

Исследование атома и закон причинности²⁹

К числу наиболее интересных общих последствий современной атомной физики относятся те изменения, которым подверглось под ее влиянием понятие закономерности природы.

В последние годы много говорили о том, что современная атомная физика упразднила закон о связи причины и действия или по меньшей мере частично лишила его силы, что, по существу, нельзя уже более говорить о законосообразной детерминированности процессов природы. Иногда же прямо говорится, что принцип причинности несовместим с современным атомистическим учением. Вместе с тем, пока понятия причинности и закономерности недостаточно ясны, страдают неясностью и подобные формулировки. Поэтому мне хотелось бы вкратце сказать сейчас об историческом развитии этих понятий. Затем я коснусь отношений между атомной физикой и принципом причинности, возникшим задолго до квантовой механики. В заключение я рассмотрю следствия, вытекающие из квантовой механики, и расскажу о событиях в атомной физике самых последних лет. До сих пор общественность была мало осведомлена об этом, между тем можно, по-видимому, ожидать, что философия в свою очередь испытает воздействие со стороны атомной физики.

Понятие причинности было связано с отношением причины и действия исторически относительно недавно. В более ранней философии слово «causa» имело гораздо более широкий смысл, чем теперь. В схоластике, например, говорили, вслед за Аристотелем, о четырех типах «причин». То, что сегодня назвали бы структурой или идеальной сущностью вещи, называлось тогда «causa formalis»; «causa materialis» — это вещество, из которого вещь состоит; «causa finalis» — цель, ради которой вещь создана; наконец, «causa efficiens». Только она приблизительно соответствует тому, что мы теперь подразумеваем под словом «причина».

Прекращение понятия «causa» в нынешнее понятие причины заняло несколько столетий и было внутренне

связано с изменением отношения человека к действительности в целом и с возникновением в начале Нового времени естественных наук. По мере того как материальный процесс приобретал статус реальности, слово «*causa*» тоже стали применять к тем материальным событиям, которые предшествовали объясняемым событиям и каким-то образом вследствовали на них. Вот почему Кант, во многом просто делающий философские выводы из развития естественных наук со времен Ньютона, формулирует понятие причинности так, как мы привыкли его понимать с XIX века. «Узнавая, что произошло некоторое событие, мы всегда предполагаем, что ему предшествовало другое событие, из которого первое следует по некоторому правилу»³⁰.

Так смысл тезиса о причинности постепенно сузился, пока наконец не отождествился с презумпцией однозначной детерминированности событий в природе, а это в свою очередь означало, что точного знания природы или определенной ее области было бы — по меньшей мере в принципе — достаточно для предсказания будущего. Ньютоновская физика была устроена так, что позволяла, исходя из состояния системы в определенный момент времени, заранее рассчитать будущее движение системы. Представление о том, что природа в принципе устроена именно таким образом, в наиболее общей и наиболее понятной форме выразил Лаплас: если вообразить некое божественное существо, которое знает положение и движение всех атомов в данный момент времени, то оно должно было бы быть в состоянии вычислить заранее все будущее мира³¹. Столь узкую интерпретацию понятия причинности называют также детерминизмом, имея в виду, что существуют неколебимые законы природы, согласно которым настоящеестояние системы однозначно предопределяет ее будущее состояние.

Атомная физика с самого начала выработала представления, по сути дела *не* соответствующие такой картине. Противоречие было непринципиальным, но свойственный атомистическому учению образ мышления с самого начала неизбежно отличается от детерминистского. Уже в древнем атомизме Левкиппа и Демокрита предполагается, что процессы на макроуровне осуществляются как результат множества нерегулярных процессов на микроуровне. В пользу принципиальной возможности этого говорят бесчисленные примеры из повседневной жизни. Земледельцу, к примеру, довольно знать, что прошел дождь и почва

увлажнилась, и нет нужды знать, кроме того, как упала каждая капля. Или другой пример: мы точно знаем, что разумеем под словом «гранит», даже если нам в точности и неизвестны форма и химический состав отдельных кристаллов, пропорция их смеси и цвет. Словом, мы то и дело пользуемся понятиями, связанными с макрохарактеристиками событий, не интересуясь отдельными микропроцессами.

Идея статистического взаимодействия множества отдельных микрособытий уже в античном атомизме служила основой объяснения мира, и в виде ее обобщения возникло представление о том, что все чувственные качества материи суть вторичные следствия расположения и движения атомов. Уже у Демокрита есть такое утверждение: «Только по видимости нечто сладко или горько, только по видимости оно имеет цвет, в действительности же существуют только атомы и пустота»³². Если мы объясняем чувственно воспринимаемые процессы таким способом, а именно взаимодействием очень многих единичных микропроцессов, мы почти с необходимостью должны считать и закономерности природы только статистическими закономерностями. Хотя статистические закономерности и могут привести к утверждениям, степень вероятности которых столь высока, что она граничит с достоверностью, тем не менее принципиально всегда возможны исключения.

Понятие статистической закономерности часто кажется противоречивым. Можно, говорят, представить себе, что в природе процессы закономерно определены или же что они совершенно неупорядочены, но нельзя представить себе, что такое статистическая закономерность. В ответ на это следует напомнить, что в повседневной жизни мы сталкиваемся со статистическими закономерностями на каждом шагу и кладем их в основание нашей практической деятельности. Когда инженер, например, строит электростанцию, он учитывает среднегодовое количество осадков, не имея ни малейшего представления о том, когда именно пойдет дождь и сколько выпадет осадков.

Статистические закономерности, как правило, означают, что знание соответствующей физической системы не полно. Самый известный пример — игральная кость. Поскольку ни одна из ее граней не отличается от других и мы никоим образом не можем предсказать, на какую грань она упадет, можно принять, что в случае очень большого числа бросаний выпадение, например, пятерки как раз составит шестую их часть.

В эпоху Нового времени с самого начала делались попытки объяснить — не только качественно, но и количественно — поведение веществ как статистический результат поведения их атомов. Уже Роберт Бойль показал, что можно понять отношение между давлением и объемом газа, если считать давление результатом множества ударов отдельных атомов о стенку сосуда. Подобным же образом допущение, что в горячем теле атомы движутся интенсивнее, чем в холодном, позволило объяснить термодинамические явления. Этим представлениям удалось придать количественную математическую форму, прояснив тем самым смысл законов учения о теплоте.

Такое применение статистических закономерностей обрело окончательную форму во второй половине предыдущего столетия в так называемой статистической механике. В этой теории, основоположения которой представляют собой, конечно же, простые следствия ньютоновской механики, исследовались те выводы, которые можно сделать из неполного знания сложной механической системы. В принципе, следовательно, никто не отказывался от чистого детерминизма. Считалось, что каждое единичное событие полностью определено законами ньютоновской механики. Но кроме того, принимали во внимание, что механические свойства системы известны не полностью. Выразить такого рода неполное знание в надлежащих математических формулах удалось Дж. Гиббсу и Л. Больцману. Гиббс, в частности, показал, что понятие температуры тесно связано как раз с неполнотой знания.

Если мы знаем температуру некоторой системы, это значит, что наша система является одной из множества равноправных систем. Такое множество систем можно описать математически точно, чего нельзя сделать с выбранной нами единичной системой. Тем самым Гиббс — не вполне осознанно, — по существу, уже сделал шаг, который позже повлек за собой крайне важные следствия. Гиббс впервые ввел такое физическое понятие, которое может быть отнесено к некоему предмету в природе лишь в том случае, если наше знание этого предмета неполно. Если бы, например, были известны движение и положение всех молекул газа, не было бы уже смысла говорить о температуре газа. Понятие температуры может использоваться только при условии, если система известна нам не полностью и из этого неполного знания мы хотим сделать статистические выводы.

Хотя после исследований Гиббса и Больцмана в фор-

мулировку физических законов стали аналогичным образом включать понятия, связанные с неполным знанием системы, тем не менее в принципиальных вопросах придерживались детерминизма. Так было до знаменитого открытия Макса Планка, с которого началась квантовая механика. Занимаясь теорией излучения, Планк обнаружил в явлениях излучения сначала только один элемент прерывности. Он показал, что излучающий атом теряет свою энергию не равномерно, а прерывно, толчками³³. Этот прерывный, скачкообразный характер излучения энергии, как и все прочие представления атомной теории, приводит к предположению, что излучение представляет собой статистический феномен. Но прошло два с половиной десятилетия, прежде чем обнаружилось, что квантовая теория фактически вынуждает даже законы формулировать как статистические законы и *принципиально* отойти от детерминизма.

После работ Эйнштейна, Бора и Зоммерфельда³⁴ теория Планка оказалась ключом, которым открывались ворота, ведущие в мир атомной физики. С помощью модели атома Резерфорда — Бора удалось объяснить химические процессы, и с тех пор химия, физика и астрофизика образуют тесно спаянное единство. Однако в процессе математической формулировки квантовомеханических законов стало ясно, что нужно отойти от чистого детерминизма. Поскольку я не могу здесь говорить об этих математических подходах, я просто приведу некоторые положения, выразившие ту странную ситуацию, в которой оказались атомные физики.

Первое, в чем сказывается отклонение от прежней физики, — это так называемые соотношения неопределенностей. Выясняется, что невозможно одновременно с произвольной точностью определить место и скорость атомной частицы. Можно либо с высокой точностью измерить местоположение, и тогда вмешательство измерительного инструмента в известной мере исключает точное знание скорости, либо же, наоборот, возможность точного знания местоположения уничтожается точным измерением скорости, так что произведение обеих неточностей не может быть меньше величины постоянной Планка. Эта формула делает, во всяком случае, ясным, что понятия ньютоновской механики не могут применяться без ограничений: ведь для вычисления механического процесса необходимо знать одновременно и с одинаковой точностью местоположение и скорость в определенный момент времени, но

именно это, согласно квантовой теории, и невозможно.

Другая формула была выработана Нильсом Бором, который ввел понятие «дополнительность»³⁵. Он имеет в виду, что разные наглядные образы, с помощью которых мы описываем атомные системы, вполне согласуясь с определенным экспериментом, тем не менее исключают друг друга. К примеру, боровский атом можно описать как планетную микросистему: в центре атомное ядро, а на периферии — вращающиеся вокруг него электроны. Но для других экспериментов было бы целесообразно представить себе, что атомное ядро окружено системой стоячих волн и частота волн имеет определяющее значение для характеристики испускаемого атомом излучения. Наконец, атом можно рассматривать также как предмет химии, можно посчитать тепловые характеристики реакций его соединения с другими атомами, но в таком случае уже нельзя ничего сказать о движении электронов. Следовательно, эти различные образы правильны в каждом случае, когда применение их уместно, но они противоречат друг другу, и поэтому их называют дополнительными друг другу. Неопределенность, которой отмечен каждый из этих образов и которая выражается соотношением неопределенностей, позволяет избежать логического противоречия между ними.

Этих замечаний вполне достаточно, чтобы, даже не вдаваясь в математический аппарат квантовой механики, понять, что неполнота знания о системе неизбежно оказывается неотъемлемой частью всякого квантовомеханического утверждения. Законы квантовой механики по необходимости имеют статистический характер. Приведу один пример. Мы знаем, что атом радия может испускать α -лучи. Квантовая механика позволяет определить, с какой вероятностью в единицу времени α -частица покидает ядро. Но момент времени, когда это произойдет, она предсказать не может, он остается принципиально неопределенным. Нельзя также предполагать, что впоследствии будут найдены новые закономерности, которые позволят точно определить этот момент времени: если бы это произошло, нельзя было бы понять, каким же образом α -частицу можно рассматривать еще и как волну, испускаемую атомным ядром, а это ведь можно доказать экспериментально.

Парадоксальность того обстоятельства, что различные эксперименты выявляют то волновую, то корпускулярную природу атомной материи, заставляет формулировать статистические закономерности. В макропроцессах статистический элемент атомной физики, вообще говоря, не играет

роли, поскольку статистические законы дают для этих процессов столь большую степень вероятности, что их можно считать практически детерминированными. Тем не менее существуют такие случаи, когда макроскопическое событие зависит от поведения одного или нескольких атомов. В таком случае и макропроцесс можно предсказать лишь статистически. Поясню это на одном известном, но малоутешительном примере, а именно на примере атомной бомбы.

В случае обычной бомбы вес взрывчатого вещества и его химический состав позволяют заранее рассчитать силу взрыва. Для атомной бомбы, хотя и можно указать верхнюю и нижнюю границы силы взрыва, точный расчет принципиально невозможен, поскольку она зависит от поведения нескольких атомов в момент детонации. Подобным же образом и в биологии существуют процессы — на них особо указывал Йордан³⁶, — развитие которых направляется событиями в отдельных атомах. В частности, это, по-видимому, имеет место в случае генетических мутаций в процессе наследования. Приведенные примеры должны были пояснить практические следствия статистического характера квантовой механики. Причем ее развитие в этом аспекте завершилось более двадцати лет назад, и будущее вряд ли сможет здесь что-либо существенно изменить.

Тем не менее в самые последние годы круг проблем, связанных с темой причинности, обогатился новой точкой зрения, возникшей, как я уже говорил, в связи с новейшими открытиями в атомной физике. Проблемы, стоящие теперь в центре внимания атомной физики, представляют собой логическое следствие развития физики за последние 200 лет. Я должен поэтому еще раз кратко остановиться на истории атомной физики в Новое время.

В начале Нового времени понятие атома было связано с понятием химического элемента. Вещество характеризовалось как первичное, если его нельзя было больше разложить химическими средствами. Поэтому каждому элементу сопоставляется определенный сорт атомов. Например, кусок элементарного углерода состоит из одних только атомов углерода, кусок элементарного железа — из одних только атомов железа. Поэтому необходимо было принять столько же видов атомов, сколько существовало химических элементов. Поскольку же было известно 92 разных химических элемента³⁷, нужно было предположить существование 92 различных видов атомов. Но подобное представление весьма неудовлетворительно с точки зрения основ-

ной предпосылки атомистического учения. Ведь первоначально качества веществ должны были объясняться расположением и движением атомов. А такое представление имеет разумную объяснительную силу, собственно говоря, лишь в том случае, если все атомы одинаковы или же если число их видов весьма невелико. Если же необходимо допустить 92 качественно различных атома, мы выиграем не слишком много по сравнению с утверждением, что существуют просто качественно разные вещи.

Вот почему допущение 92 принципиально разных мельчайших частиц издавна казалось неудовлетворительным. Предполагалось, что должна существовать возможность свести эти 92 вида атомов к меньшему числу составляющих их элементарных частей. Давно уже пытались поэтому рассматривать химические атомы как состоящие из немногих первичных единиц. Древнейшие попытки превращения химических веществ друг в друга всегда исходили из той предпосылки, что в основе своей материя едина. За прошедшие 50 лет в самом деле обнаружилось, что химические атомы составлены, причем составлены только из трех первичных единиц, которые мы называем протонами, нейтронами и электронами.

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов и окружено некоторым числом электронов. Так, например, ядро атома углерода состоит из шести протонов и шести нейтронов и вокруг него на относительно большом расстоянии врачаются шесть электронов. Итак, развитие ядерной физики в 30-е годы привело к тому, что вместо 92 различных видов атомов появилось три разных типа мельчайших частиц. В результате атомистическое учение вступило на тот самый путь, который предписывали ему его фундаментальные предпосылки. После того как было установлено, что химические атомы состоят из трех основных единиц, должна была возникнуть возможность практически превращать химические элементы друг в друга. Как известно, за этим физическим объяснением вскоре последовала и техническая реализация. После того как в 1938 году Отто Ган открыл расщепление урана, последующее развитие техники позволило осуществлять превращение элементов в больших масштабах.

За последние 20 лет картина, впрочем, опять несколько запуталась. Уже в 30-е годы, помимо названных элементарных частиц — протонов, нейтронов и электронов, — были открыты новые, а за последние годы число этих новых частиц ужасающее разрослось. В противоположность трем

основным эти новые элементарные частицы нестабильны, т. е. способны существовать лишь весьма краткое время. Одни из этих частиц, которые мы называем мезонами, имеют продолжительность жизни около одной миллионной секунды, другие живут в течение сотой части этого времени, третий же сорт частиц, лишенных электрического заряда, живет в течение стобиллионной части секунды. За исключением нестабильности, новые элементарные частицы ведут себя совершенно так же, как и три стабильные первичные единицы материи.

На первый взгляд возникает впечатление, будто мы опять-таки оказались вынужденными допустить большое число качественно различных элементарных частиц, а это было бы крайне нежелательно в связи с основными предпосылками атомной физики. Но в экспериментах, проведенных в последние годы, выяснилось, что элементарные частицы могут превращаться друг в друга при соударении с затратой больших энергий. Когда встречаются две элементарные частицы с большой кинетической энергией, при их соударении возникают новые элементарные частицы — исходные частицы и их энергия превращаются в новую материю. Это обстоятельство можно проще всего описать, если мы скажем, что все частицы в принципе состоят из одного вещества, представляя собой лишь разные стационарные состояния одной и той же материи. В результате число 3, число первоэлементов, вновь сводится к числу 1. Существует одна-единственная материя, но она может находиться в различных дискретных стационарных состояниях. Одни из этих состояний стабильны — это протоны, нейтроны и электроны; множество же других нестабильны³⁸.

Хотя экспериментальные результаты последних лет вряд ли дают повод сомневаться в том, что атомная физика будет развиваться в этом направлении, до сих пор еще не удалось определить математически закономерности образования элементарных частиц. В настоящий момент атомная физика как раз занимается этой проблемой. Она решает ее как экспериментально — путем открытия новых частиц и исследования их свойств, — так и теоретически, стараясь законосообразно связать свойства элементарных частиц и записать их в математических формулах.

В этих попытках и всплыли те трудности с понятием времени, о которых я говорил выше. Изучая соударения элементарных частиц предельно высоких энергий, следует принимать в расчет пространственно-временную структуру

специальной теории относительности. В квантовой теории атомных оболочек эта пространственно-временная структура не играет существенной роли, потому что электроны атомных оболочек движутся относительно медленно. Здесь же имеют дело с элементарными частицами, движущимися почти со скоростью света. Их поведение можно, следовательно, описать только с помощью теории относительности. Эйнштейн пятьдесят лет назад обнаружил, что структура пространства и времени не столь проста, как мы представляем ее на основании повседневного опыта. Если мы называем прошлыми все те события, о которых мы можем, хотя бы в принципе, что-либо узнать на опыте, а будущими — те, на которые мы еще можем, хотя бы в принципе, воздействовать, то мы полагаем — в соответствии с нашим наивным представлением, — что между этими двумя группами находится бесконечно краткий момент, который можно назвать настоящим. Именно такое представление Ньютон и положил в основу своей механики.

После того открытия, которое Эйнштейн сделал в 1905 году, мы знаем, что между событием, названным мной будущим, и событием, названным мной прошлым, лежит конечный временной промежуток, величина которого зависит от пространственного расстояния между событием и наблюдателем³⁹. Сфера настоящего не ограничивается, следовательно, бесконечно малым моментом времени. Теория относительности исходит из предпосылки, что действия в принципе не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Эта особенность теории относительности, взятая в связи с соотношениями неопределенностей квантовой механики, приводит к затруднениям. Согласно теории относительности, действия могут распространяться только в строго ограниченной пространственно-временной области, в так называемом световом конусе, образованном теми пространственно-временными точками, которых достигает световая волна, исходящая из некоторого излучающего центра. Следует особо подчеркнуть, что эта пространственно-временная область имеет строго определенные границы. Квантовая механика выяснила, с другой стороны, что результатом строгого установления местоположения, а значит, и строгого пространственного ограничения является бесконечная неопределенность скорости, а стало быть, и импульса, и энергии. Практически это обстоятельство оказывается в том, что попытка математической формулировки взаимодействия элементарных частиц всегда приводит к бесконечным значениям энергии и

импульса, а это препятствует удовлетворительному математическому описанию⁴⁰.

В последние годы в связи с этими трудностями было предпринято немало исследований, однако вполне удовлетворительного решения дать не удалось. Единственной опорой кажется пока следующее допущение: в предельно малых пространственно-временных областях, порядок величины которых тот же, что и у элементарных частиц, пространство и время странным образом исчезают, а именно: для столь малых времен уже нельзя правильно определить сами понятия «раньше» и «позже». Разумеется, пространственно-временная структура в целом нисколько не меняется, однако приходится считаться с возможностью, что в экспериментах с процессами, протекающими в крайне малых пространственно-временных областях, обнаружится, что некоторые из них протекают в направлении времени, как бы обратном тому, которое соответствует их каузальной последовательности.

Здесь, таким образом, новейшие результаты атомной физики вновь оказываются связанными с проблемой закона причинности. В настоящий момент, правда, нельзя решить, сталкиваемся ли мы тут опять с новыми парадоксами и отклонениями от закона причинности. Может случиться, что при попытках математической формулировки законов физики элементарных частиц откроются другие возможности избегнуть названных трудностей. Но уже сейчас вряд ли можно сомневаться в том, что развитие новейшей атомной физики в этом пункте еще раз вторгнется в сферу философии. Окончательный ответ на поставленные только что вопросы можно будет дать только в том случае, если удастся установить действующие в сфере элементарных частиц математические законы — если, к примеру, мы узнаем, почему протон именно в 1836 раз тяжелее электрона⁴¹.

Отсюда явствует, что атомная физика все больше отделяется от детерминистских представлений. Во-первых, потому, что атомистическое учение с первых шагов рассматривает законы, определяющие макроскопические процессы, как статистические. Во-вторых, потому, что в первой половине нашего столетия неполнота знания атомных систем была признана принципиальным элементом теории. В-третьих, потому, что в самые последние годы понятие временной последовательности оказалось проблематичным в применении к пространствам и временам предельно малых масштабов, хотя мы пока не можем сказать, как же будет решена эта загадка.