

ПРИЧИННОСТЬ И СТАТИСТИКА В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ ¹⁾.

П. Иордан, Геттинген.

Развитие физики за последние десятилетия вновь и вновь выдвигает на первый план гносеологические вопросы. В теории относительности проблема пространства и времени предварительно получила законченное объяснение. Новые вопросы выдвигаются теорией квантов. К их числу принадлежит в особенности вопрос: существует ли причинность в элементарном физическом бытии? Полностью ли предопределена судьба отдельного атома или же существуют пробелы в каузальной определенности элементарных событий?

Физики в настоящее время не сомневаются в том, что вопрос о существовании полной причинности может быть решен только опытом, что причинность таким образом не есть априорная необходимость мышления. Правда, известная доза причинности является необходимой предпосылкой возможности физической науки вообще, так же как и закономерного человеческого существования. К счастью в нашем макроскопическом мире и на самом деле существует причинность, повидимому, не знающая исключений. Но для области атомных размеров из этого следует только то, что эта область подлежит причинным законам лишь в статистическом среднем. Остается еще вопрос: предписана ли для каждого отдельного атома полностью его судьба?

Прежде чем обратиться к этому вопросу, полезно строго проанализировать понятие причинности. Физик не может быть доволен приблизительным представлением о значении этого слова, которым мы располагаем. Равным образом ему совершенно неинтересны те метафизические значения, которые связываются с ним многими философами. Определить причинность для физика означает не что иное, как указать, каким образом можно установить экспериментально ее существование или несуществование. Вместе с тем уже и ясно, что определение причинности должно прогрессивно изменяться в связи с успехами наших воззрений, познаний и экспериментальных средств. Итак рассмотрим прежде всего роль причинности в классической физике поля.

¹⁾ Вступительная лекция, читанная в Геттингенском университете. *Naturwissenschaften*, 15, 105, 1927 г.

Классическая физика поля утверждает, что можно описать физическую действительность, — причем слово „описать“ мы употребляем здесь, так сказать, в чисто географическом смысле, — указывая для всякой точки четырехмерной пространственно-временной области определенные измеримые величины: силы поля, гравитационные потенциалы и т. д. При этом каузальность имеет место в следующем смысле: представим себе ограниченный и конечный участок пространства, например в форме ящика. Мы не будем детально входить в рассмотрение того, каким образом нужно было бы осуществить наши формулировки, принимая во внимание точные релятивистские пространственно-временные отношения, что, конечно, не представляло бы никаких трудностей. В некоторый определенный момент времени, скажем в 11 часов, пусть физическое состояние внутри всего ящика будет полностью известно, полностью измерено. Далее пусть физическое состояние на всей поверхности ящика между 11 и 12 часами непрерывно подвергается контролю. Установленными таким образом обстоятельствами физические явления внутри ящика от 11 до 12 часов однозначно определены. Это значит, что если воспроизвести в любое время и в любом месте начальное состояние ящика и временное течение процессов на его поверхности, то сами по себе воспроизведутся и все процессы внутри ящика. В определенном интервале времени — порядка величины поперечника ящика, деленного на скорость света — процессы внутри ящика будут даже независимы от процессов на его поверхности.

Это все — утверждения, которые доступны экспериментальной проверке. Конечно, при этом предполагается, что начальное состояние ящика не будет настолько сложным, что его полная физическая числовая характеристика будет невозможна. Так, например, следует исключить тот случай, когда внутри ящика находится живое существо — предпосылка, что и в этом случае возможно осуществить точную числовую характеристику физического состояния слишком далека от практической возможности. Для целей биологии принцип причинности и проблема причинности должны быть сформулированы существенно иным и значительно более сложным образом, нежели для физики.

Но вернемся к физической причинности. Необходимо подчеркнуть, что эта причинность есть нечто в высшей степени замечательное. Она ни в коем случае не равнозначна с существованием физических законов вообще — с существованием математических соотношений между физическими величинами в некоторой области мира. Существует, кроме того, своеобразная асимметрия между пространственными и временными мировыми координатами. Именно, согласно принципу причинности, между известными областями мира, разделенными во времени, существует физическая зависимость; между простран-

ственно-разделенными областями такой зависимости не существует никогда.

Теоретически принцип причинности физики поля обосновывается двумя обстоятельствами, которые мы здесь лишь коротко укажем, не входя в математическое доказательство того, что они действительно обуславливают справедливость принципа причинности в изложенной форме. Во-первых, физические закономерности, т. е. математические соотношения, которым удовлетворяют числовые характеристики поля, суть не что иное, как дифференциальные уравнения и притом, главным образом, в первом приближении, линейные дифференциальные уравнения с частными производными второго порядка. Во-вторых, известно, что если необходимо иметь в четырехмерной области мира наиболее простую геометрию, в которой справедлива теорема Пифагора, то нужно ввести не само время, но мнимое время в качестве мировой координаты. Это обстоятельство весьма существенно. Если бы вместо этого четырехмерный мир имел четыре действительных измерения (причем в то же время общие физические законы, т. е. дифференциальные уравнения электромагнетизма и тяготения оставались бы неизменными), то существовало бы, так сказать, нечто большее нежели причинность. А именно, точно зная малую область мира, можно было бы вывести физическое состояние сколь угодно удаленных в пространстве или во времени областей мира. Если же, наоборот, мир имел бы два действительных и два мнимых измерения, то причинности не существовало бы вовсе. Могло бы случиться, что внутри ограниченного ящика внезапно возникали движения, не имея для этого причин ни внутри ящика, ни пришедших через его стенки извне. Таково значение принципа причинности в физике поля. Он не есть сам по себе закон природы — законы природы суть дифференциальные уравнения, которым подчинено физическое поле. Закон причинности есть математическое следствие законов природы, — теорема математической теории гиперболических дифференциальных уравнений, примененная к законам природы.

Таким образом можно действительно ожидать, что принцип причинности окажется несостоятельным, когда мы от классической физики поля перейдем к теории квантов, ибо при этом испытывают глубокое изменение как раз те основные физические положения, которые мы указали в качестве источников справедливости принципа причинности. Уже описание физической действительности, как мы теперь знаем, не может быть осуществлено принятым в классической физике способом. Физические величины не распределены в области мира непрерывно; физические движения не происходят сплошь непрерывным образом; существуют элементарные прерывности, существуют квантовые скачки. От причинности при этом остается не больше чем статистическая причинность. Если мы экспериментируем с очень [большим

числом одинаковых атомов или если мы опыт, произведенный с небольшим числом атомов, повторяем бесконечное число раз, то мы приходим всегда к результатам, которые находятся в согласии с принципом причинности. Мы только что указывали, что физическая закономерность и физическая причинность не одно и то же. Не лишне поэтому подчеркнуть, что в этом пункте относительно физической закономерности можно сказать то же самое, что и относительно причинности: все, что мы до настоящего времени знаем, есть, главным образом, статистическая закономерность.

В познании этой закономерности, как известно, за последнее время были достигнуты важные успехи. В настоящее время можно, например, рассчитывать спектр, связанный с движениями электронов внутри атома, в принципе так же хорошо, как в классической механике — движение планет. Однако, несмотря на то, что ход вычисления в обоих случаях весьма сходный, имеется и существенное различие в значении результатов вычисления. Классическое вычисление дает возможность заключить о судьбе именно нашей определенной планетной системы. Вычисление в квантовой механике вообще не позволяет сделать никаких заключений об определенном единичном атоме, но применимо к среднему значению, взятому для большого числа одинаковых атомов. В самом деле, рассмотрим, например, поведение атома под влиянием какого-нибудь внешнего воздействия, например, падающего света или электронного толчка; вычисление дает результат, который мы ни в коем случае не должны понимать по классической схеме в том смысле, что при определенных значениях фазовых постоянных атома наступят совершенно определенные события. Мы должны истолковать результат вычисления лишь таким образом: существует определенная вероятность, что атом сделает то-то, но существует также определенная вероятность и того, что он сделает нечто иное.

Сходное положение имеем мы в оптике. Действительно классическая теория оптики позволяет вычислить все интерференционные опыты в безупречном согласии с действительностью. Но если вычисление дает определенную интенсивность света в известном месте, то это не значит, что в действительности там будет выделено в точности соответствующее количество энергии. Напротив, классическое волновое поле означает лишь известную вероятность того, что в данную точку придут световые кванты. Как известно, для всякого луча материальных корпускул можно построить соответствующий ему волновой луч, который будет относиться к корпускулам совершенно так же, как волновой луч света к световым квантам. И здесь так же, как и всюду, обнаруживается чисто статистическая природа известных до настоящего времени законов квантовой механики.

Мы должны поэтому концентрировать наше внимание не на дискретных, прерывных элементарных состояниях и элементарных

процессах, но на их вероятностях. С этими вероятностями в описание физической действительности вновь входят непрерывно изменяющиеся величины, и вместе с тем мы в одном из самых основных пунктов вновь приближаемся к классическому, непрерывному способу описания. Поэтому напрашивается предположение, что для непрерывно изменяющихся величин вероятности должен существовать закон причинности, аналогичный ранее формулированному закону причинности классической физики поля. Это и есть на самом деле, хотя и в более абстрактной форме, нежели в классической теории.

Как известно, Шрёдингер пришел своим собственным независимым путем к формулировке квантовой механики, которая математически оказалась равнозначной с развитой из идей Гейзенберга матричной теорией. Он открыл математические соотношения квантовой механики, которые вследствие математической эквивалентности обеих теорий, правда, по существу уже содержались в матричной теории, но их явная формулировка означает тем не менее большое обогащение квантовой механики.

Шрёдингер, кроме того, попытался в связи со своими формулами развить новые физические основы теории квантов, причем он стал на точку зрения, противоположную развитым Планком, Эйнштейном и Бором основным представлениям теории квантов — стационарным состояниям, квантовым скачкам и т. д. Он попытался вернуться к квази-классическим представлениям, в которых уже не появляются никакие прерывности, в которых, следовательно, принцип причинности должен иметь место в классической форме. Но эти спекуляции Шрёдингера вызвали единодушное возражение со стороны других исследователей, принимающих участие в разработке квантовой механики. Для нас не представляет сомнения, что новые понятия Шрёдингера должны получить физическое истолкование в тесной связи с прежними представлениями о стационарных состояниях и квантовых скачках и идеями Гейзенберга, — что, таким образом, закономерности Шрёдингера, подобно законам матричной теории, должны быть истолкованы статистически, как это уже было указано. Подобное статистическое истолкование теории Шрёдингера было дано в очень ясной и выразительной форме Борном, на соображениях которого базируются нижеследующие рассуждения.

Существенное содержание открытия Шрёдингера, как известно, состоит в следующем. Законы квантовой механики, которые в матричной теории формулируются с помощью трансцендентной алгебры в виде системы бесконечно большого числа уравнений с бесконечно большим числом неизвестных, вместо этого можно выразить совершенно обычными дифференциальными уравнениями. Тем самым формально вновь приобретает большое приближение к классической теории. На вопрос о том, каким образом воз-

можно в прерывной запутанности атомных квантовых процессов что-либо описать при помощи дифференциальных уравнений, мы отвечаем вместе с Борном так: функция, которая удовлетворяет дифференциальному уравнению, и есть как раз функция вероятности.

Рассмотрим несколько ближе эту функцию вероятности и выясним при этом ее аналогию с классическими величинами. С этой целью рассмотрим механическую систему, состоящую из двух материальных точек с прямоугольными координатами x_1 x_2 до z_1 z_2 , т. е. систему, обладающую шестью степенями свободы. Построим теперь нечто подобное рассматриваемому в статистической механике фазовому пространству системы, а именно — координатное пространство, которое, однако, обладает вдвое меньшим числом измерений, нежели фазовое пространство. В нашем примере это будет шестимерное пространство с координатами от x_1 до z_2 . В этом координатном пространстве система, обладающая определенными координатами, но произвольными моментами, изображается одной определенной точкой, которую мы будем называть изображающей точкой системы. Согласно классической механике эта изображающая точка системы описывала бы в координатном пространстве определенный путь. Но если мы находим эту точку в определенный момент времени в известном месте координатного пространства, то мы не можем наперед сказать, как она будет перемещаться, так как мы по месту изображающей точки системы можем найти только координаты, но не импульсы наших двух материальных точек. Мы можем определить лишь вероятность того, что точка из этого места дальше пойдет по определенному направлению.

Конечно в классической механике мы можем это статистическое заключение уточнить до совершенно точного предсказания, если мы будем наблюдать не только место, но и скорость нашей изображающей точки системы. Но это как раз и есть тот пункт, в котором квантовая механика отличается от классической. Если у некоторой квантово-механической системы известные координаты суть эмпирически наблюдаемые величины,—причем мы здесь слово координаты употребляем настолько в общем смысле, что, например, и энергия или квантовые числа также являются координатами,—то соответствующие этим координатам импульсы суть как раз принципиально недоступные наблюдению величины¹⁾. Поэтому мы можем только что сформулированный статистический вопрос классической механики перенести в квантовую механику и вероятно получим на него ответ

¹⁾ При этом с различными экспериментальными установками возможно наблюдать различные координаты; но с одной и той же определенной установкой можно, в лучшем случае, точно наблюдать определенные координаты атома, но соответствующие импульсы при той же самой экспериментальной установке как раз и будут принципиально недоступны точному наблюдению.

из дифференциального уравнения Шрёдингера. Я должен при этом сказать „вероятно“, так как соответствующие рассуждения еще не закончены.

Но следующий вопрос, тесно связанный с только что рассмотренным, можно считать получившим удовлетворительный ответ благодаря соображениям Борна и Паули. Если мы для нашей системы знаем энергию или квантовые числа, или общее: если мы знаем, что система имеет определенную вероятность пребывать в первом квантовом состоянии и определенную вероятность пребывать во втором квантовом состоянии и т. д., то какова будет тогда вероятность того, что изображающая точка системы в координатном пространстве обладает прямоугольными координатами совершенно определенной величины? На этот вопрос можно ответить сейчас же, коль скоро известна волновая функция Шрёдингера в координатном пространстве.

Эта функция Шрёдингера, которая таким образом есть функция шести переменных и кроме того зависит от времени, удовлетворяет основному дифференциальному уравнению Шрёдингера. И вот относительно этой функции вероятности можно утверждать, что к ней применим точный принцип причинности. Для этого однако, естественно, не нужно рассматривать ящик в обычном трехмерном пространстве, но — шестимерный ящик в шестимерном координатном пространстве. Тогда формулировка принципа причинности будет дословно та же, что и в классической физике; на месте числовых характеристик электрических напряжений поля и т. д. внутри и на поверхности ящика будут теперь, однако, фигурировать числовые характеристики волновой функции Шрёдингера.

Мы можем, таким образом, резюмировать: классическая физика поля описывала мир при помощи физических величин, непрерывно распределенных в трехмерном пространстве и непрерывно движущихся во времени. Квантовая механика описывает мир при помощи абстрактного координатного пространства, которое обладает бесконечно большим числом измерений,— число измерений пропорционально числу всех находящихся в мире частиц материи. В этом абстрактном пространстве двигаются, в свою очередь, непрерывно распределенные величины, которые, однако, описывают элементарные события атомного мира явлений не непосредственно, но определяют вероятности квантовых процессов. Причинность, понимаемая не как противоположность метафизическому понятию случайности, но как сформулированное выше физическое утверждение, формально имеет место совершенно одинаковым образом в обеих теориях.

Мы видим, что путем рассмотрения средних значений и вероятностей можно исключить элементарные прерывности в физическом бытии и отыскать соотношения, которые математически доступны обработке методами, аналогичными применяемым к заведомо непре-

рывным величинам классической физики. Квантовая механика оказывается здесь количественным уточнением принципа соответствия Бора, суть которого, вопреки распространенному взгляду об исключительном господстве целых чисел, состоит в том, что стремятся, путем рассмотрения средних значений, восстановить формальную аналогию с классическими законами.

Вернемся теперь от рассмотрения непрерывных средних значений вновь к прерывным элементарным процессам. Зададимся вопросом о том, что же можно будет сказать об элементарных процессах после того, как все проблемы о средних значениях в принципе будут разрешены. Ответить на это не так просто, как может показаться первоначально, и я был бы повинен в весьма большой поверхностности, если бы, по крайней мере, не указал на трудности, которые при этом возникают.

Рассмотрим прежде всего эмпирическую сторону вопроса. Можно бы, казалось, думать, что эксперимент во всяком случае дает не что иное, как средние величины. Многие (в Геттингене) слышали превосходный доклад Чернике о броуновском движении и о работах шведского физика Изинга. В этом докладе в живой и наглядной форме были показаны непреходимые границы, которые стоят на пути прогрессирующего уточнения техники измерения. Невозможно, например, повысить точность измерения гальванометра за пределы строго определенной величины; невозможно — вследствие броуновского движения во всех частях аппаратуры. Игла, нить подвеса, оболочка и окружающий воздух состоят из атомов, которые находятся в непрерывном, беспорядочном, недоступном контролю тепловом движении; ток через гальванометр состоит из отдельных электронов и поэтому также обнаруживает незакономерные, доступные лишь статистическому подсчету, флуктуации своей интенсивности, которые совершенно таким же образом ограничивают чувствительность аппарата. Если вспомнить, что то же самое происходит во всех наших приборах, что все наши измерительные инструменты находятся в тепловых движениях и дрожаниях, то можно было бы легко подумать, что экспериментатор так же мало может сказать относительно состояний и процессов отдельного атома, как и квантовая механика может о них предсказать. Однако существует радикальный способ „усмирить“ броуновское движение аппарата. Простой рецепт, который теоретик с этой целью может дать экспериментатору, состоит в следующем: производи свои опыты при абсолютном нуле температуры! К счастью физики-экспериментаторы нашли и еще один рецепт, вовсе не такой неудобный для осуществления и принципиально равнозначный с первым. Этот рецепт гласит: работай с немногими весьма богатыми энергией частицами! По сравнению с энергией быстрой α -частицы тепловая энергия окружающих атомов исчезающе мала. Термическая толкотня этих атомов уже

не оказывает на летящую α -частицу никакого действия. И в самом деле, как известно, главным образом, благодаря исследованиям К. Т. Р. Вильсона, мы можем эмпирически проследить судьбу отдельной α -частицы, наблюдать ее путь и установить момент квантового скачка, которым этот путь заканчивается.

Таким образом при известных обстоятельствах моменты отдельных квантовых скачков принадлежат к вполне доступным эксперименту величинам; спрашивается, что же может сказать теория относительно этих моментов? Простейший и наиболее непосредственно напрашивающийся ответ, очевидно, состоит в следующем. Теория дает нам средние величины. Она говорит, сколько квантовых скачков должно произойти в известный промежуток времени в среднем, взятом для многих отдельных экспериментов. Следовательно — можно отсюда заключить — теория дает для единичного квантового скачка вероятность того, что он произойдет в определенный заданный наперед момент времени. И следовательно — можно было бы теперь заключить дальше — истинный момент наступления квантового скачка на самом деле не детерминирован, и существует лишь вероятность квантового скачка. Но это последнее заключение в действительности не есть уже необходимое следствие из предшествующего; оно представляет собой гипотезу, выходящую за пределы его. Эта есть именно та гипотеза, которую Бор, Крамерс и Слэтер попытались положить в основание своей теории излучения. Но эти исследователи ясно понимали, что эта гипотеза должна вести к некоторому определенному следствию, а именно к тому, что закон сохранения энергии справедлив лишь статистически. Это следствие, как известно, опровергнуто блестящими опытами Боте, Гейгера и Комптона. В настоящее время мы можем определенно утверждать следующее: если атом с квантовым скачком испускает свет и этот свет, не встречая на своем пути препятствий в виде интерференции, поглощается другим атомом, то происходит квантовый скачок поглощающего атома, который отстоит во времени от квантового скачка излучающего атома на расстоянии, в точности соответствующем пространственному расстоянию атомов. Мы видим, таким образом, что моменты квантовых скачков уже ни в коем случае не являются недетерминированными.

Казалось бы, можно попытаться сказать так: моменты квантовых скачков детерминированы поскольку этого требует точное выполнение закона сохранения энергии, в остальном — они недетерминированы. Однако это несколько двусмысленное объяснение слишком неопределенно, чтобы, пользуясь им, можно было бы что-нибудь предпринять, когда, например, приходится встречаться с обстоятельствами, осложненными интерференцией. Другой путь для преодоления этих трудностей уже давно был испробован Венцелем: так как акт поглощения в нашем только что рассмотренном примере полностью детер-

минирован предшествующим актом испускания, то оба вместе можно бы рассматривать как один единственный квантовый элементарный акт и в таком случае надеяться, что подобные элементарные акты друг от друга статистически независимы. Представляется, однако, что и по этому пути нельзя прийти к простым формулировкам.

В высшей степени знаменательно, что в только что разъясненных формулировках Борна — Паули на самом деле ничего не говорится о вероятности единичного квантового скачка, но говорится о вероятности того, что изображающая точка системы находится в определенном месте координатного пространства. Таким образом можно, повидимому, надеяться, что эти рассуждения нас приведут действительно к независимым физическим элементарным вероятностям. А именно, хотя по квантовой механике все возможные вероятности в принципе могут быть вычислены, однако остается неразрешенной существенная проблема. Простоты ради рассмотрим простой пример. Представим себе, что мы бросаем два кубика, и пусть при этом эмпирически обнаруживается, что в среднем наверху оказывается одно очко одновременно с тремя так же часто, как четыре с пятью, и в два раза чаще, чем две двойки. Если бы мы имели теорию, которая могла бы предвычислять каким-нибудь очень сложным и абстрактным образом эти эмпирические факты, то тогда мы могли бы быть довольны. Однако на самом деле мы довольны уже и тогда, когда теория может быть приведена в следующей форме: мы говорим, что для каждого кубика любое из его шести положений одинаково вероятно и что оба кубика статистически друг от друга независимы. Только тогда, когда мы таким образом констатируем факты, нам кажется, что мы их действительно поняли.

Однако в случае с двумя кубиками положение таково, что мы заранее знаем, что нет возможности построить теорию каким-либо другим образом, кроме только что описанного. В квантовой механике положение иное: в квантовой механике в настоящее время мы можем вычислять все вероятности; но мы их еще не понимаем! Мы бы только тогда могли утверждать, что поняли их, если бы мы смогли следующим образом истолковать математические вычисления, которые произведены в абстрактном координатном пространстве: в известных случаях не существует предуказания для того, что сделает природа; она может сделать то или иное; то и другое, — оба одинаково вероятны, и решение, которое природа принимает в таком случае, совершенно независимо от решений, которые она принимает в других случаях.

Другими словами: вероятности, которые дает нам квантовая механика, мы должны количественным образом свести на независимые элементарные вероятности. Только тогда сможем мы утверждать, что мы действительно поняли эти законы; только тогда можем мы решить, при каких условиях и каким образом детерминирован момент кванто-

вого скачка и когда он не детерминирован. Только тогда мы сможем точно оценить, что в физическом бытии каузально определено и что предоставлено случаю.

В заключение следует еще в особенности подчеркнуть одно обстоятельство. Мы рассматривали только что как уже установленное, что элементарный анализ квантово-механических законов вероятностей, который еще надлежит выполнить, должен повести к заключению, что известные элементарные процессы не детерминированы и с одинаковой вероятностью могут осуществляться различными способами. Но в действительности это вовсе не очевидно. То обстоятельство, что законы квантовой механики суть законы средних значений и только при посредстве статистических понятий могут быть применены к элементарным процессам, не является еще принудительным основанием к тому, что элементарные процессы должны быть законами вероятностей.

Таким образом мы можем наш вопрос о том, признает ли современная физика детерминизм, — вопрос, который, как мы видели, при ближайшем рассмотрении распадается на несколько различных вопросов, — последний раз поставить в следующей форме: являются ли искомые элементарные законы законами вероятности или законами детерминированными? Возможно ли вообще, чтобы момент единичного квантового скачка оказался недетерминированным?

По всей вероятности дело обстоит так, что и на самом деле в элементарных физических процессах встречаются неполные детерминированности, т. е. чистые вероятности. Но, как уже сказано, определенное решение возможно только после дальнейшего анализа квантовой механики в направлении, указанном Борном и Паули.