АТОМНАЯ ТЕОРИЯ И МЕХАНИКА [1].

Н. Бор.

Классические теории.

Изучение равновесия и движения тел не только представляет собой основу физики, но также доставляет обширный материал для математического исследования, и оказалось чрезвычайно плодотворным для развития методов чистой математики. Связь между механикой и математикой непосредственно проявилась еще в трудах Архимеда, Галилея и Ньютона. В их творениях было завершено образование понятий, необходимых для анализа механических явлений. Со времен Ньютона, развитие методов разработки механических проблем шло рука об руку с развитием математического анализа: достаточно напомнить имена Эйлера, Лапласа, Лагранжа. Дальнейшее развитие механики, основанное на трудах Гамильтона, также было тесно связано с развитием математических методов, — вариационного исчисления, теории инвариантов. В новейшее время эта связь отчетливо проявляется в работах Пуанкаре.

Быть может, наибольшие успехи были достигнуты механикой в области астрономии, но и механическая теория тепла также дала интересные применения в течение последнего столетия. Кинетическая теория газов, основанная Клаузиусом и Максвеллом, объясняет свойства газов, главным образом, как результат механического взаимодействия между атомами и молекулами, движущимися во всевозможных направлениях. Напомним прежде всего то толкование обоих начал термодинамики, которое дает эта теория. В то время как первое начало есть непосредственное следствие механического закона сохранения энергии, второе начало, закон энтропии, может быть выведено, согласно Больцману, на основании статистических свойств большого числа механических систем. Интересно отметить по этому поводу, что стати-

[1]) Эта статья представляет изложение доклада, прочитанного 30 августа 1925 г. на VI скандинавском математическом конгрессе в Копенгагене. Нужно указать, что на переработку текста оказала влияние появившаяся после прочтения доклада важная работа Гейзенберга, о которой говорится ниже. (Опубликована в „Nature“, № 2927, Dec. 5 1925, p. 845; Naturwiss. № 1, 1926. Перевел *Л. Я. Штрум.*)

стические соображения привели к объяснению не только средних свойств атомов, но и явлений флюктуаций, а изучение этих последних, в частности Броуновского движения, неожиданно дало возможность произвести подсчет атомов. Непосредственным орудием для систематического развития статистической механики явилась математическая теория канонических систем дифференциальных уравнений, столь многим обязанная Гиббсу.

Развитие электромагнитных теорий во второй половине истекшего столетия, последовавшее за открытиями Эрстеда и Фарадея, привело к глубокому обобщению механических понятий. Хотя, например, механические модели играли существенную роль в электродинамике Максвелла, однако, впоследствии удалось достичь значительных успехов благодаря тому, что, наоборот, механические представления были выведены из теории электромагнитного поля. В этой теории законы сохранения энергии и количества движения основаны на том, что энергия и количество движения считаются сосредоточенными в пространстве, окружающем тела. В частности, таким путем может быть получено объяснение явлений излучения.

Теория электромагнитного поля непосредственно привела к открытию электромагнитных волн, которое сыграло такую важную роль в электротехнике. Далее, электромагнитная теория света, основанная Максвеллом, доставила глубокое обоснование волновой теории света, восходящей еще к Гюйгенсу. При посредстве атомных теорий было получено общее описание излучений света и тех явлений, которые происходят при прохождении света через материю. Для этого было сделано допущение, что атомы состоят из наэлектризованных частиц, которые могут совершать колебания около положения равновесия.

Свободные колебания частиц являются причиной излучения, состав которого мы наблюдаем в атомных спектрах элементов. Кроме того, частицы могут совершать вынужденные колебания под влиянием световых волн и становятся таким образом сами центрами вторичных волн, которые интерферируют с первичными волнами и вызывают известные явления отражения и преломления света. Если частота колебаний падающих волн приближается к частоте одного из свободных колебаний атома, то это вызывает явление резонанса, при котором частицы приходят в состояние особенно сильных колебаний. Таким образом было получено простое объяснение явлений резонансного излучения и аномальной дисперсии для света, близкого к одной из спектральных линий.

Подобно кинетической теории газов, электромагнитное истолкование оптических явлений не ограничивается изучением среднего действия большого числа атомов. Так, например, при рассеянии света случайное расположение атомов обусловливает такое влияние отдельных атомов, которое дает возможность подсчитать их число. Действительно,

Рэлею удалось, на основании интенсивности рассеянного голубого света неба, определить число атомов в атмосфере, при чем полученные им результаты находятся в удовлетворительном согласии с подсчетом числа атомов, произведенным Перреном при изучении Броуновского движения.

Рациональное математическое изложение электромагнитной теории основано на применении векториального анализа, или, в более общем виде, тензорного анализа для многообразия нескольких измерений. Этот анализ, основанный Риманом, дал Эйнштейну средство для формулировки теории относительности, которая вводит понятия, выходящие за пределы Галилеевой кинематики, и может считаться естественным обобщением классических теорий.

Теория квантов.

Несмотря на значительные успехи в приложениях механических и электродинамических идей к атомистической теории, при дальнейшем развитии исследований встретились очень серьезные затруднения. Если механика и электродинамика действительно дают полное описание теплового движения и излучения, связанного с этим движением, то общие законы теплового излучения должны были бы получить непосредственное объяснение. Однако, против всяких ожиданий, оказалось, что вычисления, исходящие из наших соображений, не могут объяснить эмпирических законов. Планк пошел дальше. Основываясь на Больцмановском выводе второго закона термодинамики, он показал, что законы теплового излучения вынуждают ввести в описание атомных процессов некоторый элемент прерывности, совершенно чуждый классическим теориям. Планк нашел, что при определении статистических свойств частиц, совершающих простые гармонические колебания около положения равновесия, должны быть приняты в расчет только такие колебательные состояния, при которых энергия равна целому кратному „кванта“ ωh, где ω — частота колебаний частицы, а величина h — универсальная постоянная, так называемый квант действия Планка.

Однако более полная формулировка теории квантов оказывается чрезвычайно трудной, если принять во внимание, что все построения прежних теорий основаны на таких представлениях, согласно которым должны существовать непрерывные изменения. Это затруднение особенно резко выступает в глубоких исследованиях Эйнштейна. Согласно последним, основные черты взаимодействия между светом и материей приводят к заключению, что свет распространяется не в виде волн, а в виде „световых квантов“, которые сосредоточены в небольшой части пространства и содержат в себе количество энергии $h\nu$, где ν — частота света. Формальный характер этого утверждения очевиден, так как определение и измерение частоты основаны исключительно на представлениях волновой теории.

Составные части атома.

Недостаточность классических теорий отчетливо выступила благодаря развитию наших познаний о строении атомов. В прежнее время рассчитывали, что эти сведения могут быть постепенно расширены при помощи анализа свойств элементов, основанного на классических теориях, которые оказались столь плодотворными в различных отношениях. Эти надежды получили подтверждение незадолго до появления теории квантов, когда Зееман открыл влияние магнитного поля на спектральные линии. Как показал Лоренц, это явление соответствует во многих случаях тому самому действию магнитного поля на движение колеблющихся частиц, которое может быть предсказано на основании классической электродинамики. Кроме того, из этой теории были выведены такие заключения о природе колеблющихся частиц, которые находились в прекрасном соответствии с экспериментальными открытиями Ленарда и Томсона в области электрических разрядов в газах. В результате всех этих исследований было установлено, что отрицательно заряженные частицы, электроны, представляют собою составные части, общие всем атомам.

Правда, так называемое „аномальное“ явление Зеемана, наблюдаемое для многих спектральных линий, представляло значительные затруднения для классической теории. С подобными же затруднениями встретились также при попытке объяснить при помощи электродинамических моделей те простые эмпирические закономерности спектральных частот, которые были установлены в трудах Бальмера, Ридберга и Ритца. Так, например, такого рода объяснение спектральных законов не удавалось согласовать с определением числа электронов в атоме, произведенным Томсоном, хотя Томсон при этом непосредственно прилагал классическую теорию к своим наблюдениям над рассеянием рентгеновских лучей.

Эти затруднения можно было временно объяснить тем, что нам недостаточно хорошо известны силы, которые связывают электроны внутри атома. Но положение значительно изменилось благодаря экспериментальным открытиям в области радиоактивности, которые доставили новые средства для изучения строения атомов. Изучая прохождение частиц, испускаемых радиоактивными веществами сквозь материю, Резерфорд пришел к мысли об ядерном строении атома. Согласно этому представлению, бóльшая часть массы атома сосредоточена внутри положительно заряженного ядра, которое очень мало по сравнению с размерами всего атома. Вокруг ядра движется определенное число легких отрицательных электронов.

Таким образом проблема строения атома получила, казалось, большое сходство с проблемами небесной механики. Но ближайшее рассмотрение этого вопроса показало вскоре, что имеет место и суще-

ственное различие между атомом и планетной системой. Атом должен обладать устойчивостью, которая представляет особенности, не укладывающиеся в рамки механической теории. Механические законы допускают возможность непрерывных изменений движения, а это противоречит тому обстоятельству, что каждый элемент имеет вполне определенные свойства. Различие между атомом и электродинамической моделью становится очевидным, если рассмотреть строение испускаемого излучения. В моделях такого рода, в которых, согласно классической теории, частота обращения непрерывно изменяется вместе с энергией, частота излучения *должна* непрерывно изменяться во время испускания. Такое излучение не имеет ничего общего с линейными спектрами элементов.

Квантовая теория строения атомов.

Попытки найти более точную формулировку для представлений теории квантов, и при этом такую формулировку, которая могла бы преодолеть указанные нами затруднения, привела к установлению следующих постулатов:

1. Атомной системе присуще некоторое многообразие состояний, „стационарных *состояний*“, которым соответствует прерывный ряд значений энергии и которые обладают определенной устойчивостью. Это выражается в том, что каждое изменение энергии атома вызвано „переходом“ атома из одного стационарного состояния в другое.

2. Возможность испускания и поглощения излучения атомом обусловлена возможностью изменения энергии атома, при чем частота излучения связана с разностью значений энергии в начальном и конечном состоянии при помощи такой зависимости:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Эти постулаты, которые не могут быть объяснены на основании классических представлений, дают, повидимому, достаточное обоснование для общего описания наблюдаемых физических и химических свойств элементов. В частности, они дали непосредственное объяснение основной особенности эмпирических спектральных законов. Принцип комбинации спектральных линий — принцип Ритца — устанавливает, что частота каждой линии спектра может быть представлена в виде разности двух членов (термов) из многообразия спектральных термов, характеризующих данный элемент. Действительно, мы видим, что эти термы могут быть отождествлены со значениями энергии стационарных состояний атома, разделенными на h. Кроме того, это описание происхождения спектров дает также непосредственное объяснение существенного различия между спектрами поглощения и испускания. Согласно постулатам, условие для избирательного поглощения частоты, соответ-

ствующей комбинации двух термов, заключается в том, что атом должен находиться в состоянии с меньшей энергией, в то время как для испускания он должен находиться в стационарном состоянии с большей энергией. Коротко говоря, описанная картина находится в очень близком согласии с результатами опыта над возбуждением спектров. Особенно ясно это доказывается открытием Франка и Герца, относящимся к столкновениям между атомами и электронами. Франк и Герц нашли, что передача энергии электрона атому может происходить только в количествах, которые в точности равны разностям значений энергии стационарных состояний, вычисленным из спектральных термов. Возбуждение атома к излучению происходит вообще моментально. С другой стороны, возбужденный атом может, согласно Клейну и Росселанду, потерять свою излучающую способность при ударе об электрон, энергия которого увеличивается на соответствующую величину.

Как показал Эйнштейн, эти постулаты дают также достаточное основание для рациональной разработки статистических проблем, в частности, для очень ясного вывода закона излучения Планка. Теория Эйнштейна допускает, что атом, который может совершить переход между двумя стационарными состояниями и находится в высшем состоянии, обладает известной „вероятностью", зависящей только от атома, перескочить спонтанно (самопроизвольно) в данный промежуток времени в низшее состояние. Кроме того, он допускает, что при освещении атома извне излучением с частотой, соответствующей переходу, атом получает вероятность, пропорциональную интенсивности излучения, перейти из низшего состояния в высшее. Существенной особенностью теории является также допущение, что если атом освещается таким излучением, находясь в низшем состоянии, то он получает, кроме своей спонтанной вероятности, еще добавочную вероятность [1]) перескока в низшее состояние.

Квантовая теория излучения.

Теория теплового излучения Эйнштейна, подтверждая постулаты, подчеркивает в то же время формальную природу условия частоты. Из условий термического равновесия Эйнштейн выводит заключение, что всякий процесс поглощения и излучения сопровождается передачей количества движения $\frac{h\nu}{c}$ (где c — скорость света), как и можно ожидать на основании представления о световых квантах. Значение этого вывода было особенно отмечено благодаря интересному открытию Комптона, который нашел, что рассеяние однородных

[1]) Эта последняя вероятность также пропорциональна интенсивности излучения. *Прим. перев.*

рентгеновских лучей сопровождается изменением длины волны рассеянного излучения, при чем это изменение зависит от направления, в котором наблюдаются рассеянные лучи. Такое изменение частоты непосредственно следует из теории световых квантов, если при расчете отклонения кванта принять во внимание законы сохранения энергии и количества движения.

Противоречие между волновой теорией света, применяемой для объяснения оптических явлений, и теорией световых квантов, которая хорошо объясняет многие особенности взаимодействия между светом и материей, все увеличивалось и привело к мысли, что недостаточность классической теории может даже отразиться на действительности законов сохранения энергии и количества движения. Эти законы, которые занимают такое центральное положение в классической теории, могли бы иметь лишь статистическое значение при описании атомных процессов. Однако такое допущение не дает удовлетворительного разрешения дилеммы, как показывают опыты над рассеянием рентгеновских лучей, произведенные недавно с помощью изящных методов, позволяющих непосредственно наблюдать индивидуальные процессы. Гейгеру и Боте удалось показать, что электроны „отдачи“, сопровождающие рассеянное излучение, и фото-электроны, появляющиеся при поглощении его, попарно соответствуют друг другу, как и следует ожидать на основании теорий световых квантов. Комптон и Саймон доказали при помощи конденсационной камеры Вильсона, что существует не только попарное соответствие электронов, но и требуемая теорией световых квантов зависимость между направлением, в котором наблюдается рассеянное излучение, и направлением скорости электронов отдачи, сопровождающих это рассеяние.

Из этих результатов следует, повидимому, что в общей проблеме квантовой теории приходится иметь дело не только с видоизменением механических и электродинамических теорий, которое может быть выражено при помощи обычных физических представлений, но и с существенным недостатком пространственно-временных образов, на которых было основано до сих пор описание явлений природы. Этот недостаток выявляется при ближайшем рассмотрении явлений удара. Именно, для явлений удара, в которых продолжительность столкновения мала по сравнению с естественными периодами атома и для которых можно было бы ожидать очень простых результатов на основании обычных механических представлений, оказывается, что постулат стационарных состояний, повидимому, несовместим с пространственно-временным описанием столкновения, основанным на современном учении о строении атомов [1]).

---

[1]) Более подробное обсуждение этих вопросов имеется в статье автора (см. в особенности приложение): Zeitschr. f. Phys. *34*, 142, 1925.

Принцип соответствия.

Тем не менее оказалось возможным построить такие механические образы стационарных состояний, которые основаны на представлении об ядерном атоме и сыграли существенную роль в объяснении особенных свойств элементов. В простейшем случае атома с одним электроном, каковым является нейтральный атом водорода, орбита электрона представляет собой, согласно классической механике, замкнутый эллипс, подчиняющийся законам Кеплера. Согласно этим законам, большая ось и частота обращения связаны простой зависимостью с работой, которую нужно затратить для полного разделения образующих атом частиц. Если считать, что спектральные термы водородного спектра характеризуют эту работу, то спектр дает нам указание на существование ряда последовательных процессов, во время которых электрон связывается атомом все более и более, переходя на орбиты все меньших размеров и испуская при этом излучение. Когда электрон связан сильнее всего, и атом не может поэтому излучать, тогда достигнуто нормальное состояние атома. Размеры орбиты, вычисленные по спектральным термам, имеют величину того же порядка, как и размеры атомов, полученные на основании механических свойств элементов. Но, согласно самому характеру постулатов, такие механические черты, как частота обращения и форма электронных орбит, не могут подвергнуться сравнению с результатами опытов. Символический характер этих образов лучше всего виден из того обстоятельства, что атом в нормальном состоянии вовсе не излучает, хотя, согласно механическим представлениям, электрон продолжает двигаться.

Несмотря на это, изображение стационарных состояний при помощи механических представлений привело к далеко идущей аналогии между квантовой теорией и механической теорией. Эта аналогия была проведена при определении тех начальных состояний описанного выше процесса связывания, в которых движения, соответствующие соседним стационарным состояниям, сравнительно мало отличаются друг от друга. Здесь оказалось возможным отметить асимптотическое соответствие между спектром и движением. На основании этого соответствия выводится количественное соотношение, в котором постоянная фигурирующая в формуле Бальмера для водородного спектра, выражена в зависимости от постоянной Планка и от значений массы и заряда электрона. Важная роль этой формулы видна из того, что на основании теории удалось предсказать зависимость между спектром и зарядом ядра. Последний результат можно рассматривать как первый шаг к выполнению программы, которая намечена учением об ядерном атоме и ставит себе целью — выразить взаимоотношения между свойствами элементов только при помощи одного целого числа,

обозначающего число единичных положительных зарядов ядра, так называемого „атомного числа“.

Доказательство асимптотического соответствия между спектром и движением привело к формулировке „принципа соответствия“, согласно которому возможность всякого процесса перехода, связанного с излучением, обусловлена существованием соответствующих гармонических составляющих в движении атома. Частоты соответствующих гармонических составляющих асимптотически совпадают со значениями, полученными из условия частот, в предельном случае, когда значения энергии конечных состояний сходятся между собой. Но, кроме того, и амплитуды механических составляющих колебания дают в пределе асимптотическую меру для вероятностей процесса перехода, а от этих вероятностей зависят интенсивности наблюдаемых спектральных линий. Принцип соответствия выражает тенденцию использовать при систематическом развитии теории квантов каждую черту классической теории. Но целесообразная транскрипция такого рода производится, принимая во внимания существенное различие между постулатами обеих теорий.

Правила квантования.

Значительный шаг вперед был сделан тогда, когда оказалось возможным формулировать некоторые общие законы, так называемые правила „квантования“, при помощи которых можно из непрерывного многообразия механических движений отобрать движения, присущие стационарным состояниям. Эти правила относятся к атомным системам, для которых решения механических уравнений периодичны или многократно периодичны. В этих случаях движение каждой частицы может быть представлено как сумма дискретных гармонических колебаний. Правила квантования можно рассматривать как рациональное обобщение первоначальных заключений Планка относительно возможных значений энергии гармонического вибратора. Согласно этим правилам, известные составляющие действия, характеризующие решения механических уравнений движения, приравниваются целым кратным постоянной Планка. Благодаря правилам квантования разработана классификация стационарных состояний, в которой каждому состоянию соответствует несколько целых чисел, „квантовых чисел“; количество последних равно степени периодичности механического движения.

В формулировке правил квантования существенную роль сыграло современное развитие математических методов в приложении к механическим проблемам. Достаточно напомнить теорию фазовых интегралов, использованную в особенности Зоммерфельдом, или свойство адиабатической инвариантности этих интегралов, указанное Эренфестом. Теория получила очень изящную форму благодаря введению униформизирующих переменных Штекеля. При такой формулировке

основные частоты, характеризующие периодичность механического решения, представляются в виде частных производных от энергии по тем составляющим действия, которые подвергаются квантованию [1]). Отсюда получается обоснование для асимптотического соответствия между движением и спектром, который вычислен по условию частот.

При помощи правил квантования было получено объяснение различных детальных свойств спектров. Особенно интересно было полученное Зоммерфельдом доказательство того, что такая структура спектральных линий водорода объясняется небольшими отклонениями от Кеплеровского движения, которые зависят от видоизменения Ньютоновой механики, внесенного теорией относительности. Кроме того, напомним объяснение, данное Эйнштейном и Шварцшильдом для открытого Штарком расщепления спектральных линий под влиянием внешнего электрического поля.

Мы имеем здесь дело с механической проблемой, обработка которой значительно продвинулась в руках таких математиков, как Эйлер и Лагранж, после которых Якоби нашел свое знаменитое изящное решение при помощи уравнения с частными производными Гамильтона. В особенности после применения принципа соответствия,— при помощи которого была объяснена не только поляризация составляющих явлений Штарка, но так же, как показал Крамерс, и распределение интенсивностей по отдельным составляющим,— мы можем сказать, что в этом явлении возможно различить каждую черту решения Якоби, хотя и под покровом квантовой теории. В связи с этим интересно упомянуть, что при помощи принципа соответствия можно исследовать влияние магнитного поля на атом водорода таким образом, что этот метод оказывается очень сходным с вычислением эффекта Зеемана, произведенным Лоренцем на основании классической электродинамики, в особенности в виде уравнений Лармора.

Устойчивость строения атомов.

Упомянутые нами проблемы представляют непосредственное применение правил квантования. Но в задаче о строении атомов с несколькими электронами мы встречаемся с таким случаем, когда общее решение механической проблемы не обладает периодическими свойствами, которые представляются необходимыми для механического изображения стационарных состояний. Однако естественно напрашивается мысль, что это дальнейшее ограничение применимости механических образов к изучению свойств атомов с несколькими электронами, по сравнению с атомами, содержащими по одному электрону, непо-

---

[1]) Другими словами: частота, соответствующая одной из координат, равна производной энергии по величине фазового интеграла. *Прим. перев.*

средственно связано с постулатом об устойчивости стационарных состояний. Действительно, взаимодействие электронов в атоме представляет задачу, аналогичную задаче о столкновении между атомом и свободным электроном. Подобно тому, как нельзя дать никакого механического объяснения для устойчивости атома при таком столкновении, также приходится допустить при всяком описании стационарных состояний атома, что при взаимодействии электронов доля участия каждого из них вносится совершенно немеханическим путем.

Эта точка зрения находится в согласии со спектроскопическими данными. Одно из важнейших данных этого рода представляет тот установленный Ридбергом факт, что в эмпирические формулы для сериальных спектров всех элементов входит та же постоянная, как в формуле Бальмера, несмотря на более сложное строение спектра различных элементов по сравнению со спектром водорода. Это открытие получает простое объяснение, если видеть в сериальных спектрах отражение процесса присоединения электрона к атому, при чем электрон все сильнее связывается шаг за шагом, и испускает излучение. Характер связи других электронов остается в это время неизменным, а постепенное усиление связи данного электрона происходит на орбитах, которые сначала велики по сравнению с обычными размерами атома, а затем становятся все меньше и меньше, пока не будет достигнуто нормальное состояние атома. В том случае, когда атом обладает одним положительным зарядом перед захватом электрона, притяжение электрона остальной частью атома имеет с этой точки зрения большое сходство с взаимным притяжением частей водородного атома. Понятно отсюда, почему спектральные термы, представляющие связывание электронов, обнаруживают асимптотическое совпадение с термами водородного спектра. Таким же путем можно получить непосредственное объяснение той общей зависимости сериальных спектров от состояния ионизации атома, которая была установлена замечательными работами Фаулера и Пашена.

Характерные указания на тот способ, каким связаны электроны в атоме, дает изучение рентгеновских спектров. С одной стороны, сделанное Мозелеем фундаментальное открытие поразительного сходства между рентгеновским спектром элемента и спектром, соответствующим связыванию единственного электрона ядром, может быть легко объяснено, если принять во внимание, что внутри атома влияние ядра на природу связи каждого отдельного электрона значительно превосходит взаимное влияние электронов. С другой стороны, рентгеновские спектры обнаруживают характерное отличие от сериальных спектров. Это отличие объясняется тем обстоятельством, что в рентгеновском спектре мы не встречаемся со связыванием нового присоединяющего электрона, а с преобразованием связи остающихся электронов после удаления одного из электронов, который раньше был связан. Благодаря этому

обстоятельству, которое было особенно отмечено Косселем, удалось пролить свет на новые важные стороны вопроса об устойчивости строения атомов.

Анализ спектров.

Для объяснения детального строения спектров необходимо, конечно, подробно изучить взаимодействие между электронами внутри атома. При разработке этой проблемы приходится отступить от строгого применения механики. Каждому электрону приписывается движение с такого рода периодическими свойствами, чтобы возможно было произвести классификацию спектральных термов при помощи квантовых чисел. В работах Зоммерфельда значительное число спектральных закономерностей получило таким путем простое истолкование. Кроме того, эти соображения открыли широкое поле для применения принципа соответствия. Действительно, при помощи их удалось объяснить некоторые ограничения среди возможных комбинаций спектральных термов, так называемые правила отбора.

Идя таким путем, в последнее время удалось на основании данных сериальных спектров, а также рентгеновских спектров, вывести заключения о группировках электронов в нормальном состоянии атома. Эти группировки дают объяснения основных особенностей периодической системы элементов в согласии с идеями о химической активности атомов, разработанных Дж. Дж. Томсоном, Косселем и Льюисом. Успехи в этой области тесно связаны в последнее время с накоплением новых спектроскопических данных. Немалую роль сыграли исследования Лаймана и Милликэна, благодаря которым был переброшен мост через пропасть между оптическими спектрами и областью рентгеновских лучей. В последней области достигнуты большие успехи благодаря трудам Зигбана и его сотрудников. Необходимо также упомянуть работу Костера о рентгеновских спектрах тяжелых элементов, которая значительно способствовала разъяснению основных черт периодической системы.

Однако изучение тонких деталей спектров обнаружило такие особенности, которые не удалось объяснить при помощи механических представлений на основании теории периодических систем. Сюда относится, например, мультиплетное строение спектральных линий и влияние магнитного поля на это строение. Явление это, известное под названием аномального эффекта Зеемана, представляет, как мы уже упоминали, серьезные затруднения для классической теории. Правда, оно укладывается в схему основных постулатов теории квантов. Как показал Ланде, частоты составляющих, на которые расщепляется каждая спектральная линия под влиянием поля, могут быть представлены в виде комбинации термов, подобно основным линиям. Совокупность этих магнитных термов может быть получена, если заменить

каждый основной спектральный терм несколькими величинами, которые мало отличаются от него, при чем разности зависят от интенсивности поля. Действительно, прекрасные опыты Штерна и Герлаха установили непосредственную связь между силой, действующей на атом в неоднородном магнитном поле, и значениями энергии стационарных состояний в поле, вычисленными на основании магнитных термов. Эти опыты можно считать одним из непосредственных доказательств основных положений теорий квантов.

Однако анализ, произведенный Ланде, обнаруживает странное различие между взаимодействием электронов в атоме и сочетанием механических систем. Действительно, приходится допустить, что взаимодействие электронов в атоме связано с „некоторым натяжением", которое не поддается механическому описанию и не представляет однозначного соответствия с квантовыми числами на основании механических представлений [1]). В обсуждении этой проблемы существенную роль сыграло установленное Эренфестом общее условие термодинамического равновесия. В применении к теории квантов это условие указывает, что статистический „вес", присущий стационарному состоянию, не изменяется при непрерывном преобразовании атомной системы. Недавно было установлено, что это же условие приводит, даже для атомов с одним только электроном, к таким затруднениям, которые указывают на необходимость ограничить пределы применимости теории периодических систем. Действительно, задача о движении точечных зарядов допускает некоторые особенные решения, которые должны быть исключены из совокупности стационарных состояний. Это исключение искусственно ограничивает правила квантования, но не находится в очевидном противоречии с опытными данными. Особенно серьезные затруднения выплыли на свет, благодаря интересному исследованию проблемы о водородном атоме в пересекающихся электрическом и магнитном полях, произведенному Клейном [2]) и Ленцом [3]). В этом случае оказалось невозможным удовлетворить условию Эренфеста, так как соответствующее видоизменение внешних сил может постепенно преобразовать орбиты, описывающие стационарные состояния и не подлежащие исключению из таких состояний, в такого рода орбиты, двигаясь по которым электрон падает на ядро.

Несмотря на эти затруднения, анализ тонких деталей спектра значительно подвинул вперед квантовое истолкование законов о взаимо-

---

[1]) Ср. статью автора (Ann. d. Phys. *71*, 228, 1923), которая содержит общий обзор результатов, относящихся к объяснению спектральных данных на основании механических представлений о стационарных состояниях. В этой статье имеются подробные литературные указания, поэтому мы ограничиваемся здесь ссылками на работы, которые появились впоследствии.

[2]) O. Klein, ZS. f. Phys. *22*, 109, 1924.

[3]) W. Lenz, ZS. f. Phys. *24*, 197, 1924.

отношении между элементами. В работах Довийе [1]), Мэн-Смита [2]) и Стонера [3]) разработаны, на основании различных опытных данных, представления теории квантов о группировках электронов в атомах. Несмотря на формальный характер этих соображений, они обнаруживают тесную связь со спектральными закономерностями, раскрытыми в исследованиях Ланде. В этом направлении были в последнее время достигнуты значительные успехи, в особенности Паули [4]). Несмотря на то, что эти результаты представляют собой значительный шаг вперед на пути к выполнению намеченной выше программы (объяснение свойств элементов исключительно на основании атомного числа), они не дают все же однозначного соответствия с механическими представлениями.

Теория квантов и оптические явления.

Новая эпоха в развитии теории квантов началась в последнее время благодаря более глубокому изучению оптических явлений. Вначале, как мы уже упомянули, классическая теория достигла значительных успехов в этой области, в то время как постулаты не давали прямого разрешения. Правда, можно было заключить на основании опытов, что освещенный атом производит рассеяние света, аналогичное по существу с тем рассеянием, которое, согласно классической теории, производится упруго связанными электрическими частицами. Частоты собственных колебаний этих частиц равны частотам, соответствующим процессам перехода, которые атом может совершать под влиянием внешнего излучения. Действительно, согласно классической теории, такие гармонические вибраторы испускали бы под влиянием возбуждения излучение такого же свойства, как и атом, перешедший в высшее стационарное состояние.

Возможность объединить описание оптических с представлением о вибраторах, соединенных с процессами перехода, была приближена к осуществлению благодаря идее Слэтера[5]), согласно которой испускание излучения активированным атомом можно рассматривать как „причину“ спонтанных переходов, по аналогии с тем, как вызываются переходы падающим извне излучением. Ладенбург сделал первый следующий шаг на пути количественного описания явления дисперсии,

---

[1]) A. Dauvillier, C. R., *177*, 476, 1924.

[2]) J. D. Main Smith, Journ. Chem. Ind., *44*, 944, 1925.

[3]) E. C. Stoner, Phil. Mag. *48*, 719, 1924.

[4]) W. Pauli jr., ZS. f. Phys. *31*, 765, 1925. Ср. также H. N Russell and F. A. Saunders, Astrophys. Journ. *61*, 38, 1925; S. Goudsmit, ZS. f. Phys. *32*, 791, 1925; W. Heisenberg, ZS. f. Phys. *32*, 841, 1925; F. Hund, ZS. f. Phys. *33*, 345; *34*, 296, 1925.

[5]) J. C. Slater, Nature, *113*, 307, 1924; см. также N. Bohr, H. A. Kramers and J. C. Slater, Phil. Mag. *47*, 785, 1925 (та же статья в ZS. f. Phys. *24* 69, 1924). *Прим. перев.*

высказав допущение, что существует определенное соотношение между рассеивающей способностью вибраторов и вероятностью соответствующих переходов в теории Эйнштейна. Но решительный успех в этом направлении был достигнут Крамерсом[1]). Последний дал в согласии с принципом соответствия талантливую интерпретацию тех явлений, которые, согласно классической теории, имеют место в электродинамической системе, освещенной световыми волнами. Характерно в этой интерпретации следующее: подобно тому как частоты излучения вычисляются, с одной стороны, по классической теории, с другой стороны, по теории квантов, так и в данном случае производные классической теории заменяются отношениями конечных разностей. В окончательные формулы входят только величины, доступные непосредственному наблюдению. В теории Крамерса рассеяние, произведенное атомом в определенном стационарном состоянии, количественно зависит от частот, соответствующих процессам перехода в другие стационарные состояния, а также от вероятностей появления таких переходов под влиянием освещения.

Существенная особенность теории состоит в том, что, при вычислении аномальной дисперсии поблизости от спектральной линии, принимаются во внимание два различных вида явлений резонанса, зависящих от того, соответствует ли спектральная линия переходу атома в состояние с большей или с меньшей энергией. Прежде, при вычислении дисперсии на основании классической теории, принимались во внимание лишь явления резонанса, соответствующие первому переходу[2]). Интересно отметить, что при дальнейшем развитии теории Крамерсом и Гейзенбергом[3]) дано количественное объяснение дополнительных явлений рассеяния с измененной частотой, существование которых было предсказано Смекалем[4]) на основании теории световых квантов[5]). Это указывает на плодотворность последней теории.

Описание оптических явлений находилось в полном соответствии с основными представлениями теории квантов. Но вскоре оказалось, что она находится в странном противоречии с механическими понятиями, которые применялись раньше для анализа стационарных состо-

---

[1]) H. A. Kramers, Nature, *113*, 673, 114, 310, 1924.

[2]) Теория Крамерса отличается от теории Ладенбурга тем, что Крамерс, следуя Эйнштейну, вводит вероятности не только „положительного", но и „отрицательного" поглощения, т.-е. испускания света атомом под влиянием внешнего излучения, при чем атом переходит в состояние с меньшей энергией. *Прим. перев.*

[3]) H. A. Kramers und W. Heisenberg, ZS. f. Phys. *31*, 681, 1925.

[4]) A. Smekal, Die Naturwissenschaften, *11*, 873, 1923.

[5]) Исходя из постулатов об энергии и количестве движения кванта, Смекаль приходит к заключению, что атом при рассеянии света испускает кванты не только с частотой, равной частоте падающего света, но и с большей или с меньшей частотой, в зависимости от перехода в другое стационарное состояние. Другая статья Смекаля по этому вопросу ZS. f. Phys., *32*, 241, 1925. *Прим. перев.*

яний. Прежде всего оказалось невозможным, исходя из рассеивающей способности освещенных атомов, требуемой теорией дисперсии, установить асимптотическое соответствие между реакцией атома на переменное поле со все уменьшающейся частотой и реакцией атома на постоянное поле, вычисленной на основании правил квантования из теории периодических систем. Эти трудности еще больше подчеркивают те сомнения касательно теории, которые вызываются, как мы уже упоминали, проблемой водородного атома в пересекающихся электрическом и магнитном полях. Кроме того, неудовлетворительной стороной теории периодических систем нужно считать то, что она является, повидимому, бесполезной в решении проблемы о количественном определении вероятностей перехода, если применять механические представления о стационарных состояниях. Этот недостаток стал еще заметнее после того, как в некоторых случаях удалось получить количественную формулировку важнейших положений принципа соответствия относительно этих вероятностей перехода, воспользовавшись анализом оптических свойств электродинамических моделей [1]). Эти результаты находятся в прекрасном соответствии с измерениями сравнительной интенсивности спектральных линий, произведенными в Утрехте, но их можно лишь очень искусственным путем включить в схемы, определяемые правилами квантования [2]).

Попытка построить рациональную квантовую механику.

Недавно Гейзенберг [3]), который обратил особое внимание на эти трудности, сделал очень значительный, повидимому, шаг вперед на пути к новой формулировке проблем квантовой теории. Можно надеяться, что эта формулировка поможет преодолеть затруднения, связанные с применением механических представлений. В теории Гейзенберга делается попытка выразить механические понятия и все их применения таким образом, чтобы они соответствовали природе теории квантов и, кроме того, чтобы в каждой стадии вычисления входили только величины, доступные непосредственному наблюдению. В про-

---

[1]) H. C. Burger und H. B. Dorgelo, ZS. f. Phys. *23*, 258, 1924; L. C. Ornstein und H. C. Burger, ZS. f. Phys. *24*, 41; 28, 135; *29*, 241, 1924; W. Heisenberg, ZS. f. Phys. *31*, 617, 1925; S. Goudsmit und R. de F. Kronig, Naturwissenschaften, *13*, 90, 1925; H. Hönl, ZS, f. Phys. *31*, 340, 1925; R. de F. Kronig, ZS. f. Phys. *31*, 885; *33*, 261, 1925; A. Sommerfeld und H. Hönl, Ber. Berl. Akad. *141*, 1925; H. N. Russell, Nature *115*, 835, 1925.

[2]) Позднейшая литература по этому вопросу: L. S. Ornstein, H. C. Burger und W. C. van Geel, ZS. f. Phys. *31*, 340; *32*, 681, 1925; H. B. Dorgelo, ZS. f. Phys. *31*, 827, 1925; W. C. van Geel, ZS. f. Phys. *33*, 836, 1925. *Прим. перев.*

[3]) W. Heisenberg, ZS. f. Phys. *33*, 879, 1925.

тивоположность обыкновенной механике новая механика не имеет дела с описанием движения атомных частиц в пространстве и времени[1]). Она оперирует совокупностями количеств, которые замещают составляющие гармонического колебательного движения и символизируют вероятности переходов между стационарными состояниями, в согласии с принципом соответствия. Эти количества удовлетворяют известным соотношениям, которые замещают собою механические уравнения движения и правила квантования.

Такого рода метод приводит к самодовлеющей теории, имеющей достаточную аналогию с классической механикой. Это видно из того, что, как показали Борн и Иордан, в квантовой механике Гейзенберга имеет место теорема сохранения, аналогичная закону сохранения энергии в классической механике. Теория построена таким образом, что находится в автоматическом согласии с постулатами квантовой теории. В частности, условие частот выполнено благодаря тому, что значения энергии и частоты выведены из квантовых механических уравнений движения. Хотя основные уравнения, заменяющие правила квантования, включают в себе постоянную Планка, однако, квантовые числа не входят в них явным образом. Классификация стационарных состояний основана исключительно на рассмотрении вероятностей перехода, которые обусловливают последовательное образование совокупности этих состояний одного за другим. Коротко говоря, весь аппарат квантовой механики можно рассматривать как точную формулировку тенденций, заключенных в принципе соответствия. Нужно добавить, что теория удовлетворяет требованиям теории дисперсии Крамерса.

В виду больших задруднений математического характера пока еще не удалось применить теорию Гейзенберга к вопросу о строении атомов. Но даже из нашего краткого изложения можно заключить, что в новой теории сохраняют свое значение те результаты, которые были раньше выведены на основании механических представлений при помощи принципа соответствия, как, например, выражение для постоянной Ридберга[2]). Кроме того, чрезвычайно интересно

---

[1]) Гейзенберг исключает из рассмотрения такие, например, ненаблюдаемые величины, как скорость электрона на орбите, форма орбиты и т. п. *Прим. перев.*

[2]) Примечание автора к корректуре. Д-р Паули любезно сообщил мне, что ему удалось количественно вывести из новой теории формулу Бальмера для водородного спектра, а также вычислить влияние электрического и магнитного поля на спектр. Этот результат имеет большое значение, так как анализ Паули показал, что новая теория при объяснении спектральных данных свободна от прежнего затруднения, которое состояло в необходимости исключить стационарные состояния, соответствующие особенным решениям уравнений движения электронов.

отметить, что даже в тех простых случаях, которые были пока рассмотрены на основании теории Гейзенберга, новая теория приводит к количественному подсчету вероятностей перехода и значений энергии стационарных состояний, который систематически отличается от подсчета, произведенного при помощи правил квантования старой теории. Поэтому можно надеяться, что теория Гейзенберга окажется полезной в борьбе со сложными затруднениями, которые возникают при изучении тонких деталей спектров.

Выше мы упоминали о тех глубоких затруднениях, которые связаны с представлениями о взаимодействии между атомами как посредством излучения, так и при столкновениях.

Эти затруднения требуют, повидимому, такого же отказа от механических моделей в пространстве и времени, какой характерен для новой квантовой механики. Но существующая теперь формулировка этой механики не рассматривает еще попарно связанных процессов перехода, совершающихся при таком взаимодействии. В новой теории встречаются только те количества, которые зависят от существования стационарных состояний и вероятностей перехода между ними, и совершенно не рассматривается время, в течение которого происходят эти переходы.

Это ограничение, которое характерно для трактовки вопроса о строении атомов на основании квантовой теории, позволяет обнаружить только некоторые стороны аналогии между теорией квантов и классическими теориями. Такого рода аналогии относятся, главным образом, к свойствам атомов при излучении, и здесь теория Гейзенберга может оказать действительную помощь. Она, например, дает возможность установить для процессов рассеяния существование электронов, связанных в атоме, при помощи метода, аналогичного методам классической теории[1]), которые привели Томсона, как мы уже упоминали, к вычислению числа электронов в атоме по рассеянию рентгеновских лучей.

Это применение законов сохранения к взаимодействию между атомами обнаруживает совершенно другие стороны соответствия между теорией квантов и классической теорией. Последние очень важны для общей формулировки теории квантов, и обсуждение их неизбежно при более подробном исследовании взаимодействия между атомами и быстро движущимися частицами. Именно в этой области классические теории оказались существенно важными для нашего познания строения атомов.

Для математических кругов представит интерес то обстоятельство, что математические методы, созданные высшей алгеброй, играют существенную роль в формулировке новой квантовой механики. Так, на-

---

[1]) Ср. H. A. Kramers, Physica. Dec. 1925.

пример, общее доказательство теорем сохранения в теории Гейзенберга, выведенное Борном и Иорданом, основано на применении теории матриц, которая восходит еще ко времени Коши и была особенно развита Эрмитом. Можно надеяться, что началась новая эпоха взаимной стимуляции математики и механики. Физики будут, вероятно, прежде всего сожалеть о том, что в проблемах атомистики мы встречаемся, повидимому, с ограничением наших общих способов представления. Но это сожаление, надо думать, уступит место благодарности за то, что математика даже в этой области доставляет нам орудия для дальнейшего прогресса.