Йордану и Клейну эквивалентны даже тогда, когда мы учтем взаимодействие электронов, т. е. примем во внимание в волновой теории де Бройля энергию поля, вызванную непрерывно распределенным пространственным зарядом. В этой теории можно последовательно применить также Шредингеровское рассмотрение тензора импульса — энергии, сопоставленного волнам материи. Согласно исследованиям Йордана и Вигнера изменение перестановочных соотношений, лежащих в основе этой квантовой теории волн, приводит к математической схеме, эквивалентной квантовой механике, соединенной с принципом Паули, т. е. к выбору антисимметричной системы термов.

Эти работы выяснили, что сравнение атома с планетной системой, состоящей из ядра и электронов, не является единственно возможной наглядной картиной, которую мы можем нарисовать для атома. Напротив, очевидно столь же правильно представлять себе атом как облако заряда и использовать эту

картину, согласно принципу соответствия, для получения качественных заключений о поведении атома. Однако, более детальное рассмотрение этих выводов является уже делом волновой механики.

Возвратимся теперь к математической схеме квантовой механики; применение ее к физическим проблемам частью вытекало из первоначальных основных допущений теории, частью покоилось на теории преобразований, построенной при помощи волновой механики. Теперь речь идет о том, чтобы установить наглядное содержание теории путем ее сравнения с классической физикой.

В классической физике целью исследования являлось определение объективных, протекающих в пространстве и времени, явлений и исследование законов, определяющих течение процессов по начальным данным. Проблема считалась решенной в классической физике, если удавалось доказать, что какой-либо процесс объективно имел место в пространстве и времени, и показать, что он подчиняется законам классической физики, формулированным в дифференциальных уравнениях. Способ, каким было достигнуто познание этого процесса, перечисление наблюдений, которые привели к его экспериментальному наблюдению, являлись совершенно несущественными. Точно также для заключений классической теории не играл роли вопрос, путем каких наблюдений проверялись выводы теории. Однако, в квантовой теории мы встречаемся с совершенно иным положением вещей. Уже тот факт, что математическая схема квантовой механики не может быть понимаема, как наглядное описание процессов, про-

текающих в пространстве и времени, показывает, что в квантовой механике вовсе не идет речь об объективном установлении пространственно-временных событий. Напротив, математическая схема квантовой механики дает возможность вычислить лишь величину вероятности для какого-либо экспериментального результата, основанного на экспериментальном знании предыдущего состояния атомной системы, поскольку последняя не была подвержена никаким иным возмущениям, кроме тех, которые требуются самим экспериментом. То обстоятельство, что даже при наиболее полном экспериментальном задании системы для определенного результата следующего эксперимента можно указать только его вероятность, показывает, что каждое наблюдение приводит к некоторому прерывному изменению математических величин, характеризующих атомный процесс, и, следовательно, к прерывному изменению самого физического явления. В то время как в классической теории способ наблюдения был несущественным для течения процесса, в квантовой теории возмущение, с которым связано каждое наблюдение атомных явлений, играет решающую роль. Так как, далее, результат наблюдения вообще приводит только к высказываниям о вероятности определенных результатов более поздних наблюдений, то, как показал Бор, решающим для непротиворечивого построения квантовой механики является учет принципиально неподдающейся контролю доли рассматриваемого возмущения. Подобное отличие классической физики от физики атомной понятно, ибо для тяжелых тел, например планет, вращающихся вокруг солнца, давле-

ние солнечного света, отражающегося от их поверхности и необходимого для наблюдения, не играет никакой роли; для мельчайших же частиц материи каждое наблюдение, благодаря малой массе, означает существенное вмешательство в их физическое поведение.

Возвратимся поэтому к математической схеме квантовой теории. Квантовым числам играет затем важную роль при установлении границ, внутри которых возможно наглядное описание атомных процессов. Если бы существовали эксперименты, которые позволяли бы провести точное измерение всех сторон атомной системы, необходимых для ее классического описания, которые давали бы, например, точные значения для положения и скорости каждого электрона системы в каждый данный момент, то, все равно, результаты этих экспериментов не могли быть использованы в нашей математической схеме, больше того, они бы прямо ей противоречили. Таким образом, здесь очевидно опять играет роль та же принципиально неподдающаяся контролю часть возмущения, вызванного самим измерением, которая не позволяет провести точного измерения классических величин и тем самым делает возможным применение квантовой механики. Более детальное исследование математической стороны теории показывает нам, что между точностью, с которой может быть установлено положение частицы, и точностью, с которой одновременно может быть измерен ее импульс, существует определенное соотношение. Именно, произведение вероятных ошибок при измерении положения и импульса всегда будет по меньшей мере равняться постоянной

Планка, деленной на 4π. Таким образом, всегда должно иметь место

$$\Delta p \, \Delta q \geqslant \frac{h}{4\pi},$$

где p и q обозначают канонически сопряженные переменные. Эти соотношения неопределенности для результатов измерения классических переменных являются необходимым условием того, что результат измерения может быть выражен в математической схеме квантовой теории. На ряде примеров Бор показал, каким образом непременно связанное с каждым наблюдением возмущение в самом деле приводит к тому, что нижняя граница, установленная соотношениями неопределенности, не может быть перейдена. То обстоятельство, что часть этого возмущения остается принципиально неизвестной, покоится, согласно Бору, в конце концов, на неопределенности, которая вносится самим понятием измерения. Действительно, экспериментальное описание каких бы то ни было пространственно-временных процессов всегда предполагает некоторую твердую систему (например, координатную систему, в которой покоится наблюдатель), относительно которой и производятся все измерения. Допуская, что эта система является «твердой», мы тем самым отказываемся заранее от знания ее импульса, так как понятие «твердый» как раз и означает, что какие бы то ни было изменения импульса системы при взаимодействии с ней не должны иметь места. Принципиально необходимая неопределенность, допущенная в этом месте, распространяется

затем дальше через измерительный аппарат на атомные процессы.

При таком положении вещей естественно попытаться объединить объект наблюдения, измерительный аппарат и наблюдателя в одну квантово-механическую систему и тем самым устранить всю неопределенность. Здесь важно, однако, подчеркнуть, что самый акт измерения по необходимости является наглядным, так как в физике в конце концов речь всегда идет только об описании пространственно-временных процессов. Поведение наблюдателя и его измерительного прибора должно поэтому анализироваться по законам классической физики, ибо в противном случае вообще не имела бы места никакая физическая проблема. Поэтому внутри измерительных приборов также, как было подчеркнуто Бором, все процессы должны рассматриваться в смысле классической теории, как детерминированные; последнее является кроме того необходимым предположением для возможности однозначно заключить, что собственно произошло, на основании результатов измерения. Обычная схема классической физики, объективирующая результаты наблюдения, при помощи допущения процессов в пространстве и времени, переносится, следовательно, также и в квантовую теорию и применяется здесь до тех пор, пока она не находит свою принципиальную границу, символизируемую постоянной Планка, сталкиваясь с ненаглядными чертами атомных процессов. Для атомных процессов наглядное описание возможно только внутри известных границ точности, и внутри этих границ также всегда имеют место законы классической физики.

В виду наличия границ точности, установленных соотношениями неопределенности, классическая картина атома не может быть однозначно определена. Напротив, основой для наглядного представления атома являются в равной мере как корпускулярная, так и волновая картины.

Законы квантовой механики имеют принципиально статистический характер. Если мы установим путем эксперимента у какой-либо атомной системы все определяющие ее данные, то результат будущего наблюдения, вообще говоря, не может быть точно предсказан. Но в каждый позднейший момент времени существуют наблюдения, результаты которых могут быть предсказаны точно; для других наблюдений можно лишь вывести вероятности того или иного экспериментального результата. Значительная степень определенности, присущая также и законам квантовой механики, приводит например к тому, что законы сохранения энергии и импульса имеют место в полной строгости. Эти законы могут быть проверены с любой точностью и выполняются затем с точностью, с которой они были доказаны. Статистический характер законов квантовой механики сказывается однако в том, что точное исследование энергетического состояния исключает одновременное наблюдение соответственного процесса в пространстве и времени.

Наиболее ясным анализом оснований квантовой механики мы обязаны исследованиям Бора, который в особенности подчеркнул значение понятия дополнительности для толкования квантово-механических закономерностей. Уже соотношения неопределен-

ности дают пример того, как в квантовой механике точное знание одной переменной может исключать точное знание других переменных. Это соотношение дополнительности между различными аспектами одного и того же физического процесса действительно является характерным для всего типа закономерностей квантовой механики. Как я только что указал, описание энергетических закономерностей находится в исключающем соотношении к исследованию пространственно-временного течения событий. Подобным же образом рассмотрение химических свойств молекулы является дополнительным к исследованию движений отдельных электронов в молекуле; наблюдение явлений интерференции стоит в дополнительном соотношении к наблюдению отдельного светового кванта. Наконец, и области применения классической и квантовой механики также можно охарактеризовать с этой точки зрения. Классическая физика представляет тот вид стремления к познанию природы, при котором мы стараемся заключить об объективных процессах, по существу исходя из наших ощущений; поэтому мы отказываемся здесь от учета влияний, которые оказывают все наблюдения на наблюдаемый объект. Классическая физика как раз и кончается в том месте, где нельзя уже отказаться от учета влияния наблюдения на исследуемые процессы. Квантовая механика, наоборот покупает возможность рассмотрения атомных процессов путем частичного отказа от их описания в пространстве и времени и их объективирования.

Для того чтобы не задерживаться на слишком абстрактных высказываниях о закономерностях кванто-

вой механики, я хотел бы пояснить кратко на известном примере, в какой мере понимание наглядных процессов, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, может быть достигнуто при помощи атомной теории. Много раз уже внимание физиков возбуждало неожиданное возникновение из жидкости, например, пересыщенного раствора соли, кристаллов правильной формы. Согласно атомной теории, силой, играющей роль при этом процессе образования формы, является в некотором роде свойство симметрии решения уравнения Шредингера; таким образом, мы можем сказать, что образование кристаллов объясняется теорией атома. Несмотря на это, в процессе остается некоторый статистический, несводимый далее, элемент, мы готовы сказать, элемент исторический. Действительно, даже при самом полном знании состояния жидкости перед образованием кристалла, форма кристалла не определяется законами квантовой механики. Образование кристаллов правильной формы является лишь подавляюще более вероятным, чем образование бесформенного куска. Но окончательная форма обязана своим возникновением некоторому, частью уже принципиально неанализируемому далее, элементу случая.

Прежде чем закончить этот обзор квантовой механики, я позволю себе совсем кратко остановиться на вопросе, чего можно ожидать от дальнейшего развития этой области знания. Излишне упоминать при этом, что развитие теории должно также основываться на исследованиях де Брогля, Шредингера, Борна и Дирака. Внимание физика-теоретика прежде всего привлекает здесь вопрос о том, каким образом

можно соединить друг с другом требования специальной теории относительности и теории квант. Несмотря на исключительные успехи, достигнутые Дираком в этом направлении, о которых здесь будет говорить сам автор, все же остается открытым вопрос, возможно ли будет удовлетворить, не впадая в противоречия, требованиям обеих теорий без одновременного определения зоммерфельдовской постоянной тонкой структуры.

Предпринятые до сих пор попытки релятивистской формулировки квантовой теории исходят все из наглядных представлений, столь близких классической физике, что определение постоянной тонкой структуры в рамках подобных систем понятий представляется невозможным. Впрочем, построение обсуждаемой здесь системы понятий вероятно будет тесно связано с дальнейшим развитием квантовой теории волновых полей, и мне кажется, что эта последняя математическая схема, несмотря на подробную разработку ее различными авторами (Дирак, Паули, Йордан, Клейн, Вигнер, Ферми), еще не использована до конца.

Важнейшие указания для дальнейшего развития квантовой механики можно получить также из экспериментов, относящихся к строению атомных ядер. Анализ этих экспериментов при помощи теории Гамова повидимому указывает на то, что между элементами атомного ядра действуют силы, несколько отличающиеся от сил, определяющих строение атомной оболочки. Опыты Штерна показывают далее, что поведение тяжелых элементарных частиц не может быть описано при помощи математического

аппарата дираковской теории электрона. Таким образом, в будущем мы должны быть готовы ко всяким неожиданностям, которые могут возникнуть как в области ядерной физики, так и при исследовании космических лучей. Как бы, однако, ни шло дальнейшее развитие теории, предыдущая история квантовой механики указывает на то, что понимание неясных еще сторон строения атома может быть достигнуто только путем дальнейшего отказа от наглядности и стремления к объективированию. У нас, пожалуй, нет оснований сожалеть об этом. Действительно, вспоминая о значительных гносеологических трудностях, с которыми приходилось бороться наглядному представлению об атомах прежней физики, мы можем надеяться, что развивающаяся теперь абстрактная атомная физика окажется в будущем более гармоничной составной частью всего великого здания науки.

Э. ШРЕДИНГЕР

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

E. SCHRÖDINGER

DER GRUNDGEDANKE DER WELLENMECHANIK

Э. ШРЕДИНГЕР

Когда луч света проходит через оптический прибор, например трубу или фотографический объектив, он испытывает на каждой преломляющей или отражающей поверхности изменение направления. Мы можем построить ход луча, если известны оба простых закона, которые управляют этими изменениями направления: закон преломления, открытый двести лет назад Снеллиусом, и закон отражения, известный уже больше чем две тысячи лет назад Архимеду. На рис. 1 показан простой пример луча $A — B$, который испытывает преломление, подчиняющееся закону Снеллиуса на каждой из четырех граничных поверхностей двух линз.

Ферма сформулировал закон распространения луча света с гораздо более общей точки зрения. Свет распространяется в различных средах с различной скоростью, и путь луча определяется так, как будто бы лучу было важно возможно быстрее достигнуть той точки, в которую он приходит. (Заметим при этом, что за начальную и конечные точки можно взять любые две точки вдоль луча). Малейшее отклонение от действительного пути означало бы замедление. В этом заключается знаменитый принцип *кратчайшего оптического пути* Ферма, замечательным образом определяющий всю судьбу светового луча в одном единственном положении, даже и в том случае, если свойства среды изменяются не скачком на какой-либо поверхности, но постепенно от точки к точке. Примером последнего является земная атмосфера. Чем глубже проникает в нее падающий извне луч света, тем медленнее распространяется он во все более и более плотном воздухе; хотя разница в скорости распространения и будет чрезвычайно незначительной, принцип Ферма все же требует при этом, чтобы путь луча света был вогну-

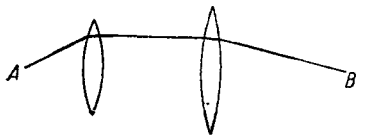


Рис. 1.

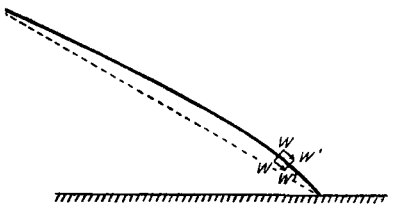


Рис. 2.

тым по отношению к земле (см. рис. 2), ибо тогда луч несколько дольше будет задерживаться в высших «более быстрых», слоях и придет к цели скорее, чем на более коротком прямом пути (на рисунке нанесен пунктиром; небольшой четырехугольник $WW'W'W$ пока не играет роли).

Я думаю, вы все замечали, что солнце, находясь у горизонта, кажется не круглым, но сплющенным.

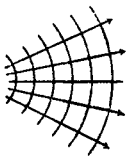


Рис. 3.

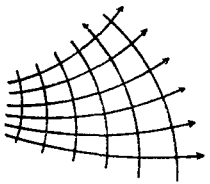


Рис 4

так что его вертикальный диаметр представляется укороченным. Это также есть следствие искривления лучей. Согласно волновой теории света лучи имеют, собственно говоря, только фиктивное значение. Они не являются физическими траекториями каких бы то ни было световых частиц, но лишь математическим вспомогательным построением, так называемыми ортогональными траекториями волновых поверхностей, т. е. также воображаемыми линиями; последние направлены в каждой точке перпендикулярно к волновой поверхности в ту сторону, в которую двигается последняя (см. рис. 3, на котором изображен простейший случай концентрических шаровых волновых поверхностей, и, следовательно, прямых лучей, тогда как рис. 4 разъясняет случай кри-

волинейных лучей). Представляется удивительным, что столь важный всеобщий принцип относится непосредственно к этим математическим вспомогательным линиям, а не к волновым поверхностям, в виду чего принцип Ферма можно было бы рассматривать как некоторый математический курьез. На самом деле все обстоит совершенно иначе. Только с точки зрения волновой теории принцип Ферма становится вполне понятным и перестает быть чудом. Действительно, с волновой точки зрения так называемая кривизна луча света является гораздо более понятной, чем поворот волновой поверхности, который тривиальным образом должен иметь место, если соседние части волновой поверхности распространяются с различной скоростью; точно также, например, если рота солдат выполняет команду «захождения направо», то солдаты делают шаги различной величины: правофланговый — наименьший, левофланговый — наибольший шаг. В нашем примере с преломлением луча в земной атмосфере (рис. 2) кусочек волновой поверхности WW должен обязательно проделать поворот направо к $W'W'$, так как его левая часть лежит в более высоком слое менее плотного воздуха, и поэтому движется быстрее, чем правая часть, лежащая ниже [1]).

[1]) Укажем кстати здесь на случай, для которого представление Снеллиуса оказывается неприменимым. Направленный горизонтально луч света, казалось, должен был бы оставаться горизонтальным, ибо ведь в горизонтальном направлении показатель преломления не меняется. В действительности же горизонтальный луч искривляется больше всякого другого, что непосредственно очевидно согласно представлению загибающегося волнового фронта.

При ближайшем рассмотрении оказывается, что принцип Ферма по своему содержанию совершенно эквивалентен тривиальному и само собой разумеющемуся утверждению, что, при заданной переменной от точки к точке скорости света, фронт волны должен загибаться указанным образом. Я не имею возможности доказывать это здесь, но попытаюсь сделать указанное утверждение правдоподобным. Вернемся опять к примеру маршрующего отряда солдат. Пусть для того, чтобы сохранить полную правильность фронта, солдаты соединены длинной палкой, которую каждый твердо держит в руках. Сейчас ничего не будет говориться о захождении, команда гласит просто: «пусть каждый идет, или бежит, как можно быстрее». Если характер рельефа почвы медленно меняется от точки к точке, то сначала, скажем, правое, затем левое крыло фронта будет двигаться быстрее, и сами собой будут осуществляться повороты фронта. Через некоторое время мы заметим, что пройденный путь не является прямолинейным, но был как-то искривлен. Тот факт, что этот криволинейный путь в точности совпадает с кратчайшим в смысле времени прибытия в данный пункт при заданном рельефе, является по меньшей мере весьма правдоподобным, так как ведь каждый солдат старался двигаться как можно быстрее. Отметим также, что поворот фронта всегда происходит в том направлении, в котором рельеф становится более тяжелым, поэтому в конце концов все выглядит так, как будто солдаты нарочно «обошли кругом» то место, где они должны были бы двигаться медленнее.

Таким образом, принцип Ферма представляется просто тривиальной квинтэссенцией волновой теории. Поэтому совершенно удивительным показалось открытие, сделанное в один прекрасный день Гамильтоном, что и действительное движение материальных точек в силовом поле (например, планет вокруг солнца, или брошенного камня в поле тяжести земли) подчиняется совершенно такому же общему принципу, получившему имя своего автора и сделавшему последнее знаменитым. Хотя принцип Гамильтона и не говорит совсем точно, что материальная точка выбирает наиболее быстрый путь, но его утверждение *столь* близко, аналогия с принципом кратчайшего оптического пути *столь* непосредственна, что является загадочной. Казалось, что природа как-будто осуществила одну и ту же закономерность двумя различными способами. Один раз, в случае света, при помощи довольно ясной игры волн, другой раз, в случае материальных точек, где положение вещей было непонятно, если только не стараться и здесь также говорить о волновой природе. Последнее предположение казалось сперва совершенно исключенным, ибо «материальные точки», на которых были подтверждены законы механики, в то время были просто большими видимыми телами, частью *очень* большими, например, планетами, и говорить о чем-то вроде их «волновой природы» вовсе не представлялось возможным.

Мельчайшие последние частицы материи, которые мы сейчас с гораздо большим правом называем «материальными точками», казались тогда еще чем-то совершенно гипотетическим. Только после откры-

тия радиоактивности развитие экспериментальной техники привело к тому, что оказалось возможным изучать свойства отдельных корпускул или частиц; в настоящее время возможно даже остроумным способом Вильсона фотографировать и (при помощи стерсофотографии) весьма точно измерять пути отдельных частиц. В пределах точности этих измерений для движения корпускул подтверждаются те же механические законы, что и для больших тел, планет и т. д. Впрочем, выяснилось, что, конечно, ни молекула, и ни отдельный атом не могут считаться «последними камнями» материи, но что и атом является весьма сложной системой. В нашем представлении возникли картины строения атомов *из* частиц, повидимому, аналогичные картине планетной системы. Вполне естественным было попытаться сперва сохранить здесь те же законы движения, которые столь замечательно оправдались для больших тел. Это значит, что к внутреннему поведению атома также была применена механика Гамильтона, которая, как я указал выше, формулируется в гамильтоновом принципе. То обстоятельство, что этот принцип весьма аналогичен оптическому принципу Ферма, было почти совсем забыто. Если об этом и вспоминали, то усматривали здесь только забавную случайность математической теории.

Весьма трудно, не вдаваясь в детали, составить правильное представление о том, сколь успешно, или — неуспешно, было применение этой классически-механической картины к атому. С одной стороны, принцип Гамильтона оказался надежнейшим и лучшим проводником, без которого просто нельзя было

обойтись; с другой стороны, для правильного описания опытных фактов необходимо было допустить вмешательство совершенно новых, непонятных требований, так называемых квантовых условий и квантовых постулатов. Они звучали как грубые диссонансы в симфонии классической механики, и все же странным образом казались созвучными ей.

Математически можно выразить это положение вещей следующим образом: в то время как принцип Гамильтона требует только, чтобы некоторый интеграл был минимумом, но не определяет значений этого минимума, квантовые условия ограничивают значение минимума целыми кратными универсальной мировой постоянной, именно Планковской постоянной действия. Но это только побочное замечание. Положение вещей было довольно безнадежным. Если бы старая механика была совсем отброшена, дело не обстояло бы еще столь скверно, у нас были бы открыты возможности для создания новой механики. Мы же стояли перед трудной задачей спасти *сущность* механики, чье дыхание ясно чувствовалось в микрокосме, и в то же время, так сказать, выпросить у нее признания квантовых условий, в качестве вытекающих из ее оснований положений, а не грубых внешних требований.

Выход был найден в упоминавшейся уже возможности усмотреть в принципе Гамильтона также результат игры волн, который собственно и лежит в основе движения материальных точек точно так же, как мы уже давно привыкли видеть волны в явлениях света с их принципом Ферма. Отдельная траектория материальной точки теряет впрочем, вследствие

этого, свой непосредственный физический смысл и становится чем-то фиктивным, вроде отдельного изолированного луча света. Но сущность теории, минимальный принцип, не только остается незатронутым, но лишь при волновом способе рассмотрения раскрывает свое истинное простое значение, как уже указывалось выше. Новая теория, собственно говоря, вовсе не является *новой*; она представляет собой органическое продолжение, хотелось бы сказать, более тонкое толкование старой теории.

Но каким же образом могло привести это новое, более «тонкое» толкование к заметно иным результатам, как смогло оно устранить трудности, встретившиеся в атоме, с которыми старая теория не могла справиться? Каким образом прежнее «грубое вмешательство» квантовых условий стало терпимым, или даже оказалось связанным с развитием новых идей?

Эти вопросы лучше всего разъяснить также путем оптической аналогии. Я назвал выше с полным правом принцип Ферма квинтэссенцией волновой теории света. Несмотря на это, он не может избавить нас от более точного изучения самого волнового процесса. Так называемые явления диффракции и интерференции можно понять, только проследив в деталях движение волн, так как при этом речь идет не только о том, куда в конце концов придет волна, но также о том, в какой фазе придет она туда в данный момент времени. При старых, более грубых, экспериментах эти явления играли роль только незначительных деталей и ускользали от наблюдения. Как только, однако, на них было обращено внимание и они были правильно, волновым образом, истолкованы,

оказалось нетрудным придумать опыты, в которых волновая природа света проявляется не только в деталях, но совсем ясно во всем характере явления.

Позвольте мне разъяснить это на двух примерах таких оптических инструментов, как телескоп, микроскоп и т. д. Мы хотим получить при помощи последних резкое изображение, т. е. стремимся заставить сойтись в одной точке, так называемом фокусе, все лучи, исходящие из некоторой точки рассматриваемого объекта (см. рис. 5). Сначала каза-

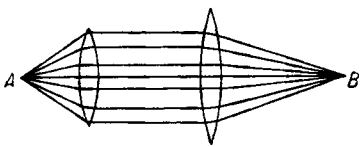


Рис. 5.

лось, что здесь имеются только трудности геометрической оптики, впрочем достаточно серьезные. Позднее выяснилось однако, что даже у наилучше сконструированных оптических приборов соединение лучей гораздо хуже, чем следовало ожидать, принимая, что каждый луч, независимо от соседних, точно следует принципу Ферма. Свет, исходящий из некоторой точки объекта и воспринимаемый оптическим прибором, не соединяется позади последнего опять в одну точку, но распространяется на маленькой, так называемой диффракционной, окружности. которая впрочем оказывается в большинстве случаев кругом лишь потому, что края линз и экранов являются окружностями.

Причиной этого явления, называемого диффрак-

цией, является то, что не все шаровые волны, исходящие из данной точки, могут быть восприняты прибором. Края линз, или экраны выделяют только часть волновых поверхностей (см. рис. 6), и, если позволено будет употребить наглядное выражение, пораженные части волн противятся строгому соединению в одной точке и порождают несколько размазанную или размытую картину. Размазанность самым тесным образом связана с *длиной волны* света

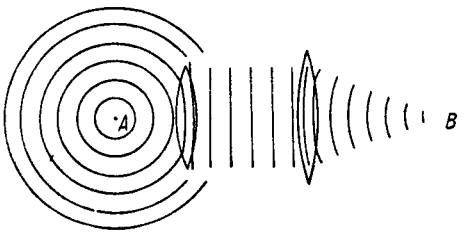


Рис. 6.

и, в виду этой глубокой теоретической причины, является совершенно неизбежной. В начале едва отмеченная, эта принципиальная размазанность ограничивает разрешающую силу современного микроскопа, столь успешно поборовшего все остальные трудности, стоявшие на пути к идеальному изображению. От объектов, которые не превосходят размерами длину волны или даже являются более тонкими, мы получаем изображения, имеющие отдаленное сходство с оригиналом, или даже вовсе ему не соответствующие.

Вторым, еще более простым примером является тень, которую дает небольшой точечный источник

света от непрозрачного предмета. Чтобы построить форму тени, мы должны проследить каждый луч света и посмотреть, не мешает ли ему непрозрачное тело достичь экрана. Край тени образуется теми лучами света, которые, проходя мимо, еще касаются края предмета. Из опыта известно, что край тени даже при точечном источнике света и совершенно резкой границе предмета, дающего тень, в действительности не будет резким. Причина этого совершенно та же, что и в прежнем случае. Фронт волны, так сказать, разрезается предметом (см. рис. 7), что приводит к образованию нерезкого края тени, который был бы непонятен, если бы отдельные лучи света являлись самостоятельными и распространялись независимо друг от друга.

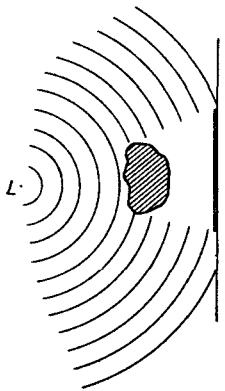


Рис. 7

Это явление, которое также обозначается дифракцией, у больших тел вообще не слишком ярко выражено. Но если тело, дающее тень, имеет незначительные размеры, хотя бы в одном направлении, то дифракция будет проявляться тогда прежде всего в том, что вообще не будет иметь место собственно тени, во-вторых же, и значительно ярче, в том, что этот небольшой предмет сам окажется светящимся и испускающим свет по всем направлениям (впрочем, преимущественно под малыми углами к падающему свету). Конечно, каждый из вас наблюдал так называемую «солнечную пыль» на пути

луча света, проникающего в темную комнату. Небольшие стебли травы и паутинные нити на вершине холма, за которым прячется солнце, или волосы человека, стоящего против солнца, светятся часто замечательно красиво в диффрагированном свете, па чем покоится также возможность видеть дым и туман. Дело идет собственно не о самом теле, но о небольшой области в его непосредственной близости, в которой тело вызывает значительное возмущение падающего волнового фронта. Интересно и важно для дальнейшего отметить, что область возмущения всегда в каждом направлении имеет размеры одной или немногих длин волн, как бы ни был мал возмущающий предмет. Таким образом, здесь мы опять встречаем тесную связь явлений диффракции с длиной волны. Последнее будет пожалуй наиболее ясным образом иллюстрировано путем сравнения с другим волновым процессом, именно звуком. Благодаря значительно большей длине волны, измеряемой здесь сантиметрами и метрами, образование тени в случае звука отступает на задний план, а диффракция играет большую и также практически важную роль; действительно, мы можем хорошо *слышать* человека, стоящего за высокой стеной, или за углом большого дома. даже если мы его не можем *видеть*.

Возвратимся опять от оптики к механике и постараемся полностью использовать аналогию между ними. Старой механике в оптике соответствует мысленное оперирование с изолированными, независимыми друг от друга световыми лучами. Новой волновой механике соответствует волновая теория света. Переходя от старого к новому представлению, мы вы-

игрываем в возможности учитывать явление дифракции, или, лучше сказать, нечто весьма аналогичное явлению дифракции света; эти явления в механике, как и в оптике, говоря вообще, не должны играть особой роли; в противном случае старое представление механики не могло бы столь долгое время нас удовлетворять. Но не трудно догадаться, что в известных случаях явление дифракции, которой пренебрегалось, должно быть весьма заметным, целиком управляющим механическим процессом и представляющим для старой теории неразрешимую трудность; это будет иметь место тогда, когда *вся механическая система по своим размерам сравнима с длиной волны «материальных волн»*, играющих для механических процессов ту же роль, как световые волны для процессов оптических.

Дифракция является причиной того, почему в этих крошечных системах атомов старое представление оказалось непригодным; оно остается применимым с большой точностью к грубым механическим процессам, но уже не к тонкой игре в областях порядка одной или немногих длин волн. Чрезвычайной неожиданностью было открытие, что здесь при новом волновом представлении сами собой исчезают все те странные добавочные требования, которые были насильно втиснуты в старую теорию, чтобы приспособить последнюю к описанию атома и суметь как-нибудь понять его реальное поведение.

Мы видим, существенным пунктом является то обстоятельство, что размеры атома и длины волн гипотетических волн материи являются величинами

примерно одного порядка. Вы конечно спросите, является ли чистой случайностью, что при нашем исследовании строения материи мы как раз в этом месте сталкиваемся с величиной порядка длины волны. Вы спросите затем, откуда вообще известно об этих длинах волн материи, представляющих совершенно новый инструмент теории, никогда и нигде прежде не наблюдавшийся. Может быть мы просто должны сделать это п р е д п о л о ж е н и е?

Конечно, это совпадение размеров отнюдь не является простым случаем, и нам не нужно делать никакого нового предположения. Размеры длин волн получаются сами собой из теории, и величина их приводит к следующему замечательному факту. Опыты Резерфорда и Чадвика над рассеянием альфалучей, можно сказать, доказали, что тяжелое *ядро* атома значительно меньше самого атома и может поэтому рассматриваться в дальнейшем как точечный центр притяжения. Вместо э л е к т р о н о в мы вводим гипотетические волны, оставляя их длину волн пока что совершенно неопределенной, ибо мы о ней ничего не знаем. Тогда в наших вычислениях будет стоять некоторая буква, например a, обозначающая какое-то еще неизвестное число. К этому мы уже привыкли, и ничто не мешает нам вычислить, что атомное ядро должно вызвать дифракцию этих волн, аналогично небольшой пылинке в случае света. Также, как там, мы получим, что размеры области возмущения, окружающей ядро, тесно связаны с величиной длины волны и будут одного порядка с последней. Теперь мы должны проделать решающий шаг: м ы о т о ж д е с т в л я е м о б л а с т ь в о з м у-

щения или арену диффракции с атомом; мы утверждаем, что атом в действительности является ничем иным, как диффракционным явлением электронных волн, так сказать, пойманных атомным ядром. Тот факт, что величина атома и длина волны будут одного порядка, не является уже больше случайностью, но представляется очевидным. Однако мы не знаем еще значений ни той, ни другой величины, так как в наших расчетах все еще стоит *одна* неопределенная постоянная, которую мы назвали через a. У нас имеются две возможности, взаимно контролирующие друг друга, для определения этой неизвестной. Во-первых, мы можем выбрать ее так, чтобы внешние проявления атома и прежде всего испускаемые им спектральные линии, как известно, измеренные весьма точно, получались бы в количественном согласии с опытом. Во-вторых, можно выбрать неизвестную величину так, чтобы арена диффракции оказалась совпадающей с размерами атома. Оба эти определения (из которых второе впрочем будет гораздо менее точным в виду неясности понятия «величина атома») вполне согласуются друг с другом. Мы можем, наконец, заметить, что неопределенная постоянная физически имеет на самом деле размерность не длины, но величины действия, т. е. энергии, умноженной на время. В таком случае является весьма естественным подставить для нее значение универсальной постоянной кванта действия Планка, хорошо известное из законов теплового излучения. Оказывается, что при всей возможной в настоящее время точности мы возвращаемся к пер-

вому (наиболее точному) определению.

Таким образом, теория обходится с минимумом новых предположений. В ней содержится единственная произвольная постоянная, которой мы должны придать численное значение, хорошо известное из старой квантовой теории; таким путем мы получаем, во-первых, правильную величину диффракционной площадки, которую мы можем разумным образом отождествить с атомом, и можем, во-вторых, количе-

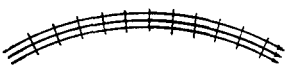


Рис 8.

ственно правильно вычислить все проявления атома, испущенный им свет, работу ионизации и т. д.

Я попытался здесь развить перед вами основную идею волновой теории материи в возможно более простой форме. Разрешите мне сознаться теперь, что, следуя стремлению возможной простоты, я несколько приукрасил положение вещей. Это не относится к полноте, с которой были подтверждены экспериментом все, достаточно осторожно сделанные, выводы теории; но речь идет о принципиальной легкости и простоте, с которой все эти следствия были получены. Я не имею здесь в виду трудности математические, всегда в конце концов тривиальные, но именно трудности основных принципов. Конечно, легко заявить, что мы должны перейти от представления *траектории* к системе волновых поверхностей,

перпендикулярных к ней. Но эти волновые поверхности, даже если мы будем рассматривать их небольшой участок (см. рис. 8), охватывают все же некоторый узкий *пучок* возможных траекторий и находятся со всеми ними в одинаковом соотношении. Согласно старому представлению одна из этих траекторий выделяется в каждом конкретном случае как «действительная» из всех остальных «просто возможных». В новой теории дело обстоит иначе. Мы сталкиваемся здесь со всей глубиной логической противоположности между случаем: «или — или» (механика точки) и случаем «и — и» (волновая механика).

Дело не обстояло бы так плохо, если бы мы должны были вовсе оставить старую теорию и *заменить* ее новой. К сожалению, речь идет не об этом. С точки зрения волновой механики бесконечное множество возможных траекторий точки является чем-то фиктивным, ни одна из них не имеет преимущества быть реально осуществленной в каком-либо конкретном случае, но, как я уже упоминал выше, мы во многих опытах действительно наблюдаем пути отдельных частиц. Волновое представление может это объяснить только с большим трудом, или вообще не в состоянии дать на это ответ. Нам дьявольски трудно объявить эти следы траекторий, которые мы в и д и м, только узкими пучками, равноправных возможных путей, которые связаны друг с другом волновыми поверхностями. Однако эти связи необходимы, чтобы понять явление диффракции и интерференции, которые можно наглядно продемонстрировать на той же частице с такой же отчетливостью, а не только заключить о них на основании теоретических пред-

ставлений об атоме, о чем была речь выше. Хотя дело и обстоит таким образом, что мы в каждом конкретном частном случае можем ответить на вопрос, не впадая в противоречие с какой-либо из двух точек зрения, но мы не можем более оперировать с такими приятными и как-будто необходимыми понятиями, как «действительный», или «только возможный»; никогда нельзя сказать, что в действительности имеет место, или в действительности происходит, но лишь указать, что будет наблюдаться в данном частном случае. Должны ли мы навсегда удовлетвориться подобным положением вещей? Принципиально, конечно, да. Принципиально требование, что точная наука в конце концов должна стремиться к описанию действительно наблюдаемого, вовсе не является новым. Вопросом является лишь то, должны ли мы будем отныне отказаться связывать это описание с какой-либо ясной гипотезой о том, как в действительности устроен мир. Многие хотят уже сегодня заявить об этом отказе. Но мне кажется, что тем самым мы несколько уклоняемся от трудностей.

Я охарактеризовал бы современное состояние наших знаний следующим образом. Луч или траектория частицы отвечает продольной связи процесса распространения (т. е. *в* направлении распространения), волновая же поверхность соответствует поперечной связи, т. е. перпендикулярно к направлению. Оба способа связи без сомнения являются реальными: один доказывается фотографиями Вильсона, другой — интерференционными опытами. Охватить их единой картиной нам до сих

пор еще не удалось. Только в крайних случаях перевешивает поперечная, слоистая, или же, наоборот, лучевая продольная связь настолько, что мы *надеемся* обойтись при помощи одной волновой или одной корпускулярной картины.

П. А. М. ДИРАК

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОНОВ и ПОЗИТРОНОВ

P. A. M. DIRAC

THEORY OF ELECTRONS and POSITRONS

П. А. М ДИРАК

изики экспериментаторы обнаружили, что материя состоит из маленьких частиц различного сорта, причем частицы каждого сорта в точности подобны друг другу. Некоторые из этих частиц наверное являются сложными, т. е. состоят из других частиц более простой природы. Однако, существуют другие частицы, сложность которых не была показана до сих пор и, как мы надеемся, никогда не будет доказана, так что мы считаем их элементарными и основными.

На основании общих философских соображений хотелось бы, как кажется на первый взгляд, иметь возможно меньшее число элементарных частиц, лучше всего одни сорт, или, в крайнем случае, два,

так, чтобы вся материя была построена из них. Однако, результаты эксперимента показывают, что основных частиц должно быть больше. В самом деле, число элементарных частиц стремилось довольно катастрофически увеличиваться в течение последних лет.

Пожалуй такое положение вещей не столь скверно, так как более близкое рассмотрение показывает, что нельзя провести строгого различия между элементарными и сложными частицами. Для интерпретации некоторых новейших экспериментов необходимо предположить, что частицы могут создаваться и уничтожаться. Поэтому, если мы наблюдали какую-либо частицу, вылетевшую из другой, мы не можем с уверенностью утверждать, что последняя является сложной, так как первая частица могла оказаться созданной вновь. Различие между элементарными и сложными частицами становится поэтому условным. Одного этого соображения достаточно, чтобы принудить нас оставить привлекательную с философской точки зрения мысль, что вся материя построена из одного, или может быть двух сортов кирпичиков.

Я хотел бы остановиться здесь на обсуждении более простого сорта частиц и посмотреть, что можно сказать о них на основании чисто теоретических аргументов. Наиболее простыми видами частиц являются:

1. Фотоны, или световые кванты, из которых состоит свет.

2. Электроны и открытые недавно позитроны, являющиеся чем-то вроде зеркального изображе-

ния электронов и отличающиеся от последних только знаком электрического заряда.

3. Тяжелые частицы — протоны и нейтроны.

Я буду рассматривать здесь почти исключительно электроны и позитроны не потому, что они наиболее интересны, но потому, что теория для них была развита наиболее полно. В самом деле, вряд ли можно сделать какое-либо теоретическое заключение о свойствах остальных частиц. С одной стороны, фотоны столь просты, что легко укладываются в любую теоретическую схему, так что теория не накладывает каких-либо ограничений на их свойства. Протоны же и нейтроны, с другой стороны, представляются слишком сложными, и до сих пор не было открыто какое-либо надежное основание для построения их теории.

Вопрос, которого мы должны коснуться прежде всего, заключается в том, каким образом вообще теория может дать какие-либо сведения о свойствах элементарных частиц. В настоящее время существует общая система квантовой механики, которую можно применить для описания движения любого сорта частиц, каковы бы ни были свойства последних. Однако, эта общая система квантовой механики не пригодна для случая скоростей, сравнимых со скоростью света, когда начинают играть роль эффекты теории относительности. В настоящее время не существует релятивистской квантовой механики (т. е. пригодной в случае больших скоростей), которая могла бы применяться к частицам с произвольными свойствами. Поэтому, подвергая квантовую механику релятивистскому обобщению, мы накладываем тем

самым ограничения на свойства частиц. Таким путем мы можем вывести ряд заключений о частицах из чисто теоретических соображений, основанных на общих физических принципах.

Этот метод оказался удачным в случае электронов и позитронов. Следует надеяться, что в будущем аналогичная теория будет построена и для других частиц. Я хочу описать здесь общие черты теории электронов и позитронов, показав, каким путем можно вывести свойства спина («вращения») электрона и заключить о существовании позитронов с подобными же свойствами спина, способных притом уничтожаться при столкновении с электронами.

Мы имеем прежде всего уравнение, связывающее кинетическую энергию W и количество движения p_r $(r = 1, 2, 3)$ частицы в релятивистской классической механике

$$\frac{W^2}{c^2} - p_r{}^2 - m^2c^2 = 0. \qquad (1)$$

Отсюда возможно получить волновое уравнение квантовой механики, подразумевая под W и p_r операторы $i\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}$ и $-i\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial x_r}$, и действуя левой частью уравнения на волновую функцию ψ. Теперь мы можем написать волновое уравнение:

$$\left[\frac{W^2}{c^2} - p_r{}^2 - m^2c^2\right]\psi = 0. \qquad (2)$$

Вспомнив теперь общее требование квантовой механики, чтобы всякое волновое уравнение было линей-

ным относительно оператора W или $\frac{\partial}{\partial t}$, мы видим, что наше уравнение ему не удовлетворяет. Мы должны заменить его каким-то уравнением, линейным в W, а, чтобы уравнение было релятивистски инвариантным, оно должно быть также линейным относительно p_r. Таким образом, мы приходим к рассмотрению уравнения вида

$$\left[\frac{W}{c} - \alpha_r p_r - \alpha_0 mc\right]\psi = 0. \qquad (3)$$

Это уравнение заключает в себе четыре новых переменных α_r и α_0, которые являются операторами, действующими на функцию ψ. Мы предположим, что они удовлетворяют следующим условиям:

$$\alpha_\mu^2 = 1; \quad \alpha_\mu \alpha_\nu + \alpha_\nu \alpha_\mu = 0$$

$$\text{для } \mu \neq \nu; \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3;$$

а также, что α коммутируют со всеми p и W. Эти свойства α делают уравнение (3) до некоторой степени эквивалентным уравнению (2), так как, умножив (3) слева на

$$\frac{W}{c} + \alpha_r p_r + \alpha_0 mc,$$

мы получим точно уравнение (2). Новые переменные α, которые мы должны ввести, чтобы получить релятивистское волновое уравнение, линейное в W, дают спин электрона. Из общих принципов квантовой механики легко вывести, что переменные α приводят

к значению спинового момента количества движения, равного половине кванта действия, деленного на 2π, и к значению магнитного момента, равного магнетону Бора и направленному против момента количества движения. Эти результаты находятся в полном согласии с экспериментом. На самом деле они и были впервые получены из спектроскопических наблюдений и подтверждены впоследствии теорией.

Величины α приводят также к некоторым совершенно неожиданным явлениям, связанным с движением электрона. Этот вопрос был подробно исследован Шредингером. Оказывается, что электрон, который представляется нам медленно движущимся, в действительности должен проделывать колебательное движение очень большой частоты и малой амплитуды, которое накладывается на наблюдаемое нами равномерное движение. В результате этого колебательного движения, скорость электрона всегда равняется скорости света. Это следствие теории не может быть непосредственно проверено экспериментом, так как частота колебательного движения столь высока, а амплитуда столь незначительна. Но мы должны доверять этому следствию теории, так как другие выводы из нее, неразрывно связанные с только что указанным парадоксальным следствием, как например закон рассеяния света электроном, подтверждаются экспериментом.

Наши уравнения обладают еще одним важным свойством, на которое я хотел бы указать здесь, и которое привело к предсказанию позитрона. Из уравнения (1) мы видим, что оно допускает для кинетической энергии W или положительные значе-

ния большие mc^2, или отрицательные значения, меньшие $-mc^2$. Этот результат сохраняет свою силу и при переходе к квантовому уравнению (2) или (3). Таким образом, эти квантовые уравнения, будучи интерпретированы согласно общей схеме квантовой динамики, допускают, в качестве возможных результатов измерения кинетической энергии W, или какие-либо значения, большие mc^2, или же значения, меньшие $-mc^2$.

В действительности кинетическая энергия частицы всегда является положительной. Итак, мы видим, что наши уравнения допускают для электрона два вида движения, из которых только один соответствует привычному. Другой вид движения соответствует электронам с весьма странными свойствами; например, более быстрому движению соответствует меньшая энергия; чтобы заставить такой электрон остановиться, нужно придать ему энергию. Можно было бы поэтому попытаться ввести в теорию в качестве нового допущения, что только один из видов движения встречается в действительности. Но это приводит к серьезной трудности, так как мы находим из теории, что электрон под действием возмущения может перейти из состояния движения с положительной энергией в состояние движения с отрицательной энергией. Поэтому, даже если мы предположим, что все электроны в мире находятся вначале в состояниях положительной энергии, через некоторое время часть из них окажется в состояниях отрицательной энергии. Таким образом, допуская состояния отрицательной энергии, теория предсказывает нечто, повидимому не соответствующее чему-либо из-

вестному из эксперимента, но что мы однако не можем отбросить просто путем нового предположения. Итак, мы должны найти физический смысл отрицательных состояний.

Более детальное рассмотрение поведения электронов в этих состояниях в электромагнитном поле показывает, что они соответствуют движению электрона с положительным зарядом вместо обычного отрицательного, т. е. тому, что экспериментаторы называют теперь позитроном. Поэтому можно было бы попытаться допустить, что электроны в состояниях отрицательной энергии как раз являются позитронами. Но такое решение вопроса не годится, так как наблюдаемые на опыте позитроны наверное не имеют отрицательных энергий. Мы можем однако установить связь между электронами в состояниях отрицательной энергии и позитронами иным, значительно менее прямым, образом.

Мы воспользуемся принципом Паули, согласно которому в каждом состоянии движения может находиться только один электрон. Допустим теперь, что в известном нам мире почти все состояния отрицательной энергии для электронов заняты как раз одним электроном в каждом состоянии, и что равномерное заполнение всех состояний отрицательной энергии является совершенно ненаблюдаемым для нас. Допустим далее, что *какое-либо незанятое состояние отрицательной энергии, будучи отклонением от равномерности, наблюдаемо и как раз является позитроном.*

Незанятое состояние отрицательной энергии, или

дырка, как мы будем называть его для краткости, будет обладать положительной энергией, так как оно является местом, где имеется недостаток отрицательной энергии. В самом деле, дырка ведет себя совершенно подобно обычной частице, и, отождествив ее с позитроном, мы наиболее разумным способом избавляемся от трудности, связанной с появлением отрицательных энергий в наших уравнениях. С этой точки зрения позитрон является точно зеркальным изображением электрона, имеющим ту же массу, но противоположный заряд. Эти выводы были уже в общих чертах подтверждены экспериментам. Позитрон должен затем иметь такой же, как у электрона спин, но это заключение не было еще проверено на опыте. На основании нашей теоретической картины мы должны ожидать, что обычный электрон положительной энергии может упасть в дырку и заполнить ее, причем освободившаяся энергия будет выделена в виде электромагнитного излучения. Это будет соответствовать процессу, в котором электрон и позитрон взаимно уничтожаются. Обратный процесс, именно создание электрона и позитрона из электромагнитного излучения, тоже может иметь место. Эти процессы повидимому были обнаружены экспериментально и в настоящее время исследуются более детально.

Теория электронов и позитронов, которую я только что набросал здесь, является логически замкнутой картиной, которая согласуется со всеми известными экспериментальными фактами. Было бы желательно построить столь же удовлетворительную теорию и для протонов. Пожалуй можно было бы

предположить, что та же самая теория применима и к протонам. Это привело бы к возможности существования отрицательно заряженных протонов, являющихся зеркальным изображением обычных, положительно заряженных. Недавние экспериментальные результаты Штерна, касающиеся спинового магнитного момента протона, противоречат, однако, подобной теории протонов. Так как протон значительно тяжелее электрона, то вполне возможно, что для него требуется значительно более сложная теория, хотя сейчас нельзя сказать, какой она должна быть.

Во всяком случае, я считаю вероятным существование отрицательных протонов, ибо поскольку мы можем еще опираться на теоретические выводы, между положительным и отрицательным электрическими зарядами имеется полная и совершенная симметрия, и если эта симметрия действительно носит фундаментальный характер, то должно оказаться возможным обращать заряд любого сорта частиц. Конечно, отрицательные протоны будет гораздо труднее обнаружить экспериментально, так как для этого необходима значительно большая энергия, соответственно большей массе.

Если мы станем на ту точку зрения, что полная симметрия между положительным и отрицательным электрическими зарядами является фундаментальным законом природы, то мы должны рассматривать как своего рода случайность, что земля, и, вероятно, вся солнечная система содержат избыток обычных отрицательных электронов и положительных протонов. Вполне возможно, что некоторые звезды построены иным путем, именно главным образом из позитро-

нов и отрицательных протонов. Конечно, в мире должно быть одинаковое число звезд каждого сорта. Оба сорта звезд будут иметь в точности одинаковые спектры, и в настоящее время нет возможности различить их какими-либо астрономическими методами.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

От Издательства 3

В. Гейзенберг — Развитие квантовой механики 11

Э. Шредингер — Основная идея волновой механики 37

П. А. М. Дирак — Теория электронов и позитронов 61