

Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена (ЭПР-парадокс) — попытка указания на неполноту [квантовой механики](#) с помощью [мысленного эксперимента](#), заключающегося в измерении параметров микрообъекта косвенным образом, не оказывая на этот объект непосредственного воздействия. Целью такого косвенного измерения является попытка извлечь больше информации о состоянии микрообъекта, чем даёт квантовомеханическое описание его состояния.

Изначально споры вокруг парадокса носили скорее философский характер, связанный с тем, что следует считать элементами физической реальности — считать ли физической реальностью лишь результаты опытов и может ли Вселенная быть разложена на отдельно существующие «элементы реальности», так что каждый из этих элементов имеет своё математическое описание.

Содержание

- [1 Суть парадокса](#)
- [2 История вопроса](#)
- [3 «Критерий физической реальности» и понятие «полноты физической теории»](#)
- [4 Критика парадокса](#)
 - [4.1 Ответ Бора](#)
 - [4.2 Оптический вариант мысленного ЭПР-опыта, предложенный Бомом](#)
- [5 Предсказания квантовой механики для ЭПРБ — опыта](#)
- [6 Теорема Белла и ее экспериментальные проверки](#)
- [7 Возможность теорий скрытых параметров](#)
- [8 Многомировая интерпретация](#)
- [9 Примечания](#)
- [10 См. также](#)
- [11 Литература](#)
- [12 Ссылки](#)

Суть парадокса

Согласно [соотношению неопределённостей Гейзенберга](#), нет возможности измерить одновременно координату частицы и её [импульс](#). Предполагая, что причиной неопределённости является то, что производя измерение одной величины, вносится принципиально неустранимые возмущения в состояние и искажение значения другой величины, можно предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти.

Допустим, две одинаковые частицы *A* и *B* образовались в результате распада третьей частицы *C*. В этом случае, по [закону сохранения импульса](#), их суммарный импульс $\mathbf{P}_A + \mathbf{P}_B$ должен быть равен^[1] исходному импульсу третьей частицы \mathbf{P}_C , то есть, импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт возможность измерить импульс

одной частицы (A) и по закону сохранения импульса $P_B = P_C - P_A$ рассчитать импульс второй (B), не внося в её движение никаких возмущений. Теперь, измерив координату второй частицы, можно получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Исходя из этого можно заключить, что соотношение неопределённостей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными и должны быть в будущем уточнены.

Если законы квантовой механики всё же верны, то [измерение](#) импульса одной частицы равносильно измерению импульса второй частицы. Однако это создаёт впечатление мгновенного [воздействия](#) первой частицы на вторую в противоречии с [принципом причинности](#).

История вопроса

В [1927 году](#) на Пятом [Сольвеевском конгрессе](#) Эйнштейн решительно выступил против [«копенгагенской интерпретации»](#) [Макса Борна](#) и [Нильса Бора](#), трактующей математическую модель квантовой механики как существенно вероятностную. Он заявил, что сторонники этой интерпретации «из нужды делают добродетель», а вероятностный характер свидетельствует лишь о том, что наше знание физической сущности микропроцессов неполно^[2]. В [1935 году](#) Эйнштейн вместе с [Борисом Подольским](#) и [Натаном Розеном](#) написал статью «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?»^[3], в которой описал [мысленный эксперимент](#), который впоследствии был назван парадоксом Эйнштейна — Подольского — Розена.

После публикации этой статьи Нильс Бор опубликовал статью с тем же названием,^[4] в которой он высказал несколько аргументов за вероятностное описание квантовой механики и определённую аналогию между положениями квантовой механики и эйнштейновской [Общей теорией относительности](#). Так зародился спор Бора — Эйнштейна о физическом смысле волновой функции.

[Бом](#) в [1951 году](#) рассмотрел возможность провести эксперимент (технически тогда еще не осуществимый), т. н. оптический вариант ЭПР-опыта, который смог бы разрешить спор Эйнштейна-Бора.

В [1964 году](#)^[5] [Белл](#) ввёл математический формализм, использующий [дополнительные параметры](#), которые могли бы объяснить вероятностную природу квантовых явлений. По замыслу, полученные им неравенства должны были показать, может ли введение дополнительных параметров сделать описание квантовой механики не вероятностным, а детерминированным — в случае нарушения неравенств Белла такое детерминистическое описание с использованием дополнительных параметров невозможно. Таким образом, становилось возможным в эксперименте получить определённую величину, описывающую корреляции между удалёнными измерениями, и на ее основе сказать, имеет ли смысл описывать квантовые явления вероятностно или детерминировано.

Результаты экспериментов, проведённых в [1972 году](#) [Стюартом Дж. Фридманом](#) и [Джоном Ф. Клаузером](#)^[6] в [Калифорнийском университете](#) в Беркли, согласовывались с квантовой механикой, и было зафиксировано нарушение [неравенств Белла](#).

Затем в [Гарвардском университете](#) [Р.А. Хольт](#) и [Ф.М. Пипкин](#)^[7] получили результат, расходящийся с квантовой механикой, но удовлетворяющий неравенствам Белла.

В [1976 году](#) в Хьюстоне [Эдвард С. Фрай](#) и [Рэднелл. С. Томпсон](#)^[8] изготовили гораздо более совершенный источник коррелированных фотонов, и их результат совпал с предсказаниями квантовой механики. Они установили отклонение от неравенств Белла.

Все эти эксперименты выполнялись с одноканальными поляризаторами, и отличались лишь источниками коррелированных фотонов и их получением. При такой упрощенной экспериментальной схеме используются поляризаторы, пропускающие свет, поляризованный параллельно a (или b), но не пропускающий свет в ортогональном направлении. Поэтому можно получить только часть величин, нужных для вычисления корреляции между удаленными измерениями.

Для улучшения точности экспериментов было необходимо иметь стабильный и хорошо управляемый источник запутанных фотонов и использовать двухканальный поляризатор. В 1982—1985 гг. [Алан Аспе](#), используя соответствующее оборудование, поставил серию более сложных экспериментов, результаты которых также совпали с предсказаниями квантовой механики и продемонстрировали отклонение от неравенств Белла.

Постановка экспериментов и проверка деталей идут до сих пор, и по мнению А. Аспе, в конечном счёте должны привести к окончательному эксперименту, не оставляющему никаких «дыр»^[9]. Но пока такой эксперимент так и не был осуществлён, и приверженцы [теории скрытых параметров](#) указывают на всё новые детали и возможности для построения полной квантово-механической теории. Пока ясно только то, что самые простые виды [теорий скрытых параметров](#) не соответствуют действительности, а более сложные ещё не построены.

«Критерий физической реальности» и понятие «полноты физической теории»



[Альберт Эйнштейн](#) и [Нильс Бор](#)

Для того, чтобы наиболее точно и формально высказать, в чем квантовая механика неполна, Эйнштейн, Подольский, Розен в своей статье формулируют «критерий физической реальности»:

«*Если мы можем, при отсутствии возмущения системы, предсказать с*»

достоверностью (то есть вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине.

А также указывают, что они понимают под «полнотой физической теории»:

« Для суждения об успехе физической теории мы можем задать себе два вопроса: 1) Правильна ли теория? и 2) Является ли даваемое теорией описание полным? Только в том случае, если на оба эти вопроса можно дать положительные ответы, концепции теории могут быть признаны удовлетворительными. Первый вопрос — о правильности теории — решается в зависимости от степени согласия между выводами теории и человеческим опытом. Этот опыт, который только и позволяет нам делать заключения о действительности, в физике принимает форму эксперимента и измерения. Мы хотим рассмотреть здесь, имея в виду квантовую механику, второй вопрос ... от всякой полной теории нужно, как нам кажется, требовать следующее: каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории. Мы будем называть это условием полноты. »

После чего авторы отмечают известный факт из квантовой механики:

« ... для частицы в состоянии ψ определенного значения координаты предсказать нельзя, а его можно получить только путем непосредственного измерения. Такое измерение вызовет возмущение частицы и, таким образом, изменит ее состояние. После того как координата будет определена, частица уже не будет больше находиться в прежнем состоянии. Обычно в квантовой механике из этого делается следующий вывод: если количество движения частицы известно, то ее координата не имеет физической реальности. »

И отсюда делается закономерный вывод: «квантовомеханическое описание реальности посредством [волновой функции](#) не полно». Затем рассматривается случай [зацепленных состояний](#) и авторы приходят к выводу, что «две физические величины с коммутирующими операторами могут быть реальными одновременно». А это означает, что их можно было бы измерить одновременно, что противоречит [неопределенности Гейзенберга](#). Аналогично и в случае когда имеется квантовомеханическое описание реальности посредством [матрицы плотности](#) — не полно.

Критика парадокса

Ответ Бора

Ответ Бора начинается с заявления:

« Квантовая механика в пределах своей области применимости представляется вполне рациональным описанием тех физических явлений, с которыми мы встречаемся при изучении атомных процессов ... аргументация в парадоксе ЭПР едва ли годится для того, чтобы подорвать надежность квантовомеханического описания, основанного на стройной »

математической теории, которая охватывает все случаи измерения.

и далее Бор достаточно подробно рассматривает ряд измерений в экспериментах. Он отрицает, что можно говорить о какой-либо неполноте квантовомеханического описания. А вероятностные измерения связаны с невозможностью контролировать обратное действие объекта на измерительный прибор (то есть учёт переноса количества движения в случае измерения положения и учёт смещения в случае измерения количества движения). После чего рассматривает различные способы устранения такого влияния и приходит к выводу:

«*Невозможность более подробного анализа взаимодействий, происходящих между частицей и измерительным прибором ... представляет существенное свойство всякой постановки эксперимента, пригодной для изучения явлений рассматриваемого типа, в которых мы сталкиваемся с своеобразной чертой индивидуальности, совершенно чуждой классической физике.*»

Здесь мы можем заметить, что Бор по сути возражает как бы на вопрос «*Правильна ли теория?*». Да, она правильна и результаты опыта это подтверждают. Эйнштейн и соавторы же делают акцент на вопросе «*Является ли даваемое теорией описание полным?*», то есть может ли быть найдено более удовлетворительное математическое описание, которое соответствовало бы физической реальности, а не проводимым нами измерениями. Бор же стоит на позиции, что физическая реальность есть то, что дает физическое измерение в эксперименте. Эйнштейн же, по видимому, допускает, что физическая реальность может отличаться от того, что нам дано в опыте, лишь бы математическое описание позволяло бы сделать прогноз с достоверностью (то есть вероятностью, равной единице) значения некоторой физической величины.

Поэтому [Фок](#) замечает, что Эйнштейн и Бор просто вкладывают разный смысл в некоторые термины, и вся аргументация с той и другой стороны подчинена изначальной позиции, которую выбрал для себя оппонент:

«*Эйнштейн понимает слово «состояние» в том смысле, какой ему обычно приписывается в классической физике, то есть в смысле чего-то вполне объективного и совершенно независящего от каких бы то ни было сведений о нем. Отсюда и проистекают все парадоксы. Квантовая механика действительно занимается изучением объективных свойств природы в том смысле, что ее законы продиктованы самой природой, а не человеческой фантазией. Но к числу объективных понятий не принадлежит понятие о состоянии в квантовом смысле. В квантовой механике понятие о состоянии сливается с понятием «сведения о состоянии, получаемые в результате определенного максимально-точного опыта». В ней волновая функция описывает не состояние в обыкновенном смысле, а скорее эти «сведения о состоянии».* ^[10]

Таким образом, данный спор, содержит в своей основе решение вопросов о достаточности и необходимости тех или иных [аксиом](#), и исходящим из этого [философском понимании физической реальности](#) (природы) и о том, какое [описание](#) физических [теорий](#) может удовлетворить исследователя. И в решении данного вопроса отчетливо видна важная связь [философии-физики](#)^[11].

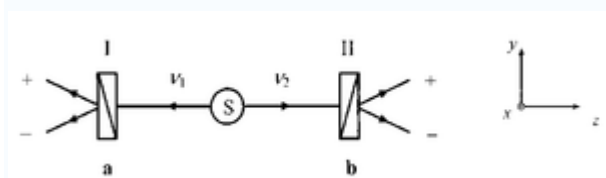
Оптический вариант мысленного ЭПР-опыта, предложенный Бомом

[Бом](#) в 1951 году в последней главе своей книги [\[12\]](#) отмечает, что в *критерии физической реальности*, данном в ЭПР-парадоксе, неявно присутствуют два предположения:

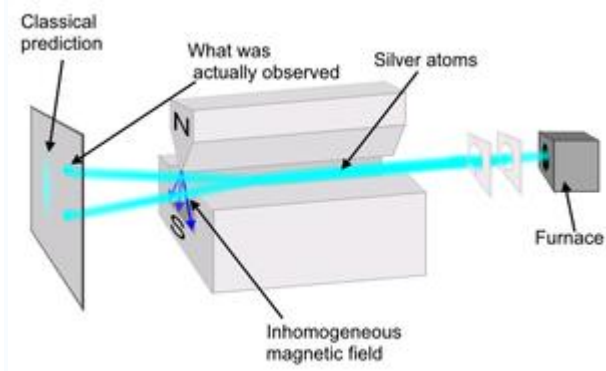
1. Вселенная может быть правильно разложена на различные и отдельно существующие «элементы реальности»;
2. каждый из этих элементов может быть представлен точно определенной математической величиной.

Дальше Бом отмечает, что если искать доказательства концепции изложенной в ЭПР-парадоксе, то это должно привести к поискам более полной теории, выраженной, например, в виде [теории скрытых параметров](#).

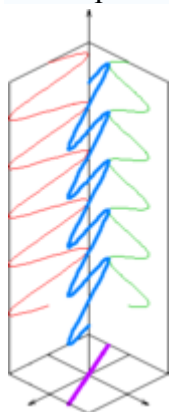
Важным вкладом Боба в решение этого парадокса считают, то что он используя два фильтра Штерна-Герлаха (оптическим аналогом является [поляризатор](#), который использовался в реальных опытах), который был использован в [опыте Штерна — Герлаха](#), предложил реальный физический эксперимент, который позволил бы в частном виде реализовать [мысленный ЭПР-эксперимент](#). Но в то время это было невозможно технически, хотя позже такие эксперименты были сделаны многократно (наиболее известны эксперименты Алана Аспе). Таким образом, стала возможной некоторая постановка опыта, для проверки философских позиций Эйнштейн versus Бор.



Мысленный эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена-Боба с фотонами. Два фотона v_1 и v_2 , испущенные в зацепленном состоянии, анализируются линейными поляризаторами с ориентациями a и b . Можно измерять вероятности одиночной или совместной регистрации на выходе каналов поляризаторов



Фильтр Штерна — Герлаха (поляризатор)



Линейная поляризация Линейная поляризация

Суть опыта состоит в следующем: источник S испускает два фотона в зацепленных состояниях, которые можно описать уравнением

$$|\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x, x\rangle + |y, y\rangle)$$

Эти фотоны распространяются в противоположных направлениях вдоль оси Oz, а зацеплены по осям Ox и Oy. Исследователь может измерить одну из компонент (x, y или z) спина первого фотона, но не больше чем одну за опыт. Например, для частицы 1 сделаем измерение по оси Ox и получим таким образом компоненту x.

Но можно использовать тот факт, что зацепленное состояние не может быть преобразовано в произведение двух состояний, ассоциированных с состоянием каждого из фотонов. Например, в этом эксперименте нельзя приписать каждому из них определенную поляризацию. Такое состояние описывает систему объектов целиком.

И тогда, благодаря зацепленности, при измерении спина (момента вращения) второго фотона должно получаться противоположное значение для компоненты y. То есть будет получено косвенное измерение второй частицы, как это и было описано в мысленном ЭПР — эксперименте. И если бы это было справедливо для всех измерений (при различных процессах, и при произвольных углах ориентации поляризаторов), то это противоречило бы утверждению неопределенности Гейзенберга, что нельзя измерить достоверно две величины одной частицы.

Еще одним важным предложением Боба стало то, что исследователь может переориентировать аппаратуру в произвольном направлении пока частицы еще разлетаются и таким образом получить определенное значение спина в любом выбранном им направлении. Поскольку эта переориентация выполняется без возмущения второй частицы, то, приняв критерий физической реальности Эйнштейна, можно определить, получается ли результат измерения лишь в момент самого измерения (что соответствует положению квантовой механики) или же он уже предопределен до измерения, и, если бы были известны скрытые параметры, то стало бы возможно это определить достоверно, с вероятностью 1.

Объясняя же возможные последствия подтверждения квантового описания в таком эксперименте Бом пишет:

« ... математическое описание, даваемое волновой функцией, не находится в однозначном соответствии с действительным поведением материи ... квантовая теория не предполагает, что Вселенная построена по определенному математическому плану ... Наоборот, мы должны прийти к точке зрения, что волновая функция — это абстракция, дающая математическое отражение определенных сторон реальности, но не однозначная карта ее. Кроме того, современная форма квантовой теории указывает на то, что вселенную нельзя привести в однозначное соответствие ни с каким мыслимым видом точно определенных математических величин и что полная теория всегда потребует понятий более общих, чем понятие разложения на точно определенные элементы. »

Таким образом, Бом явным образом указывает, что квантовая механика является неполной теорией в том смысле, что не может сопоставить *каждому элементу реальности*

определенную математическую величину. В то время как Вселенная по его мнению, может быть разложена на различные и отдельно существующие «элементы реальности».

Предсказания квантовой механики для ЭПРБ — опыта

Для одиночных отклонений фотонов в ту или другую сторону квантовая механика предсказывает вероятности $P_{\pm}(a)$ (для фотона ν_1) и вероятности $P_{\pm}(b)$ (для фотона ν_2):

$$P_{+}(a) = P_{-}(a) = \frac{1}{2}$$

$$P_{+}(b) = P_{-}(b) = \frac{1}{2}$$

Именно этот результат позволяет говорить, что мы не можем сопоставить определенную поляризацию каждому из фотонов, так как каждое отдельное измерение поляризации дает случайный результат (с вероятностью 1/2).

Для совместного обнаружения ν_1 и ν_2 в каналах + или – поляризаторов I или II с направлениями a и b квантовая механика предсказывает вероятности $P_{\pm\pm}(a, b)$:

$$P_{++}(a, b) = P_{--}(a, b) = \frac{1}{2} \cos^2(a, b)$$

$$P_{+-}(a, b) = P_{-+}(a, b) = \frac{1}{2} \sin^2(a, b),$$

где (a, b) — угол между поляризаторами I и II.

Рассмотрим теперь частный случай когда (a, b) = 0, то есть, когда поляризаторы параллельны. Подставив это значение в уравнения получим:

$$P_{++}(a, b) = P_{--}(a, b) = \frac{1}{2}$$

$$P_{+-}(a, b) = P_{-+}(a, b) = 0$$

Что означает, что если фотон ν_1 обнаружен в канале + поляризатора I, то фотон ν_2 наверняка будет обнаружен в канале + поляризатора II (и аналогично для каналов –). Таким образом, для параллельных каналов имеется полная корреляция между индивидуальными случайными результатами измерения поляризации двух фотонов ν_1 и ν_2 .

Удобной мерой корреляции между случайными числами является коэффициент корреляции:

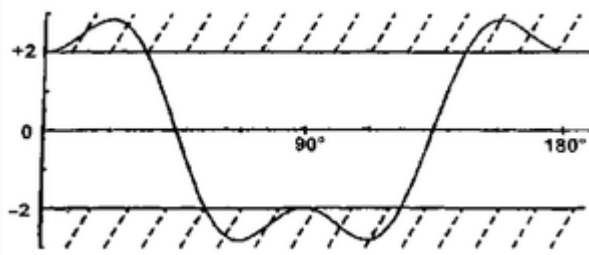
$$E(a, b) = P_{++}(a, b) - P_{+-}(a, b) - P_{-+}(a, b) + P_{--}(a, b).$$

Таким образом, квантово-механические расчеты исходят из предположения, что хотя каждое отдельное измерение дает случайные результаты, но эти случайные результаты коррелированы и в частном случае (для параллельных и перпендикулярных ориентаций поляризаторов) корреляция является полной ($|E(a, b)| = 1$).

Этот же факт дает основания для построения более полной [теории со скрытыми параметрами](#), но нужно учитывать, что простые ее виды уже проверены в ряде экспериментов, и их результаты указывают на то, что такие определенные виды таких теорий построить невозможно.

Теорема Белла и ее экспериментальные проверки

Основная статья: [Теорема Белла](#)



$S(a, a', b, b')$, предсказываемая квантовой механикой для зацепленных пар фотонов. Конфликт с неравенствами Белла возникает при $|S| > 2$

Оптический вариант мысленного ЭПР-опыта, предложенного Бомом, и [теорема Белла](#) решающим образом повлияли на дискуссии о возможности полноты квантовой механики. Речь больше не шла о философской позиции, а стало возможным разрешение вопроса с помощью эксперимента.

Если можно приготовить пары фотонов (или частиц со спином 1/2) в зацепленном состоянии и измерить четыре числа совпадений $N_{\pm\pm}(a, b)$ для детекторов на выходе измерительных каналов [поляризаторов](#) (или фильтров Штерна-Герлаха), то можно получить и поляризационный коэффициент корреляции для поляризаторов с ориентациями a и b :

$$E(a, b) = \frac{N_{++}(a, b) - N_{+-}(a, b) - N_{-+}(a, b) + N_{--}(a, b)}{N_{++}(a, b) + N_{+-}(a, b) + N_{-+}(a, b) + N_{--}(a, b)}$$

Выполнив четыре измерения этого типа с ориентациями (a, b) , (a, b') , (a', b) и (a', b') , мы получим измеренное значение $S(a, a', b, b') = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$, необходимое для подстановки в [неравенство Белла](#), которое имеет вид $-2 \leq S(a, a', b, b') \leq 2$.

Выбрав ситуацию, при которой квантовая механика предсказывает, что эта величина не удовлетворяет неравенствам Белла (например, это максимально проявляется при углах $(a, b) = \pm \frac{\pi}{8} = 22,5^\circ$ и $(a, b) = \pm \frac{3\pi}{8} = 67,5^\circ$, значение $S(a, a', b, b') = |2\sqrt{2}| \approx \pm 2,8284$), мы получаем экспериментальный критерий,

позволяющий выбрать между квантовой механикой и некоторой локальной теорией со скрытыми параметрами.

Так, например, в наилучшем по качеству (с двухканальными [поляризаторами](#)) эксперименту А. Аспе ^[13] для максимально конфликтного предсказания было получено значение $S(a, a', b, b') = 2,70 \pm 0,05$, что хорошо согласуется с предсказаниями квантовой механики, но нарушает неравенства Белла.

Возможность теорий скрытых параметров

Основная статья: [Теория скрытых параметров](#)

Как указано выше, Бом не анализирует другой возможный вариант, что Вселенная *не может* быть разложена на отдельно существующие «элементы реальности», что вполне согласуется с современными представлениями о структуре физического [вакуума](#). И именно с этих позиций остается возможным построение [теории скрытых параметров](#), которая будет полной в том смысле, что сможет сопоставить *каждому элементу реальности* определенную математическую величину, но эта величина будет связью между элементами, а не самим элементом.

Как было отмечено ^[14], требования к квантовым наблюдаемым величинам должны соответствовать в теории скрытых параметров случайным величинам, с сохранением определенных функциональных соотношений. А также квантовые состояния можно рассматривать как редукцию классической модели с надлежащим образом подобранными ограничениями на множество измерений.

Другую интерпретацию, другой способ построения теории скрытых параметров, формулируют как концепцию *внутреннего времени*, согласно которой

«*физическое время не есть абстрактный и равномерный поток "чего-то", во что мы "помещаем" элементарные события. Время (точнее, пространство-время) само состоит из этих событий, измеряется их количеством и ничем иным. Можно сказать, что время дискретно, поскольку дискретны элементарные события.*» ^{[15][16]}»

Таким образом можно выделить две группы теорий скрытых параметров — одна предполагает ненаблюдаемую материю за пределами трех пространственных измерений, увеличивая число измерений физического мира, как это сделано в [теории струн](#), вторая группа указывает на то, что время по сути является достаточным дополнительным измерением, которое при неравномерности его течения может приводить к квантовым эффектам. Также возможна комбинация данных теорий, где предполагается особая структура вакуума, элементы которой и создают неравномерность течения времени, вследствие чего измерения, производимые наблюдателем, приводят к квантовым эффектам.

Следует отметить, что подобные теории, возможно лишь за исключением [теории струн](#), как правило не рассматриваются академическим направлением исследователей, так как не имеют ни строго математической основы, ни тем более экспериментальных подтверждений, которые поставить в данный момент нельзя из-за недостаточной точности техники. Но некоторые из них не являются и опровергнутыми в данный момент.

Многомировая интерпретация

Основная статья: [Многомировая интерпретация](#)

Наглядную трактовку парадокса даёт [многомировая интерпретация](#). Состояние частиц *A* и *B* после распада частицы *C* представляет собой [квантовую суперпозицию](#) всевозможных состояний, отличающихся различными значениями импульса частицы *A*. Согласно [Девитту](#), это можно интерпретировать как суперпозицию состояний одинаковых не взаимодействующих между собой параллельных [вселенных](#), каждая из которых содержит «альтернативную историю» распада частицы *C* и характеризуется своим значением импульса p_A . Пока не проведено измерение, невозможно установить, в какой именно из этих вселенных осуществляется эксперимент. В момент измерения происходит необратимое «расщепление вселенных», и история обеих частиц *A* и *B* с самого распада становится определённой. В рамках этой истории проведение измерения над частицей *A* не оказывает влияния на состояние частицы *B*, и противоречие с принципом причинности отсутствует.

Примечания

- ↑ С поправкой на изменение масс при распаде — суммарная масса частиц *A* и *B* может отличаться от массы частицы *C*.
- ↑ *Кузнецов Б. Г.* [Эйнштейн. Жизнь. Смерть. Бессмертие](#). — 5-е изд., перераб. и доп.. — М.: Наука, 1980. — С. 535-537.
- ↑ Einstein A, Podolsky B, Rosen N (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?". *Phys. Rev.* **47** (10): 777–780. DOI:[10.1103/PhysRev.47.777](#). (на англ.)
- ↑ Bohr N. (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?". *Phys. Rev.* **48** (8): 696-702. DOI:[10.1103/PhysRev.48.696](#). (на англ.)
- ↑ David Lindley (2005). "[What's Wrong with Quantum Mechanics?](#)". *Phys. Rev. Focus* **16** (10). (на англ.)
- ↑ S.J. Freedman and J.F. Clauser, Experimental test of local hidden-variable theories, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972)
- ↑ F.M. Pipkin, Atomic Physic Tests of the Basics Concepts in Quantum Mechanics (1978)
- ↑ E.S. Fry, R.C. Thompson, Experimental test of local hidden-variable theories, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 465 (1976)
- ↑ *Alain Aspect* [Теорема Белла: Наивный взгляд экспериментатора](#) = Bell's Theorem: The naive view of an experimentalist // *Springer*. — 2002.
- ↑ *А. Эйнштейн, Б. Подольский, В.А. Фок, Н. Бор, Н. Розен* [Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным?](#) // *УФН, том XVI, выпуск 4*. — 1935. — С. 436-457.
- ↑ ["Философские проблемы физики элементарных частиц \(тридцать лет спустя\)", под ред. Ю.Б.Молчанов, Российская академия наук, Институт философии, М., 1994](#)
- ↑ Бом Д. Квантовая теория, гл. 22, п.15
- ↑ A.Aspect, P.Grangier, About Resonant Scattering and Other Hypothetical Effects in the Orsay Atomic-Cascade Experiment Tests of Bell Inequalities, *Lett. Nuovo Cimento* **43**, 345 (1985)
- ↑ [Холево А. С., Вероятностные и статистические аспекты квантовой теории](#)
- ↑ [Куракин П.В., Скрытые параметры и скрытое время в квантовой теории, 2004](#)
- ↑ http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/kurakin_kontseptsia.pdf

См. также

- [Неравенства Белла](#)
- [Многомировая интерпретация](#)

- [Волновая функция](#)
- [Редукция фон Неймана](#)
- [Объективная редукция](#)
- [Квантовые измерения](#)
- [Квантовая телепортация](#)

Литература

- Бом Д. [Квантовая теория](#) = Quantum Theory // *New York: Prentice Hall. 1989 reprint, New York: Dover, ISBN 0-486-65969-0.* — 1951., стр. 700, гл. 12, п. 15
- *Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики.* — М.-Л.: ГИТТЛ, 1949.
- [Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. \(3-е изд.\) М.: Высшая школа, 1961.](#)

Ссылки

- [Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена](#) (рус.). [Virtual Laboratory Wiki](#). — *правообладатель базовой версии этой статьи*. Проверено 2009-26-06.
- [Действительность и мир квантов](#) (рус.) — глава из книги П. Дэвиса «Суперсила»
- [Статья в УФН «Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным?»](#) (рус.) Перевод на русский язык оригинальных работ Эйнштейна, Подольского, Розена и Бора; вступительная статья [В.А. Фока](#)
- [Куракин П. В., Скрытые параметры и скрытое время в квантовой теории, 2004](#)

Источник

«http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%81_%D0%AD%D0%B9%D0%BD%D1%88%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B0_%E2%80%94%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%E2%80%94%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D0%B0»

Категории: [Мысленные эксперименты](#) | [Квантовая механика](#) | [Философия физики](#)