

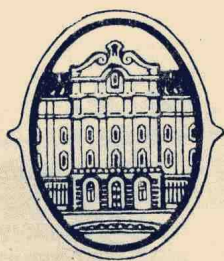
7

ВЕСТНИК ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 22

СЕРИЯ
ФИЗИКИ И ХИМИИ

Выпуск 4



ЛЕНИНГРАД
1956

ФИЗИКА

Ю. Н. Демков

ПРИЧИННОСТЬ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

Делается предположение о том, что существуют „антипричинные“ частицы и изучаются логические следствия из него. Показано, что такое предположение могло бы объяснить парадоксальные свойства частиц с отрицательной энергией, привело бы к выделению направления времени в физических явлениях, а также облегчило бы релятивистски-инвариантное рассмотрение уравнения Дирака. Однако гипотеза эта встречается с рядом трудностей, в частности эксперименты с позитронами и μ -мезонами ее не подтверждают.

В физике причинная связь двух событий A и B может быть определена по-разному. В наиболее чистой форме, в той, которая соответствует классическим представлениям, эта связь выражается утверждением: для того чтобы произошло событие B , необходимо и достаточно, чтобы произошло событие A . Тогда мы можем сказать, что событие A является причиной, а событие B следствием этой причины.

При переходе к квантовым представлениям формулировка эта должна быть несколько изменена: если произошло событие A (причина), то существует число w , $0 < w < 1$, выражающее вероятность (или имеется комплексное число c , квадрат модуля которого дает эту вероятность) того, что произойдет событие B (следствие). Конечно, на практике такие идеализированные условия встречаются крайне редко; как правило, имеется очень много событий и причинно-следственная связь между ними весьма сложна, но это в принципе не меняет дела.

Одним из главных обстоятельств, которое следует включить в формулировку принципа причинности, является то, что событие A — причина, должно предшествовать следствию — событию B . Событие A должно произойти раньше по времени, чем B , при этом настолько раньше, что между A и B может пройти сигнал. Иначе говоря, событие — причина A находится по отношению к событию — следствию B в абсолютном прошлом. Тем самым в природе выделяется направление времени, всякое явление имеет причину, находящуюся в прошлом. Это утверждение есть результат громадного количества наблюдений — всего общечеловеческого опыта. Сначала человек рождается, потом умирает; сначала прибор испускает электрон, который потом может быть зарегистрирован счетчиком или фотопластинкой и т. д. Можно было бы привести бесконечное число столь же тривиальных на первый взгляд наблюдений.

Однако существует также большое число и обратимых процессов. В первую очередь это процессы, которые подчиняются классической (или релятивистской) механике. Если мы будем рассматривать обратно во времени движение брошенного камня, или работу какого-либо механизма, то мы не обнаружим ничего удивительного, если не принимать во внимание таких необратимых процессов, как трение.

Таким образом в классической механике не содержится никакой асимметрии по отношению к направлению времени.

Если далее обратиться к классической электродинамике, то в основных ее уравнениях мы увидим ту же симметрию по отношению к знаку времени. Однако здесь, несмотря на симметрию уравнений, при их решении приходится иногда использовать принцип причинности. Отказ от опережающих потенциалов при решении неоднородного волнового уравнения в бесконечном пространстве, т. е. принцип излучения, фактически является применением принципа причинности к этой задаче.

Принцип излучения можно не использовать, если решать задачу Коши, т. е. задать электромагнитное поле в начальный момент времени во всем пространстве и найти поле в последующие моменты времени, используя уравнения Максвелла.

Однако при самой постановке задачи Коши приходится использовать принцип причинности; не используя его, нельзя получить однозначного решения уравнений электродинамики.

Тем не менее нельзя считать, что электродинамика является теорией несимметричной по отношению к направлению времени. Принцип излучения (причинность) появляется в электродинамике извне и его можно совсем не принимать во внимание для широкого класса задач, связанных с ограниченной частью пространства.

В квантовой механике положение значительно меняется. Уравнение Шредингера $H\psi = ih \frac{\partial \psi}{\partial t}$ попрежнему симметрично относительно изменения знака времени. Если заменить ψ на $\bar{\psi}$; t , на $-t$, то уравнение Шредингера попрежнему будет удовлетворяться.¹

Однако, хотя волновая функция ψ подчиняется уравнению симметричному относительно знака времени, само толкование волновой функции, которое, очевидно, неотделимо от всего аппарата квантовой механики, совершенно несимметрично (см., например, [1]).

Если в результате опыта мы обнаружили частицу в некотором состоянии, которое характеризуется волновой функцией ψ , то мы можем использовать эту функцию только для того, чтобы с помощью уравнения Шредингера определять состояния частицы в последующие моменты времени. О том, в каком состоянии находилась частица до измерения, мы почти ничего не можем сказать.²

Таким образом, в квантовой механике время оказывается выделенным, несмотря на полную симметрию математического аппарата.

Для того чтобы попытаться истолковать причину этого факта, выясним, каким образом можно было бы восстановить нарушенную сим-

¹ Предполагается, что t не входит в H . В противном случае, сами внешние условия меняются со временем и симметрия, конечно, может и не сохраняться. Далее предполагается, что оператор H вещественный. Трудности, которые появляются с комплексным H (магнитное поле) легко можно обойти.

² Если ψ характеризует состояние частицы до измерения, то единственное что нам известно, что $\int \bar{\psi} \psi d\tau \neq 0$.

метрию. Прежде всего, можно попытаться дать другое, симметричное толкование волновой функции. Для этого пришлось бы отказаться от обычного статистического толкования. Попытки многих авторов¹ в этом направлении были до сих пор безуспешны и поэтому мы не будем рассматривать этой возможности. Другая возможность заключается в том, что можно предположить существование частиц (или состояний частиц), которые вели бы себя по отношению ко времени противоположно обычным частицам. Иначе говоря эти частицы вели бы себя, как обычные частицы лишь при изменении знака времени.

Такие частицы могли бы подчиняться тому же уравнению Шредингера, однако, толкование волновой функции было бы совершенно иным: если нам известно (в результате измерения) состояние частицы в некоторый момент времени, то с помощью уравнения Шредингера мы можем „предсказать“ ее состояние лишь в прошедшие моменты времени. Об ее состоянии в последующие (будущие) моменты времени мы ничего не можем сказать. Назовем эти гипотетические частицы антипричинными в отличие от обычных, причинных частиц.

Для того чтобы выяснить, какими свойствами могут обладать антипричинные частицы, рассмотрим изменение знака одной из обычных пространственных координат, например координаты x . Очевидно, что в новой системе координат соответствующая сопряженная компонента импульса частицы p_x также изменит свой знак. Если теперь перейти к антипричинным частицам, то они могут быть получены из обычных частиц изменением знака времени. Поэтому естественно предположить, что у этих частиц „сопряженная“ времени величина — энергия также меняет знак. Таким образом, мы можем высказать предположение, что *частицы, которые находятся в состояниях с отрицательной энергией, должны вести себя как антипричинные частицы.*

Состояния с отрицательной энергией появились в физике одновременно с уравнением Дирака.

Тогда же было указано, что частицы с отрицательной энергией должны обладать внутренне противоречивыми свойствами (при этом предполагалось, что частицы с отрицательной энергией являются обычными причинными частицами). Здесь можно указать два основных факта, которые вытекают из того, что частица может иметь сколь угодно большую (по абсолютной величине) отрицательную энергию. Во-первых, частица с отрицательной энергией, проходя через вещество, должна ускорять частицы с положительной энергией. В результате этого энергия пролетающей через вещество частицы будет, как обычно, уменьшаться, но сама она при этом ускоряется. Таким образом, частицы с положительной и отрицательной энергией ускоряют друг друга, причем процесс этот ничем не ограничен. Второе противоречивое свойство частиц с отрицательной энергией заключается в том, что если частицы могут иметь как положительные, так и отрицательные значения энергии, то постепенно, в результате спонтанных (или иных) переходов, все частицы будут иметь отрицательную энергию, „проваливаясь“ все глубже в бесконечно глубокий „подвал“.

Все эти трудности были устранены посредством теории дырок, открытие позитрона, предсказанного этой теорией, явилось истинным триумфом теоретической физики.

¹ При этом они исходили скорее из методологических и философских предположений, а не из соображений симметрии.

Однако и в теории дырок имелись свои трудности, которые и до настоящего времени полностью не устранены. Во-первых, само представление о бесконечном заполненном фоне электронов с отрицательной энергией, апеллирует к наглядности там, где уже ни о какой наглядности не может быть и речи. Очевидно, что такое представление не должно содержаться во внутренней последовательной теории. Действительно, в последующих вариантах теории позитронов, электроны и позитроны описываются симметричным образом и трудности, связанные с бесконечным фоном, таким образом, устраняются. Однако остается другая трудность, которая связана с тем, что эти частицы описываются хотя и симметричным образом, но все же *по-разному*. Это приводит к необходимости разделять при решении уравнения Дирака волновую функцию на части соответствующие положительной и отрицательной энергии (положительно и отрицательно частотные части). Между тем при наличии внешнего поля это разделение нельзя провести релятивистски-инвариантным образом. Приходится поэтому исходить из уравнения Дирака для свободной частицы, а взаимодействие с полем вводить по методам теории возмущений. В результате, теория возмущений перестает быть только вычислительным приемом, а приобретает совершенно не соответствующее ее содержанию значение фундамента для построения более сложных теорий.

Рассмотрим теперь, как будет двигаться электрон с отрицательной энергией и как его движение связано с движением позитрона. При этом мы оставим на время в стороне те трудности, которые возникают при рассмотрении электрона с отрицательной энергией в течение неограниченного отрезка времени — трудности, которые были уже отмечены выше.

Используя уравнение Дирака, легко получить, и это неоднократно отмечалось [2], [3], что электрон с отрицательной энергией движется точно так же, как позитрон, если только рассматривать его движение *обратно во времени*. Это значит, что при движении в любом внешнем поле траектории¹ электрона с отрицательной энергией и позитрона могут в точности совпадать; совпадать по величине будет также и скорость в каждой точке траектории, однако движение обеих частиц по траекториям будет происходить в противоположных направлениях. Отсюда следует, что с помощью эксперимента отличить позитрон от электрона с отрицательной энергией далеко не так просто. Обычно позитрон регистрируется с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле. Но в камере регистрируется только траектория частицы. В каком направлении двигалась частица по траектории, неизвестно. Направление определяется обычно по густоте трека, но при этом исходят из предположения, что частица, двигаясь в веществе, замедляется. Электрон же с отрицательной энергией ускоряется, проходя через вещество, и поэтому отличить его от позитрона на основании этого признака невозможно.

Рождение и аннигиляция пары с этой точки зрения может быть истолковано, соответственно, как переход электрона из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией и, наоборот, из состояния с положительной в состояние с отрицательной энергией. При этом все вычисления, относящиеся к вероятности рож-

¹ Имеется в виду, конечно, траектория волнового пакета, например, в случае, когда можно пренебречь его расплыванием.

дения и аннигиляции пар остаются полностью в силе, так как в этих вычислениях теория дырок не используется.

Таким образом, подавляющее большинство опытов с позитронами может быть истолковано как с причинной, так и с антипричинной точек зрения.

Это однако не означает, что электрон с отрицательной энергией и позитрон вовсе неразличимы. Если в камере Вильсона зарегистрирована „вилка“, т. е. рождение пары, то с обычной точки зрения γ -квант порождает пару: электрон-позитрон, которые летят из вершины вилки. С излагаемой здесь точки зрения, электрон с отрицательной энергией летит в вилку; в вершине ее поглощает γ -квант и, изменив направление, вылетает с положительной энергией по другой ветви вилки. Очевидно, что различить обе точки зрения можно, если только проследить процесс во времени.

Рассмотрим теперь следствия, которые вытекают из того, что электрон с отрицательной энергией есть антипричинная частица. Главное следствие будет заключаться в том, что если в точке A имеется причина, порождающая электрон с отрицательной энергией (вершина вилки), а в точке B — следствие, например, счетчик, регистрирующий эти электроны, то электрон с отрицательной энергией будет зарегистрирован в счетчике до того, как произошло событие — причина в точке A (рождение пары). Иначе говоря, частица будет двигаться из счетчика B , в котором она зарегистрирована, в точку A , в которой лежит причина ее образования.

Используя свойство антипричинности, мы можем объяснить те противоречия, которые возникают, когда мы рассматриваем электрон с отрицательной энергией как обычную причинную частицу. Действительно, как объяснить тот факт, что электрон с положительной энергией не испускает γ -квантов и не переходит в состояние с отрицательной энергией? Когда мы рассматриваем какую-либо обычную частицу, то мы всегда молчаливо подразумеваем, что где-то в прошлом имеется причина, в результате которой эта частица образовалась и появилась в данной области пространства. Когда речь идет об антипричинных частицах, то их можно рассматривать только в том случае, если где-то в будущем имеется источник этих частиц. Точно так же, как траектория электрона должна где-то начаться, траектория антипричинной частицы должна где-то кончиться. Отсюда следует, что если источник электронов с отрицательной энергией отсутствует, то переход электрона в состояние с отрицательной энергией невозможен. Это же самое рассуждение объясняет и второй парадокс.

При таком толковании, при решении уравнения Дирака, электроны с положительной и с отрицательной энергией рассматриваются одинаковым образом. Вследствие этого при наличии поля можно полностью сохранить релятивистскую инвариантность. Разделение состояний с положительной и отрицательной энергией происходит только в момент измерения. Однако измерительный прибор всегда связан с определенной координатной системой и поэтому требование релятивистской инвариантности здесь не нужно.

Все сказанное дает нам возможность объяснить, почему в природе является выделенным одно направление времени. Это связано с тем, что в окружающем нас мире преобладают частицы с положительной энергией. Если в некоторой области преобладали бы частицы с отрицательной энергией, то все явления природы развивались бы там в обратном направлении — эта область была бы антипричинной. Совместное

длительное существование частиц с отрицательной и положительной энергией невозможно—такая система является неустойчивой.¹ Области вселенной, заполненные преимущественно частицами с положительной и отрицательной массой, должны были неизбежно разделиться, и в каждой из них направление причинности однозначно выделилось.

Антипричинные частицы можно было бы обнаружить, если бы, например, солнце испускало их во время хромосферных вспышек, всплесков радиоизлучения или других кратковременных процессов. Обычно в земной атмосфере наблюдаются различные явления не раньше, чем через 8 мин.² после начала вспышки. Антипричинные частицы могли бы привести к возмущениям в земной атмосфере не позднее, чем за 8 мин. до начала той же вспышки.

Такая парадоксальная возможность навряд ли когда-либо исследовалась.

Перейдем теперь к тем фактам и соображениям, которые можно выдвинуть против изложенной здесь гипотезы.

Во-первых, в настоящее время существуют эксперименты, в которых, хотя и непрямым путем, установлено, что позитрон является причинной частицей. Это опыты по распаду ортопозитрония [4]. В качестве источника позитронов служил β^+ -радиоактивный Na^{22} . Практически одновременно с испусканием позитрона ядро испускает γ -квант, который регистрируется счетчиком, и, таким образом, момент рождения позитрона фиксируется. Далее позитрон образует вместе с электроном водородоподобную систему — ортопозитроний, которая может аннигилировать лишь с испусканием трех γ -квантов. Время жизни ортопозитрония довольно велико—порядка 10^{-7} сек.

Сравнивая время рождения позитрона и время регистрации другими счетчиками тройки γ -квантов, можно экспериментально установить время жизни ортопозитрония. Опыт подтвердил предсказания теории. Если же считать, что позитрон — это электрон с отрицательной энергией, то тройка γ -квантов должна быть зарегистрирована *раньше*, чем рождение позитрона при радиоактивном распаде, чего на самом деле не наблюдалось. Отсюда можно сделать вывод, что позитроны не являются антипричинными частицами.

Интересно отметить, что опыты, которые позволяют сделать этот вывод, проведены лишь сравнительно недавно.

Далее, большое число опытов по схеме запаздывающих совпадений было произведено с μ^\pm -мезонами, которые тоже, не обладают свойством антипричинности. Конечно, установление того, что та или иная частица не является антипричинной, еще не доказывает, что таких частиц вовсе не существует. Однако из приведенных здесь рассуждений видно, что именно у позитрона или у μ -мезонов, которые, по видимому, тоже подчиняются уравнению Дирака, можно было бы прежде всего обнаружить эти свойства.

Точно также можно предположить, что антипричинной частицей является нейтрино с отрицательной энергией или антипротон. Прямая экспериментальная проверка этих предположений пока невозможна.³

¹ Отметим, что если бы существовали небесные тела с отрицательной массой, то они отталкивались бы от тел с положительной массой гравитационными силами и не могли существовать совместно.

² Время, за которое свет проходит расстояние от земли до солнца.

³ В настоящее время показано, что антипротон также является причинной частицей. Отметим еще, что если помимо симметрии во времени требовать выполнения зарядовой симметрии, то необходимо предположить, что существует четыре сорта заряженных частиц, имеющих всевозможные комбинации знаков заряда и энергии.

Отметим далее, что изложенная здесь точка зрения на позитрон должна была бы иметь далеко идущие последствия для квантовой электродинамики, так как одной из основ этой теории является обычная теория позитрона.

В частности, реальные или виртуальные процессы, изображаемые замкнутой электронной петлей, не могли бы существовать. Однако подробно рассматривать квантовую электродинамику с этой точки зрения стоит лишь в том случае, если появятся какие-либо дополнительные соображения в пользу существования антипричинных частиц.

Наконец, весьма важным является вопрос о том, возможно ли вообще внутренне непротиворечивое совместное существование причинных и антипричинных частиц.

Например, в рамках наших классических представлений сосуществование их явно противоречиво. Действительно, если мы имеем источник антипричинных частиц A и регистрирующий их прибор B , то зарегистрировав антипричинную частицу в B , мы можем поставить, например, перегородку между A и B еще до того, как эта частица вылетела из A . Остается открытым вопрос, можно ли, переходя к квантовой механике, привести какие-то соображения, вроде, скажем, соотношения неопределенностей, которые исключали бы возможность таких внутренне противоречивых действий.

Подводя итоги всему изложенному, можно сказать, что гипотеза о существовании антипричинных частиц, безусловно является недостаточно обоснованной.

Возможно, что эта гипотеза содержит даже внутренние противоречия. Однако, анализ этих противоречий и выяснение их природы может указать на то, какие ограничения следует наложить на любую будущую физическую теорию.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Фок. ЖЭТФ, 18, 741, 1948.
2. Г. Зисман. ЖЭТФ, 10, 1163, 1937.
3. R. Feynman. Phys. Rev., 76, 749, 1949.
4. M. Deutsch. Phys. Rev., 82, 455, 1951.

Статья поступила в редакцию 27 VI 1956 г.