



## Теория атома и принципы описания природы

Воспринимаемые нами явления природы часто представляются изменчивыми и неопределенными. Для объяснения этого факта с давних пор принималось, что все явления являются результатом совместного действия очень большого числа элементарных частиц, так называемых атомов, которые сами постоянны и неизменны, но в силу малых размеров не поддаются непосредственному наблюдению. Совершенно независимо от принципиального вопроса, вправе ли мы требовать в этой области наглядных образов, теория атома первоначально должна была иметь гипотетический характер; при этом были склонны думать, что этот характер сохранится, поскольку по самой природе вещей невозможно ознакомиться с миром атома. Но здесь произошло то же, что и в других областях: развитие экспериментальной техники все дальше отодвигает пределы возможности наблюдения. Вспомним хотя бы познание строения Вселенной, достигнутое с помощью телескопа и спектроскопа, или проникновение благодаря микроскопу в тонкую структуру живых организмов. Необычайное развитие искусства физического эксперимента позволило нам познакомиться с большим числом явлений, дающих прямые свидетельства о движениях атомов и их количестве. Мы знаем даже такие явления, о которых с уверенностью можно сказать, что они вызваны действиями одного-единственного атома или даже одной его части. И хотя можно отбросить всякое сомнение в реальности атомов и, даже больше, нам известны подробные данные об их внутреннем строении, мы постоянно сталкиваемся с естественным ограничением наших способов созерцания. Именно это положение я и попытаюсь раскрыть.

Время не позволяет мне здесь подробно описать тот огромный прогресс, который был достигнут в рассматриваемой области благодаря открытию катодных лучей, рентгеновых лучей и радиоактивных веществ. Я ограничусь напоминанием тех основных характеристик картины строения атома, которые были получены благодаря этим открытиям. Общей структурной единицей атомов всех веществ являются так называемые электроны, отрицательно заряженные легкие частицы, удерживаемые в атоме притяжением значительно более тяжелого положительно заряженного ядра. Масса ядра определяет атомный вес вещества, но в остальном ее влияние на свойства вещества достаточно ограничено. Эти свойства определяются в первую очередь электрическим зарядом ядра, который всегда равен целому кратному заряду электрона. Целое число, показывающее, сколько электронов имеется в нейтральном атоме, равно атомному номеру, т. е. порядковому номеру данного элемента в периодической системе, в которой ясно выражаются своеобразные родственные связи элементов в отношении физических и химических свойств. Такое понимание атомного номера означает важный шаг к решению задачи, которая долгое время оставалась смелой мечтой естествознания, а именно, к осознанию роли целых чисел в закономерностях природы.

В ходе этого развития основные представления теории атома претерпели, разумеется, известные изменения. Предположение о неизменности атома сменилось предположением о постоянстве его частей. Исключительное постоянство элементов основано на том, что в обычных физических и химических процессах не затрагивается атомное ядро; меняется только характер связи электронов в атоме. Тогда как все опыты подтверждают допущение о неизменных электронах, постоянство атомного ядра более ограничено. Характерное излучение радиоактивных веществ является свидетельством распада атомного ядра, при котором испускаются электроны или положительно заряженные ядерные частицы большой энергии. По всем данным, этот распад происходит без внешнего влияния. Если задано некоторое число атомов радия, то можно сказать, что существует определенная вероятность распада известной части атомов за одну секунду. К встречающемуся здесь характерному отказу от причинного способа описания, полностью соответствующему основным чертам современного описания атомных явлений, мы еще вернемся. Пока я только напомню еще о важном открытии Резерфорда, что расщепление ядра может быть вызвано при определенных обстоятельствах и внешним воздействием. Как известно, ему удалось показать, что атомные ядра устойчивых элементов можно расщепить при их бомбардировке частицами, испускаемыми радиоактивными ядрами. С этого первого примера изменения человеком основных химических элементов началась новая эпоха в истории естествознания. Здесь для физики открывается совершенно новое поле деятельности: исследование внутреннего строения атомных ядер. Я не буду останавливаться подробно на открывающихся в связи с этим перспективах, но ограничусь лишь изложением тех заключений, которые были сделаны при попытках достичь объяснения обычных физических и химических свойств элементов на основе рассмотренных представлений об атомах.

На первый взгляд может казаться, что решение поставленной задачи очень просто. Картина атома, о которой идет речь, представляется миниатюрной механической системой, во многом напоминающей нашу планетную систему, при описании которой механика оказалась столь плодотворной, дав нам важный пример выполнения требований принципа причинности. Если известны положение и движение планет в заданный момент времени, то можно с неограниченной точностью вычислить их положение и движение в каждый последующий момент. Возможность выбрать при таком механическом описании произвольное начальное состояние ставит теорию атома перед большими трудностями. Если необходимо учитывать бесконечное множество постоянно меняющихся состояний движения, мы приходим в прямое противоречие с данными об определенных свойствах элементов. Можно было бы думать, что свойства элементов дают указания не о поведении единичного атома и что мы всегда имеем дело со статистическими закономерностями для усредненного поведения многих атомов. Механическая теория тепла, которая не только позволяет отдавать себе отчет об основных законах учения о

теплоте, но и дает понимание многих общих свойств элементов, является широко известным примером плодотворности статистического механического описания в атомной теории. Но элементы обладают и другими свойствами, которые дают возможность получить прямые выводы о состоянии движения внутриатомных частиц. Прежде всего нужно принять, что свойства света, испускаемого атомами элементов при определенных обстоятельствах и являющегося характерным для каждого элемента, существенно определяются процессами, происходящими в отдельном атоме. Согласно электромагнитной теории света можно бы ожидать, что подобно тому, как радиоволны свидетельствуют об электрических колебаниях, происходящих в установках радиостанции, частоты отдельных линий характеристического спектра элементов сообщают сведения о движении электронов в атоме. Но для осмысливания этих сведений механика не дает достаточных оснований; вследствие упомянутых возможностей изменения механического состояния движения мы не в состоянии понять появление резких спектральных линий.

Это отсутствующее при обычном описании природы звено, которое, очевидно, обусловлено поведением атома, было получено после открытия Планком так называемого кванта действия. Исходным пунктом этого открытия послужили явления теплового излучения, общий, не зависящий от природы данного вещества характер которых дал возможность установить границы применения механической теории тепла и электромагнитной теории излучения. Именно неприменимость этих теорий для описания явлений теплового излучения и привела Планка к познанию одной из не замеченных ранее черт законов природы, которая не проявляется непосредственно в обычных физических явлениях, но привела к перевороту при описании тех процессов, которые связаны с отдельным атомом. В противоположность свойственным обычному описанию природы требованиям непрерывности неделимость кванта действия привела к введению существенного элемента прерывности при описании атомных процессов. Насколько трудно было привести в соответствие новые знания с кругом наших обычных физических представлений, видно особенно ясно во вновь начатой Эйнштейном в связи с объяснением фотоэффекта дискуссии по вопросу о природе света. Судя по прежним данным, этот вопрос получил полное решение в электромагнитной теории света. Современное положение характеризуется тем, что мы, видимо, вынуждены выбирать между двумя противоречащими друг другу картинами распространения света: одна основана на представлении о световых волнах, другая — на корпускулярных представлениях квантовой теории света; каждая из них выявляет существенные, но различные стороны восприятия. В дальнейшем мы увидим, что эта кажущаяся дилемма является выражением связанного с квантом действия ограничения наших форм созерцания; это ограничение выявляется при детальном анализе применимости основных физических понятий для описания атомных явлений. Открытие Планка удалось сделать плодотворным для объяснения свойств элементов на основании наших знаний о составляющих частях атома только путем известного отречения от обычных требований наглядности и причинности. Принимая за основу неделимость кванта действия, автор настоящей работы предложил представить каждое изменение состояния атома как индивидуальный процесс, который нельзя описать более детально и в ходе которого атом переходит из одного так называемого стационарного состояния в другое. Согласно этому воззрению спектры элементов не дают сведений непосредственно о движении частиц в атоме; каждая отдельная спектральная линия принадлежит одному переходу между двумя стационарными состояниями, а произведение кванта действия на частоту дает изменение энергии атома при этом переходе. Этим путем удастся достичь простой трактовки общих эмпирических спектральных закономерностей Бальмера, Ридберга и Ритца. Названное воззрение о происхождении спектров получило и непосредственное подтверждение в известных опытах Франка и Герца, изучавших соударения атомов со свободными электронами. Количества энергии, которые при таких соударениях могут передаваться, как раз оказались равными вычисленным по спектру разностям энергии тех стационарных состояний, в которых атом находился до и после удара. Вообще такая точка зрения способствует непротиворечивому пониманию экспериментального материала; но непротиворечивость достигается только ценой отказа от более подробного описания отдельного процесса перехода. Мы здесь так далеко отходим от причинного описания, что каждому атому в стационарном состоянии мы предоставляем свободный выбор между различными возможностями перехода в другие стационарные состояния. Осуществление единичных процессов по самой сути вещей может рассматриваться только с вероятностной точки зрения. Такое положение, как показал Эйнштейн, имеет глубокое сходство с условиями, которые встречаются при спонтанном радиоактивном распаде.

Характерной чертой обсуждаемого взгляда на проблему строения атома является широкое применение целых чисел, которые как раз и играют существенную роль в эмпирических спектральных закономерностях. Так, классификация стационарных состояний основывается кроме атомного номера на так называемых квантовых числах, в систематику которых большой вклад внес Зоммерфельд. Эта точка зрения в дальнейшем позволила понять свойства элементов и их родство на основе представлений о строении атома. Может, очевидно, казаться поразительным, что такое описание стало возможным, несмотря на отмеченное здесь сильное отклонение от обычных физических представлений, поскольку все наши знания о составных частях атома покоятся именно на этих представлениях. Ведь любое использование понятий массы и электрического заряда равносильно ссылке на механические и электродинамические закономерности. Доводом полезности применения таких понятий вне пределов области применимости классической физики является требование непосредственного перехода квантотеоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебрегать квантом действия. Попытки применять в квантовой теории каждое классическое понятие в таком толковании, чтобы удовлетворить этому требованию, не приходя вместе с тем в противоречие с постулатом неделимости кванта действия, нашли свое выражение в так называемом принципе соответствия. Но проведение описания, строго удовлетворяющего принципу соответствия, потребовало преодоления многих трудностей, и только в последние годы удалось развить замкнутую квантовую механику, которая может считаться естественным обобщением классической механики и в которой причинное описание последней заменено принципиально статистическим описанием.

Решающий шаг в достижении этой цели сделал молодой немецкий физик Вернер Гейзенберг. Он показал, как можно последовательно заменить обычные представления о движении формальным применением законов

движения классической механики, причем квант действия входит только в определенные правила расчета символов, заменяющих механические величины. Однако этот глубокий подход к проблемам квантовой теории предъявляет большие требования к нашей способности абстрактного мышления; поэтому открытие новых вспомогательных средств, которые, несмотря на свой формальный характер, идут навстречу нашей потребности в наглядности, имеет неограниченное значение для развития и понимания квантовой механики. Я имею в виду введенные Луи де Бройлем представления о волнах материи, которые Шредингер сумел сделать столь плодотворными в первую очередь в связи с понятием о стационарном состоянии, квантовое число которого определяется числом узлов стоячих волн, представляющих данное состояние. Отправным пунктом для де Бройля была очень важная уже для развития классической механики аналогия между законами распространения света и движения материальных тел. Фактически волновая механика естественно подобна названной выше эйнштейновской квантовой теории света. Как я там, здесь не идет речь о замкнутой системе представлений, а, как подчеркнул Борн, о вспомогательном средстве для формулировки статистических законов, управляющих атомными процессами. Конечно, подтверждение представления о волнах материи прекрасными опытами по отражению электронов от металлической решетки имеет столь же решающее значение, как и доказательство волновой природы распространения света. Мы должны все-таки помнить, что применение волн материи ограничивается явлениями, в описание которых существенно входит квант действия, а следовательно, они лежат вне области, где может идти речь об осуществлении причинного описания в соответствии с нашими обычными представлениями и где таким словам, как природа материи и света, приписывается обычный смысл.

С помощью квантовой механики мы овладели обширной областью исследований; важнее всего, что мы оказались в состоянии описать в деталях многие физические и химические свойства элементов. В последнее время стало возможным объяснить даже радиоактивный распад, причем эмпирические вероятностные законы, управляющие этими процессами, оказались прямыми следствиями характерного для квантовой теории статистического способа рассмотрения. Это объяснение является особенно поучительным примером как плодотворности, так и формального характера волновых представлений. С одной стороны, здесь мы имеем дело с вопросом, который прямо примыкает к обычным представлениям о движении, поскольку вследствие большой энергии испускаемых атомным ядром частиц их пути можно наблюдать непосредственно. С другой стороны, обычные механические представления приводят нас в тупик при описании самого процесса распада, поскольку силовое поле, окружающее ядро, согласно этим представлениям должно препятствовать удалению частиц из ядра. В квантовой механике положение иное; здесь силовое поле является барьером, от которого большая часть волн отражается, но для небольшой части этих волн барьер прозрачен. Та доля волн, которая проникает сквозь барьер за определенное время, дает нам меру вероятности распада ядра за это время. Вряд ли можно осветить более ярко, как трудно говорить о природе материи без упомянутой оговорки.

В квантовой теории света встречаем подобное же отношение между нашими наглядными вспомогательными средствами и вычислением вероятности осуществления светом наблюдаемых действий. В соответствии с классическими электромагнитными представлениями свету нельзя приписывать собственно материальную (вещественную) природу, хотя наблюдение действия света всегда связано с переходом части энергии и импульса к материальным частицам. Ощутимое преимущество квантовых представлений о свете состоит главным образом в том, что они помогают учитывать сохранение энергии и импульса. Вообще характерной чертой квантовой механики является возможность использования законов сохранения энергии и импульса, несмотря на ограничение классических и электромагнитных представлений. Эти законы в известном смысле составляют противоположность лежащим в основе теории атома допущениям о постоянстве материальных частиц, которые, несмотря на отказ квантовой теории от представлений о движении, строго сохраняются. Фактически необходимость принципиально статистического способа описания атомных явлений вытекает из более детального изучения сведений, которые мы могли получить о них прямыми измерениями, и смысла, который можно приписать в связи с этим основным физическим понятиям.

С одной стороны, мы должны думать, что понимание этих понятий всецело связано с обычными физическими представлениями. Так, например, любое указание на пространственновременные соотношения основано на постоянстве элементарных частиц, так же как законы сохранения энергии и импульса являются основой любого использования понятий энергии и импульса. С другой стороны, постулат неделимости кванта действия является для классических представлений совершенно чуждым элементом, требующим при измерениях не только конечного взаимодействия между объектом и измерительным прибором, но и известной свободы при учете этого взаимодействия. Вследствие этого каждое измерение, преследующее цель упорядочить элементарные частицы в пространстве и времени, приводит к отказу от познания обмена энергией и импульсом между частицами и масштабами и часами, использованными в качестве системы отсчета. Подобным же образом любое определение энергии и импульса частиц приводит к отказу от прослеживания их в пространстве и во времени. Следовательно, вытекающее из самой сути измерения применение классических понятий в обоих случаях заранее связано с отказом от строго причинного описания. Такие рассуждения непосредственно ведут к установленному Гейзенбергом соотношению неопределенности, положенному им в основу обстоятельного исследования непротиворечивости квантовой механики. Принципиальная неопределенность, с которой мы здесь встречаемся, является, как показал автор, прямым выражением абсолютного ограничения применимости наших наглядных представлений при описании атомных явлений. Оно выявилось в кажущейся дилемме, с которой мы встретились в вопросе о природе света и материи.

Этот вынужденный отказ от наглядности и причинности при описании атомных явлений, возможно, будет воспринят как крушение надежд, возлагавшихся вначале на теорию атома. Тем не менее с точки зрения современных взглядов мы должны приветствовать этот отказ как существенный прогресс нашего познания. Речь не идет об отказе от общих основных принципов естествознания в тех областях, в которых мы с полным правом

рассчитываем на их поддержку. Открытие кванта действия не только указывает естественные границы классической физики; оно приводит естествознание в совершенно новое состояние, когда старый философский вопрос об объективном существовании явлений независимо от наших наблюдений ставится в совсем иной плоскости. Как мы видели, каждое наблюдение требует вмешательства в ход процесса, что подрывает основу причинного описания. Определенные самой природой границы возможности говорить о самостоятельных явлениях находят, повидимому, свое выражение в формулировке квантовой механики. Однако ее нельзя воспринимать как препятствие для дальнейшего развития; мы должны лишь быть подготовленными ко все более глубокому абстрагированию от обычных требований непосредственной наглядности в описании природы. Новых сюрпризов можно ожидать прежде всего в той области, где встречаются квантовая механика и теория относительности, поскольку здесь на пути полного слияния результатов, добытых этими теориями, лежат не решенные еще трудности.

Я рад случаю подчеркнуть, хотя и в конце доклада, большое значение созданной Эйнштейном теории относительности для нового развития физики в смысле ее освобождения от требований наглядности. Теория относительности научила нас, что целесообразность требуемого нашими чувствами резкого разделения пространства и времени основана только на том, что обычно встречаемые скорости малы по сравнению со скоростью света. Можно говорить, что открытие Планка подобным же образом привело к пониманию того, что целесообразность причинной точки зрения обуславливалась малостью кванта действия по сравнению с теми действиями, которые встречаются в обычных явлениях. В то время как теория относительности напоминала о субъективном, существенно зависящем от точки зрения наблюдателя характере всех физических явлений, вытекающая из квантовой теории неразрывная связь атомных явлений с их наблюдением, при использовании наших средств выражения, принуждает нас к проявлению такой же осторожности, как и в психологических проблемах, где нас беспрепятственно подстерегает трудность разграничения объективного содержания от наблюдающего субъекта. Не опасаясь быть ложно понятым, будто я намерен ввести некоторую мистику, не имеющую ничего общего с духом науки, хочу указать здесь на своеобразный параллелизм, существующий между возобновленной дискуссией о реальности причинных законов и издавна продолжающейся дискуссией о свободе воли. В то время как чувство свободы воли господствует в духовной жизни, требование причинности лежит в основе упорядочения ощущений. Вместе с тем в обоих случаях имеем некоторую идеализацию, естественные границы которой можно изучить более детально и которая означает, что чувство свободы воли и требование причинности одинаково незаменимы в отношениях между субъектом и объектом; это составляет ядро проблемы познания.

В таком представительном собрании естествоиспытателей' прежде, чем закончить, необходимо затронуть вопрос о том, что может дать новейшее развитие наших знаний об атомных процессах для проблемы живого организма. Хотя еще невозможно дать исчерпывающий ответ на такой вопрос, можно все-таки наметить некоторую связь между этими проблемами и кругом представлений квантовой теории. Первое указание в этом направлении мы видим в том, что лежащие в основе чувственных ощущений взаимодействия между организмами и средой могут быть при некоторых обстоятельствах так малы, что их можно будет сравнить с величиной кванта действия. Как уже часто наблюдалось, для получения ощущений зрения достаточно уже нескольких световых квантов. Мы видим, следовательно, что потребность организмов в самостоятельности и чувствительности удовлетворяется здесь до внешних, согласующихся с законами природы границ. Надо быть готовым к тому, что и в других решающих для постановки биологических проблем пунктах мы встретимся с такими же соотношениями. Но как только встречающиеся физиологические явления уточнены до указанных границ, мы сразу же подходим к границам возможности однозначного описания с помощью наших обычных наглядных представлений. Это ни в коей мере не противоречит тому факту, что живые организмы ставят много проблем, лежащих в сфере действия наших представлений; они образуют область плодотворного приложения наших физических и химических воззрений. Мы и не видим непосредственных границ применимости этих воззрений. Подобно тому как в принципе нет необходимости различать течение воды по трубам и крови по кровеносным сосудам, нельзя заранее ожидать глубокого принципиального различия между передачей раздражений в нервах и электропроводностью металлов. Во всяком случае для всех подобных задач верно, что любое частное их описание приводит в область теории атома. Что касается электричества, то как раз в последние годы удалось узнать, что лишь свойственное квантовой теории ограничение наглядных представлений о движении позволяет понять, каким образом электроны в состоянии перемещаться между атомами металла. Но такой углубленный способ описания этих явлений вовсе не нужен, если речь идет только о том, чтобы принимать в расчет действия, которые проявятся впредь. В более глубоких биологических проблемах, где речь идет о свободе и приспособляемости живых организмов в их реакции на внешние воздействия, надо учитывать, что познание дальнейших взаимозависимостей сделает необходимым учет обстоятельств, обусловленных ограничением причинного описания атомных явлений. Впрочем, уже вследствие неотделимой связи сознания с живым организмом мы должны спокойно воспринять, что проблема разделения живого от неживого не поддается пониманию в обычном смысле слова. Оправданием вторжению физика в подобные вопросы, повидимому, может служить то обстоятельство, что возникшая в физике новая ситуация столь убедительно напоминает старую истину: все мы являемся свидетелями и участниками великой картины бытия.