

Р. ЧАО, П. КВАЙТ, Э. ШТЕЙНБЕРГ

БЫСТРЕЕ СВЕТА?*

Эксперименты в квантовой оптике показывают, что два события, произошедшие в разных местах, могут влиять друг на друга до того, как самый быстрый сигнал пройдет расстояние между ними.

При экспериментальном изучении квантовомеханических явлений фантазии часто оборачиваются реальностью. Недавний пример — изучение явления, называемого *нелокальностью* или *действием на расстоянии*, когда возникли сомнения в одном из самых фундаментальных принципов современной физики, а именно в утверждении, что ничто не может двигаться со скоростью большей, чем скорость света.

Кажущееся нарушение этого принципа возникает тогда, когда частица исчезает с одной стороны поставленного на ее пути барьера и практически мгновенно возникает на другой стороне. Здесь уместна ссылка на Льюиса Кэрролла. Когда Алиса шагнула сквозь зеркало, это было в определенном смысле действием на расстоянии или нелокальным событием: она прошла сквозь твердое тело без

всяких усилий и мгновенно. Поведение частицы столь же странно. Если попытаться вычислить ее среднюю скорость, обнаружится, что она превышает скорость света.

Может ли такое быть? Можно ли безнаказанно нарушить один из самых известных законов физики? Или что-то не так с квантовомеханическими представлениями? А может быть, дело в неправильном понимании того, что такое *скорость прохождения сквозь барьер*? Чтобы найти ответы на эти вопросы, мы и ряд других исследователей провели серию оптических экспериментов в поисках проявлений квантовой нелокальности. В частности, мы сосредоточили усилия на следующих трех демонстрациях нелокальных эффектов. В первом случае мы пускали наперегонки два фотона, одному из которых по дороге надо было пройти сквозь барьер. Во вто-

*Перевод А. В. Беркова (Scientific American, August, 1993).



ром опыте мы следили за тем, сколько времени длится такая гонка, и показали, что фотоны, двигавшиеся по двум разным путям, финишируют одновременно. Заключительный эксперимент показал, что синхронное поведение двух фотонов-близнецов взаимозависимо, даже если эти фотоны находятся на таком расстоянии друг от друга, что ни один сигнал не успевает пройти его.

Различия между локальностью и нелокальностью связаны с понятием траектории. Например, в классическом мире катящийся крокетный шар в любой момент времени имеет определенное положение в пространстве. Если с помощью мгновенной фотографии зафиксировать каждый момент движения шара, а потом собрать все картинки вместе, они образуют гладкую, без разрывов, линию или траекторию, соответствующую той реальной траектории, по которой крокетный шар двигался от молотка игрока до ворот. В каждой точке этой траектории крокетный шар обладает определенной скоростью, связанной с его кинетической энергией. Если шар катится по гладкой лужайке, он попадает в цель. Но если шар начинает катиться в горку, его кинетическая энергия превращается в потенциальную. В результате шар замедляет свое движение вплоть до остановки, а затем начинает скатываться назад. На физическом языке горка называется барьером, так как энергия шара недостаточна для того, чтобы на нее взобраться. С классической точки зре-

ния шар обязательно скатится назад. Аналогично, если у Алисы не хватило бы сил ударить по крокетному шару (свернувшемуся ежу у Кэрролла) так, чтобы он пробил кирпичную стену, то он обязательно отскочил бы назад.

Согласно квантовой механике подобное понятие траектории несостоятельно. Положение квантовомеханической частицы в пространстве не может быть описано, как в случае крокетного шара, математической точкой. Частица скорее похожа на расплывшийся волновой пакет. Этот пакет напоминает чем-то панцирь черепахи, так как он увеличивается до определенной высоты, если двигаться вдоль него, а затем опять уменьшается. Высота волны в каждой точке вдоль этого расстояния характеризует вероятность того, что частица находится именно в данной точке: чем выше волновой пакет в каком-то месте, тем охотнее частица там находится. Ширина пакета от переднего до заднего края определяет внутреннюю неопределенность местонахождения частицы. Однако, если частица регистрируется в какой-то точке, весь волновой пакет исчезает. Квантовая механика не говорит нам о том, где при этом была частица перед моментом регистрации (измерения).

Эта неопределенность положения приводит к одному из самых удивительных следствий законов квантовой механики. Если считать, что ежи подчиняются этим законам, тогда неопределенность положения дает им маленький, но вполне реальный

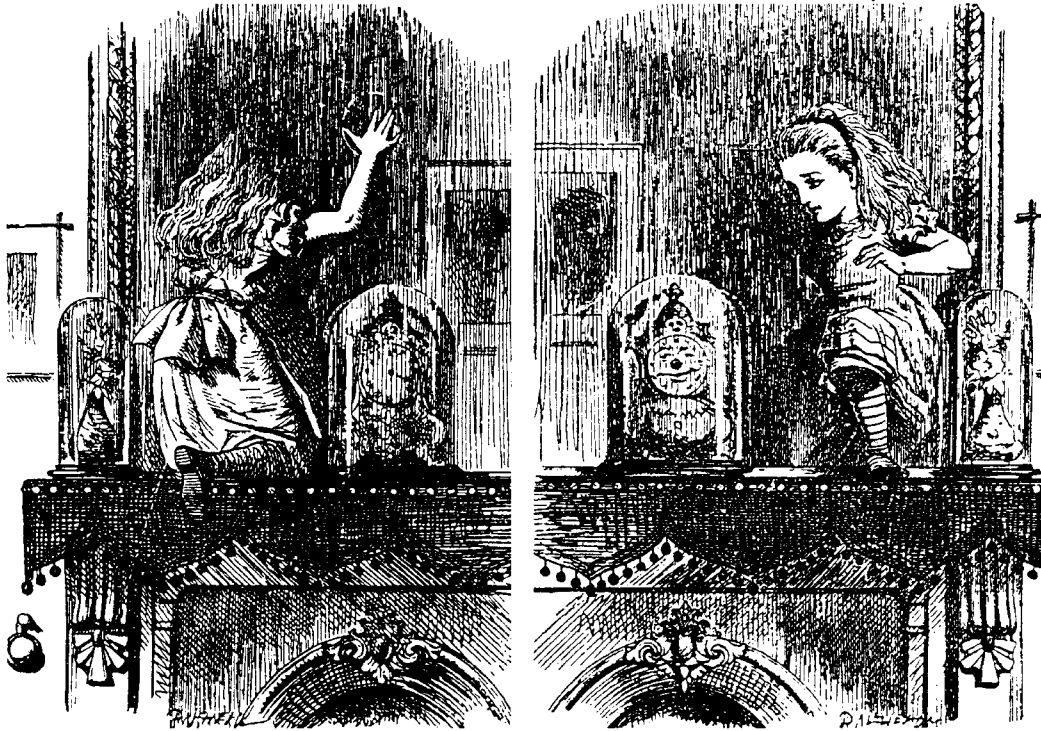


Рис. 1. «Туннелирующая» Алиса беспрепятственно проходит сквозь зеркало, как и многие фотоны в экспериментах по квантовой оптике. Хотя Льюис Кэрролл и не был физиком, создается впечатление, что он предвидел самую загадочную проблему физики XX века, касающуюся времени туннелирования, когда попросил Джона Тэнниэла нарисовать странное лицо на часах в зеркале

шанс оказаться с другой стороны стены. Такой процесс известен под названием *туннелирование* или *прохождение сквозь барьер*. Он играет очень важную роль в науке и технике. Например, явление туннелирования является ключевым в реакциях ядерного синтеза, в работе некоторых высокоскоростных электронных приборов, в микроскопах сверхвысокого разре-

шения. Это же явление лежит в основе некоторых космологических теорий.

Несмотря на название, туннелирование происходит так, что в любой момент времени барьер остается неповрежденным. На самом деле, если бы частица оказалась внутри барьера, ее кинетическая энергия была бы отрицательной. Как известно, скорость пропорциональна квадратному

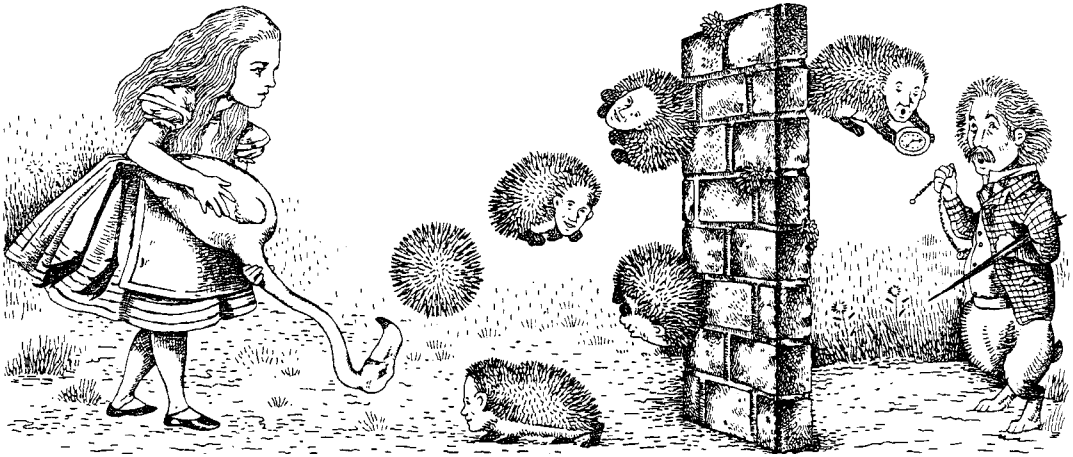


Рис. 2. Во время игры в зазеркальный крокет Алиса бьет по свернувшимся ежам, каждый из которых имеет загадочное лицо молодого Вернера Гейзенберга. Ежи летят к стенке. По классическим законам ежи должны всегда отскакивать назад после удара о стенку. Однако по квантовомеханическим законам имеется небольшая вероятность, что еж окажется по другую сторону барьера. Загадка, которую пытаются разрешить физики, занимающиеся квантовой теорией, заключается в следующем: сколько времени уходит на прохождение сквозь стену? Нарушается ли при этом знаменитый предел для скорости, устанавливаемый теорией относительности Эйнштейна?

корню из кинетической энергии, так что при туннелировании под барьером приходится для нахождения скорости извлекать корень из отрицательного числа. Поэтому невозможно приписать частице внутри барьера какую-то реальную скорость. Вот почему ежик, прошедший сквозь стену, глядит на часы, одолженные у Белого Кролика, с таким же удивленным выражением, которое сохраняется на лицах физиков с 1930-х гг. (рис. 2). Какое время показывают часы у ежа на лапке? Иными словами, сколько времени длится прохождение сквозь барьер?

В течение многих лет делались неоднократные попытки ответить на вопрос о времени туннелирования, но ни одна из этих попыток не была признана удовлетворительной. Недавно наша исследовательская группа осуществила эксперимент с участием, правда, не ежей, а фотонов, в котором удалось это время измерить.

Фотоны — это элементарные частицы, из которых состоит любой свет. Проводя измерения, мы использовали источник, одновременно испускавший всего два фотона. Каждый фотон летел затем к своему детектору. На пути одного из них помещался барьер.

ер, а второй летел беспрепятственно. Большую часть времени наблюдаемый первый фотон застревал внутри барьера и терялся, а регистрировался лишь его близнец, пролетающий свой путь без помех. Однако иногда первый фотон туннелировал сквозь барьер, так что оба достигали своих детекторов. В такой ситуации мы могли сравнить время прибытия фотонов и, следовательно, измерить, сколько времени длится процесс туннелирования.

Роль барьера играл всем знакомый оптический элемент — зеркало. Правда, это зеркало не похоже на обычное домашнее, сделанное на металлической основе и поглощающее до 15% падающего света. Лабораторные зеркала состоят из тонких чередующихся слоев прозрачного стекла двух разных сортов (с несколько отличающимися показателями преломления), в которых свет распространяется со слегка разной скоростью. Слои стекла действуют как периодические «скоростные ловушки». Взятый по отдельности, каждый слой всего лишь чуть-чуть уменьшает скорость света. Но когда эти слои расположены вместе в определенном порядке, они образуют область пространства, внутри которой свет практически не распространяется. Многослойная оболочка толщиной всего лишь 1 мкм, т. е. в одну сотую диаметра человеческого волоса, отражает 99% падающего света, состоящего из фотонов определенной, заранее рассчитанной для данного зеркала энергии (т. е. света, имеющего определенный цвет). Наш экспе-

римент был нацелен на ловлю оставшегося 1% фотонов, которому удалось пройти сквозь зеркало.

В течение нескольких дней наблюдений более одного миллиона фотонов один за другим туннелировали сквозь барьер. Мы сравнивали время прибытия этих фотонов и фотонов, летевших без помех со скоростью света.

Был получен удивительный результат: в среднем туннелировавшие фотоны достигали цели раньше тех, которые летели без помех, причем средняя скорость фотонов, прошедших сквозь барьер, оказалась в 1,7 раза больше скорости света. Этот результат кажется противоречащим классическому понятию причинности, так как согласно частной теории относительности Эйнштейна ни один сигнал не может распространяться со скоростью, большей скорости света в пустоте.

Более точное утверждение заключается в следующем. Если в какой-то определенный момент времени вы приняли решение начать обстрел зеркала фотонами и дали старт, а ваша помощница сидит наготове с другой стороны зеркала, то сколько времени должно пройти, прежде чем она узнает, что старт дан? На первый взгляд может показаться, что, поскольку фотоны туннелируют сквозь барьер со скоростью, превышающей скорость света, помощница могла бы увидеть свет раньше, чем ее достиг бы сигнал о том, что старт дан, который движется с теоретически максимальной скоростью. Это нарушило бы

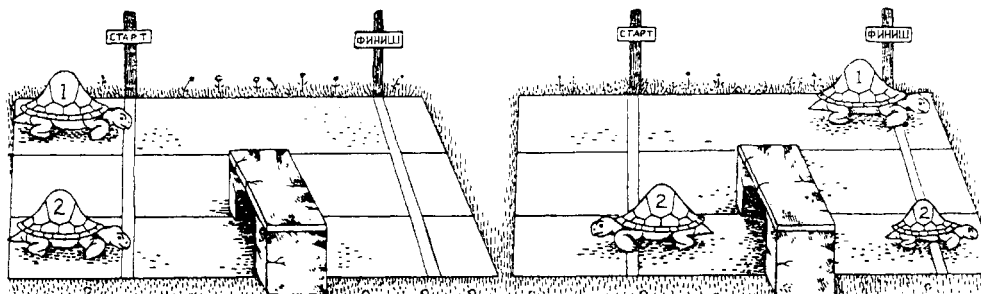


Рис. 3. Проблему, связанную со временем туннелирования, помогают понять черепахи бега. Панцирь черепахи изображает распределение вероятности местонахождения фотона. Горб соответствует тому месту, где фотон может быть зарегистрирован с максимальной вероятностью. Черепахи стартуют одновременно (рис. 3а). Черепаха 2 сталкивается с барьером и расщепляется на две (рис. 3б).

Так как вероятность туннелирования мала, прошедшая сквозь барьер черепаха меньше, чем отразившаяся, размеры которой почти не изменились. В этих редких случаях туннелирования горб панциря черепахи 2 в среднем пересекает финишную черту первым, что соответствует средней скорости туннелирования, в 1,7 раз большей скорости света. Однако нос туннелировавшей черепахи никогда не движется быстрее света, так что к финишу обе черепахи приходят «нос в нос». Таким образом, эйнштейновский закон не нарушается

причинность в эйнштейновском понимании.

Существует ли решение этого парадокса в рамках квантовой механики? Да, существует, хотя оно и лишает нас увлекательной возможности играть с причинами и следствиями. До сих пор мы говорили о скорости туннелирования фотонов в классическом смысле, как будто это была непосредственно наблюдаемая величина. Однако соотношение неопределенностей Гейзенберга утверждает, что это не так. Момент времени испускания фотона не может быть определен точно, а следовательно, невозможно точно определить его положение в про-

странстве и скорость. На самом деле положение фотона правильно описывается с помощью колоколообразного распределения вероятности, очень похожего на панцирь черепахи, причем ширина этого распределения соответствует неопределенности в положении фотона.

Понять суть дела поможет образное сравнение. В момент открытия ворот через них проходит нос каждой черепахи. Появление носа на линии ворот соответствует самому раннему моменту времени, когда появляется возможность наблюдать фотон. Никакой сигнал не может быть принят ранее, чем появится черепаший

нос. Но из-за неопределенности положения фотона в среднем он пересекает линию ворот с небольшой задержкой. Основная часть черепахи (та область, где фотон регистрируется с наибольшей вероятностью) проползает через ворота вслед за носом.

Для простоты обозначим распределение вероятности местонахождения фотона, распространяющегося без помех к детектору, как черепаха 1, а фотона, проходящего сквозь барьер, как черепаха 2 (см. рис. 3). Когда черепаха 2 достигает барьера, она расщепляется на две черепахи поменьше: одна из них отражается от барьера и начинает двигаться назад к старту, а другая проходит сквозь барьер. Эти две уменьшенные черепахи (черепашки) вместе определяют распределение вероятности местонахождения отдельного фотона. Когда фотон регистрируется в каком-то месте, его другая часть — черепашка — мгновенно исчезает. Отраженная черепашка больше, чем прошедшая сквозь барьер, просто потому, что шансы отразиться много больше, чем шансы пройти сквозь зеркало (напомним, что зеркало отражает фотон в 99% случаев).

Мы наблюдали, что горб панциря черепахи 2, соответствующий наиболее вероятному местонахождению туннелировавшего фотона, достигает финишной черты *до того*, как это происходит с горбом панциря черепахи 1. Но нос второй черепахи пересекает черту *не раньше*, чем нос первой! Так как черепашки носы движутся со ско-

ростью света, это означает, что фотон, сигнализирующий об открытии стартовых ворот, никогда не приходит к финишу раньше, чем это разрешено принципом причинности.

Однако в типичном эксперименте нос черепахи соответствует области с такой малой вероятностью обнаружения фотона, что он там почти не наблюдается. Местонахождение однократно регистрируемого фотона соответствует положению горба (там вероятность обнаружения максимальна). Таким образом, даже если черепахи пришли к финишу нос в нос, горб черепахи 2 предшествует горбу черепахи 1 (не забывайте, что прошедшая сквозь барьер черепашка меньше, чем черепаха 1). В результате наиболее вероятно, что фотон, прошедший сквозь барьер, появится на финише *раньше*, чем фотон, летевший без помех со скоростью света. Наш эксперимент подтвердил этот вывод.

Но мы не смогли поверить, что любая отдельно взятая часть волнового пакета может двигаться со скоростью, превышающей скорость света. По-видимому, волновой пакет меняет форму во время движения, пока возникший горб не сдвинется в переднюю часть панциря. Ни в одной точке волновой пакет туннелировавшего фотона не способен двигаться быстрее, чем волновой пакет фотона, движущегося без помех. В 1982 г. С. Чу и С. Вонг наблюдали аналогичный эффект изменения формы. Они проводили опыты с лазерными импульсами, состоявшими из множества фо-



тонов, и обнаружили, что несколько фотонов, проходивших через препятствие, добирались до финиша раньше, чем двигавшиеся свободно. Можно было бы предположить, что это было «разрешено» только первым несколькими фотонам каждого импульса, отвергнув, таким образом, идею изменения формы. Но в нашем случае такая интерпретация невозможна, поскольку в каждый момент времени мы изучали отдельный фотон. В момент детектирования весь фотон мгновенно, «прыжком», превращается в прошедшую сквозь барьер часть волнового пакета, обгоняя на финише своего близнеца чуть ли не вдвое.

Хотя изменение формы, похоже, согласуется с нашими наблюдениями, все же остается вопрос, почему это изменение формы должно происходить в первом случае. Никто еще не смог дать физического объяснения быстрого туннелирования. Этот вопрос занимал исследователей уже в 1930-х годах, когда ряд ученых, в том числе будущий лауреат Нобелевской премии Юджин Вигнер, заметили, что такие высокие скорости туннелирования, похоже, вытекают из принципов квантовой теории. Некоторые физики считали, что приближения, использованные при получении такого результата, неверны, другие, наоборот, полагали, что теория верна, но нужна более аккуратная интерпретация ее выводов. Хотя квантовая механика и берется предсказать среднее время прибытия частицы к финишу, она неспособна использовать классическое по-

нятие траектории, без которого становится туманным смысл промежутка времени, проведенного частицей в какой-то области пространства.

Один из ключей к разгадке феномена быстрого туннелирования скрыт в необычных характеристиках самого этого явления. Согласно теории, увеличение ширины барьера не влияет на время туннелирования волнового пакета. Это можно грубо понять на основе соотношения неопределенностей. Чем меньше времени мы тратим на измерение каких-то свойств фотона, тем более неопределенным будет значение его энергии. Даже если энергия фотона, летящего на барьер, недостаточна для его преодоления, с самого начала существует определенный короткий промежуток времени, когда энергия частицы точно не определена. В течение этого промежутка фотон временно как бы занимает в долг энергию, достаточную для преодоления барьера. При этом неважно, насколько широк барьер. Время прохождения сквозь него остается неизменным. Для достаточно широкого барьера кажущаяся скорость прохождения будет поэтому превышать скорость света.

Очевидно, чтобы наши измерения обрели смысл, черепахам надо пробегать строго одинаковые расстояния. Мы, по существу, должны были выпрямить беговые дорожки так, чтобы ни одна из черепах не имела форы за счет бега по внутренней дорожке. Тогда, если на одной из дорожек поместить барьер, всякое замедление

или ускорение можно приписать квантовому туннелированию. Один из способов сделать дорожки одинаковыми заключается в том, чтобы измерить время, необходимое фотону на путь от источника до детектора по каждой дорожке в отдельности. Если эти времена совпадут, мы будем знать, что пути также одинаковы.

Но для выполнения таких измерений с помощью обычного секундомера нам потребуются наблюдатели, чьи руки способны нажимать кнопку с частотой миллиард миллиардов раз в минуту. К счастью, Л. Мандель с коллегами из Рочестерского университета разработали интерференционную технику, способную измерить время полета фотонов.

Квантовый секундомер Манделя использует оптический элемент, называемый *расщепителем пучка* (рис. 4). Такое устройство пропускает половину падающих на него фотонов и отражает другую половину. Беговой трек устроен так, что два волновых пакета фотонов выпускаются одновременно и с разных сторон достигают расщепителя пучка. Для каждой пары фотонов имеются четыре возможности: оба фотона могут пройти через расщепитель каждый по своему пути; оба фотона могут отразиться от него и повернуть назад каждый по своему пути; оба могут вылететь вместе в одну сторону; оба могут вылететь вместе в другую сторону. Первые две возможности — оба фотона проходят через расщепитель или оба отражаются — приводят к регистра-

ции так называемых совпадений. Это означает, что каждый фотон достигает своего детектора (они помещены по разные стороны от расщепителя пучка) и оба детектора срабатывают с интервалом в одну миллиардную долю секунды, определяющимся скоростью срабатывания аппаратуры. К сожалению, это временное разрешение приблизительно совпадает с тем временем, которое фотоны тратят на свой путь, так что оно слишком велико, чтобы быть пригодным для измерений.

Так как же тогда расщепитель пучка и детекторы помогают отрегулировать длину беговых дорожек для фотонов? Мы просто меняем длину одного из путей, пока не *исчезнут* все совпадающие отсчеты. Этим мы добиваемся того, что фотоны достигают расщепителя одновременно, т. е. проходят одинаковые пути. На первый взгляд такой способ выглядит странно. Казалось бы, при равных путях фотоны обязательно придут на оба детектора одновременно, породив совпадающие сигналы. Почему же *отсутствие* таких событий есть желаемое свидетельство того, что фотоны прошли равные пути?

Причина заключается в характере взаимодействия квантовомеханических частиц. Все частицы в природе являются либо *бозонами*, либо *фермионами*. Тожественные фермионы (например, электроны) подчиняются принципу исключения Паули, запрещающему любым двум электронам находиться одновременно в од-

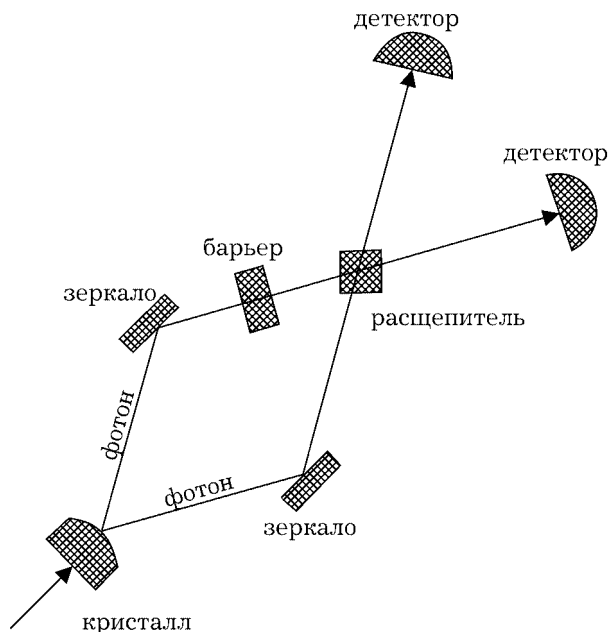


Рис. 4. Интерферометр для фотонов-близнецов точно хронометрирует время полета соревнующихся фотонов. Они рождаются в кристалле в результате конверсии с уменьшением частоты и с помощью зеркал направляются на расщепитель пучка

ном и том же месте. Наоборот, бозоны (к ним относятся и фотоны) предпочитают быть в коллективе. Поэтому, достигая одновременно расщепителя, оба фотона предпочитают лететь в одном направлении. Это приводит к уменьшению числа совпадений (в идеальном эксперименте — к полному их отсутствию) отсчетов в детекторах, расположенных по разные стороны от расщепителя, по сравнению с тем, если бы фотоны действовали независимо или подлетали к расщепителю в разные моменты времени.

Таким образом, чтобы быть уверенными, что фотоны участвуют в

честной гонке, мы регулировали длину одного из путей. При этом скорость счета совпадений уменьшалась (образуя провал на графике зависимости скорости счета от длины) и проходила через минимум как раз тогда, когда фотоны тратили одинаковое время на путешествие до расщепителя. Ширина провала (которая и определяла разрешающую способность нашего эксперимента) соответствовала размерам волнового пакета фотона.

Только после того как мы убедились, что обе дорожки имеют одинаковую длину, мы установили барьер

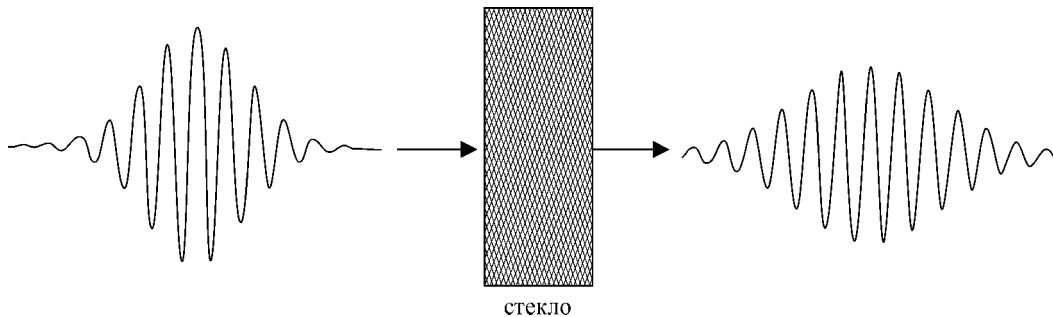


Рис. 5. Дисперсия светового импульса возникает из-за того, что каждый цвет распространяется со своей скоростью. Короткий световой импульс, проходящий сквозь кусок стекла, уширяется, превращаясь в перекошенный волновой пакет: более красные цвета убегают вперед, а более голубые отстают

и начали состязания. Обнаружилось, что скорость совпадений уже не соответствует минимуму кривой, и это означало, что один из фотонов достигает расщепителя раньше, чем другой. Чтобы восстановить ситуацию и вернуть число совпадений к минимальному значению, нам пришлось увеличить тот путь, который проходил туннелировавший фотон. Это изменение указывало, что фотоны тратят меньше времени на путь с барьером, чем на путь без него.

Даже несмотря на создание гоночного трека для фотонов и хитроумной системы измерения времени гонок, само соревнование очень трудно осуществить. То, что такой опыт вообще в принципе возможен, составляет второе подтверждение принципа нелокальности, согласно которому невозможно точное определение времени гонок. Чтобы как можно более точно определить время испускания

фотона, хотелось бы иметь волновые пакеты как можно меньшей длительности. Однако из соотношения неопределенностей вытекает, что чем более точно вы определяете момент испускания фотона, тем менее точно вы можете измерить его энергию (цвет).

Благодаря соотношению неопределенностей в наших опытах должен обязательно проявляться своеобразный эффект обмена. Цвета, из которых образован волновой пакет, будут в стекле любого сорта испытывать *дисперсию*. Это в свою очередь будет приводить к уширению волнового пакета и уменьшению точности измерения времени.

Когда короткий импульс света проходит через диспергирующую среду (сам барьер или стекло, входящее в то устройство, которое меняет направление светового пучка), он расплывается, и в результате красная часть убегает вперед, а голубая отста-



ет (см. рис. 5). Однако примечательно, что уширение фотонного импульса не нарушает точности нашего измерения времени.

Здесь и проявляется наш второй пример квантовой нелокальности. Оба фотона-близнеца должны проходить оба пути *одновременно*. Почти волшебным образом все потенциально возможные ошибки в хронометраже полностью компенсируются.

Чтобы понять этот эффект взаимной компенсации, нужно обратиться к особому свойству наших фотонных пар. Они рождаются в процессе, который физики называют спонтанной параметрической конверсией с уменьшением частоты. Этот процесс происходит при попадании фотона в кристалл с нелинейными оптическими свойствами. Такой кристалл может поглотить один фотон и взамен испустить два других с энергией, примерно равной половине энергии начального фотона (в этом смысле слов *уменьшение частоты* в названии процесса). Эти два фотона испускаются одновременно, и сумма их энергий в точности равна энергии фотона-родителя. Иными словами, цвета пары фотонов скоррелированы — если один немножко голубее (и, следовательно, распространяется в стекле чуть медленнее), то другой должен быть чуть краснее (и лететь быстрее).

Может показаться, что эти различия между братьями-фотонами должны повлиять на результат гонок — одна черепаха должна быть попроворнее другой. Однако в силу нелокальности

любые различия между фотонами в паре оказываются несущественными. Дело в том, что ни один из детекторов не способен определить, какой именно из фотонов выбрал тот или иной путь и какой из них прошел через барьер.

Две или более сосуществующие возможности, приводящие к одному и тому же результату, порождают эффект *интерференции*. В нашем случае каждый фотон одновременно движется по обоим путям, и эти две возможности интерферируют друг с другом. Вероятность, что прошедший через стекло фотон стал краснее (быстрее), интерферирует с вероятностью, что он стал голубее (медленнее). В результате разница в скоростях компенсируется и эффекты дисперсии взаимно уничтожаются. Таким образом, дисперсионное уширение фотонного импульса уже не имеет значения. Если бы природа подчинялась локальным (классическим) законам, мы не смогли бы провести подобные измерения. Единственный способ описать происходящее — принять, что *каждый из фотонов-близнецов проходит по обоим путям*, с барьером и без него. Именно это и есть нелокальность в действии.

До сих пор мы обсуждали два результата наших опытов, подтверждающие нелокальность. Первый — это измерение времени туннелирования, которое возможно при условии, что фотоны начинали гонку строго в один момент времени. Второй — это эффект компенсации дисперсии, основанный на строгой корреляции энергий фотонов, участвующих в гонке.

Иными словами, утверждается, что фотоны скоррелированы по энергии (мы знаем, что они делают) и во времени (нам известно, когда они это делают). Наш заключительный пример нелокальности есть, по существу, комбинация двух первых. Именно фотон мгновенно «реагирует» на то, что делает его близнец, независимо от того, как далеко они друг от друга находятся.

Знающие читатели могут в этом месте запротестовать, заявив, что соотношение неопределенностей Гейзенберга запрещает точное одновременное знание энергии и импульса. И они будут правы, когда речь идет об *одной* частице. Для *двух* частиц, однако, квантовая механика допускает одновременное определение разности моментов времени испускания фотонов и суммы их энергии, даже если для каждого из них по отдельности энергия и время испускания не определены. Этот факт привел в свое время Эйнштейна, Подольского и Розена к выводу, что квантовая механика является неполной теорией. В 1935 г. они предложили мысленный эксперимент, призванный, по их мнению, продемонстрировать неполноту квантовой механики.

Они утверждали, что если верить в законы квантовой механики, то любые две частицы, родившиеся в каком-то процессе, например при конверсии с уменьшением частоты, связаны одна с другой. Пусть измеряется момент испускания одной из частиц. Из-за жесткой корреляции между час-

тицами мы способны точно предсказать момент испускания другой частицы, не производя над ней никаких измерений. Аналогично можно непосредственно измерить энергию второй частицы, а затем узнать энергию первой, так как нам известна сумма энергий. Таким образом, нам удастся точно определить для каждой частицы ее энергию и время испускания, что прямо нарушает соотношение неопределенностей. Как же понимать тогда корреляцию между частицами и как разрешить возникший парадокс?

Имеются две точки зрения. Одна заключается в том, что в природе существует, по выражению Эйнштейна, «призрачное действие на расстоянии». В рамках такого подхода квантовомеханическое описание частиц исчерпывает проблему. Фотону нельзя приписать никакого определенного значения времени испускания или энергии до тех пор, пока не совершен акт измерения, например энергии. В этот момент только энергия наблюдаема. Поскольку энергии двух фотонов в сумме равны заданной энергии начального фотона, то не имевшая до этого мгновения определенного значения энергия второго фотона *скачком* принимает то значение, которое требует закон сохранения энергии. Этот нелокальный скачок будет происходить независимо от того, как далеко успел улететь второй фотон. Соотношение неопределенностей не нарушается, так как мы способны определить на опыте какую-то одну переменную из двух: акт измерения энергии воз-



действует на систему, мгновенно внося некоторую неопределенность в момент времени испускания.

Конечно, если бы существовал более простой способ понять явление корреляции, никто бы не рассматривал такую сумасшедшую нелокальную модель. На более интуитивном уровне объяснение заключается в том, что близнецы-фотоны покидают источник в определенные скоррелированные моменты времени, имея определенные скоррелированные энергии. Тот факт, что квантовая механика не может одновременно конкретизировать эти свойства объекта, означает просто, что теория не полна.

Эйнштейн, Подольский и Розен защищали именно такое объяснение. С их точки зрения, вообще нет никакой нелокальности в наблюдаемых корреляциях между парами частиц, так как свойства каждой из них определены в момент рождения. Квантовая механика верна только как вероятностная теория, вроде социологии, и не способна полностью описать отдельные частицы. Можно думать, что за всем этим стоит какая-то более фундаментальная теория, способная предсказать конкретные результаты всех мыслимых экспериментов и доказать, что частицы взаимодействуют локально. Такая теория могла бы базироваться на неких *скрытых параметрах*, которые еще предстоит обнаружить. В 1964 г. Джон Белл доказал теорему, согласно которой все варианты локальных теорий со скрытыми параметрами приводят

к предсказаниям, отличающимся от предсказаний квантовой механики.

Результаты проведенных с тех пор экспериментов *подтверждают* нелокальную (квантовомеханическую) картину и противоречат интуитивной картине, на которой настаивали Эйнштейн, Подольский и Розен.

Используя идею, высказанную в 1989 г. Джеймсом Франсоном, мы осуществили эксперимент по проверке того, может ли какая-нибудь локальная модель со скрытыми параметрами описать корреляции энергии и времени лучше, чем стандартная квантовая механика. В нашем эксперименте фотоны-близнецы, испущенные кристаллом в процессе конверсии с уменьшением частоты, посылались по отдельности на одинаковые интерферометры (см. рис. 6). Каждый интерферометр устроен во многом похоже на скоростное шоссе с объездами. Фотон может выбрать короткий путь непосредственно от источника к месту наблюдения. Он может выбрать и более длинный объездной путь (длину которого можно регулировать), заглядывая по дороге на стоянки.

Посмотрим, что происходит, когда мы посылаем два фотона через эту систему интерферометров. Каждый фотон случайным образом выбирает либо более длинный (через объезд), либо более короткий путь. Пройдя по одному из путей, фотон может вылететь из своего интерферометра через один из двух выходов, обозначенных на схеме рис. 6 как верхний выход и нижний выход. Мы установи-

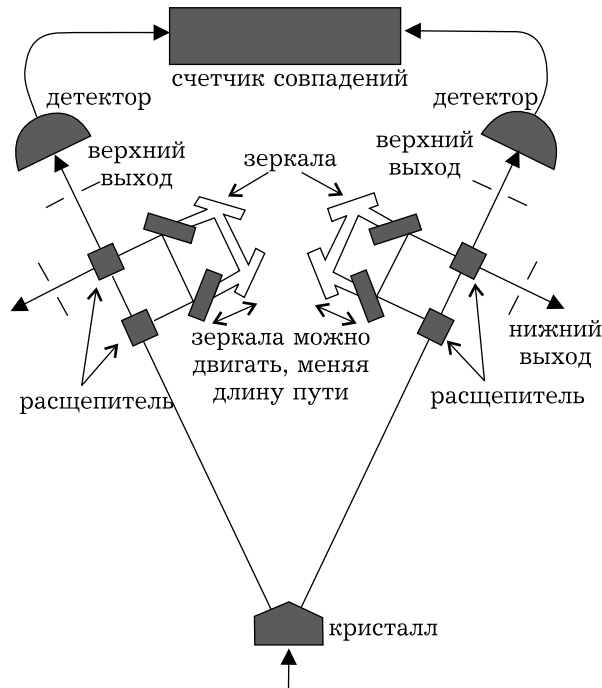


Рис. 6. Нелокальные корреляции между двумя частицами демонстрируются в так называемом опыте Франсона. Два фотона посылаются в разные, но идентичные интерферометры. Каждый фотон, проходя первый расщепитель пучка, может выбрать либо прямой короткий, либо обходной длинный путь. Затем они могут вылететь через верхний или нижний выходы. На верхних выходах поставлены детекторы. Прежде чем влететь в свой интерферометр, ни один из фотонов не «знает», по какому пути он полетит. Однако, вылетая из интерферометра, каждый из фотонов мгновенно и нелокально узнает, как полетел его близнец, и ведет себя соответственно

ли, что каждая частица в равной степени охотно проходила через верхний и нижний выходы. Таким образом, на уровне обычной интуиции можно было предположить, что выбор фотоном того или иного выхода совершенно не связан с тем, какой выбор делает второй фотон в другом интерферометре. Оказалось, что это не так. Мы увиде-

ли сильную корреляцию между тем, какой путь выбирает каждый из фотонов на выходе из интерферометра. Если, например, левый фотон вылетал через верхний выход, то при определенных длинах объезда его близнец справа тоже вылетал через свой верхний выход.



Кто-то может подумать, что такая корреляция заложена прямо на старте, как в случае, когда в одном кулаке зажата черная пешка, а в другом — белая. Так как цвета пешек определены с самого начала, нас не удивляет, что, выбрав пешку в одной руке, мы со стопроцентной уверенностью знаем, какая пешка осталась в другой.

Но гипотеза об изначально заложенной корреляции не согласуется с тем, что мы наблюдали в своем опыте. Все намного более странно: меняя длину пути в каждом интерферометре, мы могли *управлять* корреляциями. Мы могли плавно перейти от ситуации, когда фотоны вылетают через определенные выходы (оба — через верхние или оба — через нижние) своих интерферометров, к ситуации, когда они вылетают всегда через разные выходы. В принципе такая корреляция будет существовать, даже если мы начнем менять длину пути после того, как фотоны покинут источник. Иными словами, прежде чем войти в интерферометр, ни один фотон не знает, по какому пути он собирается полететь, но, покидая интерферометр, каждый из них мгновенно (нелокально) узнает, что сделал его близнец, и ведет себя соответственно.

Чтобы проанализировать эти корреляции, посмотрим, как часто фотоны покидают интерферометр в один и тот же момент времени. Мы использовали счетчик совпадений сигналов в детекторах, помещенных на верхнем выходе каждого из интерферометров.

Изменение длин объездных путей у каждого интерферометра не меняло скорости счета сигналов в каждом детекторе по отдельности. Однако при этом существенно менялась скорость счета совпадений, что указывало на наличие корреляций в поведении каждой пары фотонов. Изменение длин путей приводило к появлению полос, напоминающих светлые и темные полосы в стандартном двухщелевом интерферометре, подтверждая тем самым волновую природу частиц.

В нашем эксперименте появление полос было сопряжено со специфическим интерференционным эффектом. Как объяснено выше, интерференция является результатом наложения двух или более неразличимых, сосуществующих возможностей, приводящих к одному и тому же конечному результату. Есть два способа получить совпадающие отсчеты: оба фотона проходят либо по коротким путям, либо по длинным. (В случае, когда один фотон проходит короткий, а другой — длинный путь, они доходят до счетчиков в разные моменты времени и поэтому не интерферируют.)

Сосуществование двух указанных возможностей приводит к бессмысленной с классической точки зрения картине. Так как каждый фотон приходит к детектору в одно и то же время после прохождения как длинного, так и короткого пути, получается, что каждый фотон должен быть испущен дважды — один раз для того, чтобы затем полететь по короткому пути, а другой раз — по длинному.

Чтобы понять это, рассмотрим аналогию, в которой вы исполняете роль одного из детекторов. Допустим, вы получили письмо от приятеля с другого континента. Вы знаете, что письмо могло быть доставлено либо самолетом, либо пароходом. Отсюда следует, что оно было опущено отправителем либо неделю назад (самолет), либо месяц назад (пароход). Чтобы возник эффект интерференции, одно и то же письмо должно было быть отослано дважды. С классической точки зрения, это, конечно, абсурд. Но наблюдение интерференционных полос в нашем эксперименте доказывает, что каждый из фотонов-близнецов был испущен кристаллом в разные, но *неразличимые* моменты времени. У каждого фотона было два «дня рождения».

Еще важнее то, что точную форму интерференционных полос можно использовать для того, чтобы отличить квантовую механику от любой локальной теории со скрытыми параметрами (в которой, например, каждый фотон мог бы рождаться с определенной энергией или уже заранее знающим, через какой выход лететь). Согласно ограничениям, полученным Беллом, такая теория со скрытыми параметрами не может в принципе объяснить появление периодически меняющихся полос, отличающихся по контрастности более чем на 71%. Другими словами, разница в интенсивности светлых и темных полос имеет определенный предел. Наши же данные показывают, что эта разница в контрастности достигает 90%.

Если сделать ряд разумных дополнительных предположений, можно заключить, что опирающаяся на интуицию локальная реалистическая картина, на которой настаивали Эйнштейн с коллегами, *неверна*: невозможно объяснить наблюдаемые данные, не признав, что результат одного измерения нелокально зависит от результата другого измерения.

Так находится ли в опасности теория относительности Эйнштейна? Как ни удивительно, *нет*, поскольку не существует способа использовать корреляции между частицами для послышки сигнала со скоростью, превышающей скорость света. Причина в том, что каждый фотон попадает в детектор или выбирает путь через нижний выход совершенно случайно. Только сравнив случайные записи сигналов на обоих детекторах и собрав все данные вместе, мы можем заметить нелокальные корреляции. Принцип причинности остается неизблемым.

Создатели научно-фантастических триллеров могут огорчиться, узнав, что связь со сверхсветовой скоростью так и остается невозможной. Однако ряд ученых попытался из всего этого что-то извлечь. Они предложили использовать случайный характер корреляции для создания разных шифровальных схем. Шифры, разработанные системами квантовой криптографии, было бы абсолютно невозможно разгадать.

Итак, мы продемонстрировали три примера квантовой нелокальнос-



ти. Во-первых, в процессе туннелирования сквозь барьер фотоны способны каким-то образом чувствовать дальний край барьера и пересекать его через один и тот же промежуток времени независимо от толщины барьера. Во-вторых, в экспериментах по хронометрированию полета фотонов с большим разрешением компенсация дисперсии зависит от того, какие пути в интерферометрах проходят оба фотона. Наконец, в последнем эксперименте нелокальные корреляции энергии и времени пролета двух фотонов свидетельствуют о коллективном поведении обеих частиц после вылета из интерферометров. Хотя в нашем

опыте фотоны были разделены расстоянием около 2 м, квантовая механика предсказывает, что корреляции должны наблюдаться независимо от расстояния, разделяющего интерферометры.

Природа все-таки достаточно умна, чтобы избежать каких-либо противоречий с принципом причинности. Ни при каких условиях ни один из описанных выше эффектов не позволит послать сигнал со скоростью, большей скорости света. Поразительное сосуществование локальных принципов теории относительности и нелокальной квантовой механики пережило еще один натиск.

Волновые пакеты

Хороший способ понять, что такое волновой пакет, заключается в том, чтобы построить его собственноручно, складывая волны разной частоты. Начнем с волны центральной частоты (сплошная линия на рис. 7), не имеющей ни начала, ни конца (монокроматическая волна). Если теперь добавить к ней две волны с частотами чуть меньше и чуть больше центральной (пунктирная и штрихпунктирная линии на рис. 7), мы получим пульсирующий объект с переменной амплитудой. Если теперь взять достаточно много волн с мало отличающимися частотами, то образуется волновой пакет, сосредоточенный в малой области пространства. Если все частоты, используемые для получения па-

кета, уменьшаются (например, вместо цветов от оранжевого до голубого использовать для образования волнового пакета цвета от желтого до зеленого), то пакет удлинится. Наоборот, переход к более высоким частотам (цвета от красного до фиолетового) приводит к укорочению волнового пакета.

Попробуем выразить это на математическом языке. Пусть $\Delta\nu$ обозначает ширину интервала цветов (частот), а Δt — длительность импульса. Тогда

$$\Delta\nu \cdot \Delta t \geq 1/4\pi,$$

что просто отражает тот факт, что чем шире интервал цветов, тем короче получающийся волновой пакет.

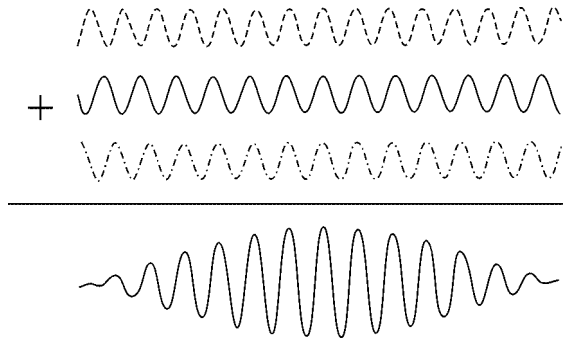


Рис. 7

Эти соображения верны для волн всех типов — световых, звуковых, волн на воде и т. п.

Явление приобретает новый физический смысл, если отождествить частоту электромагнитной волны ν с энергией фотона E согласно соотношению Планка–Эйнштейна $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. В этом месте проявляется та сторона квантовой механики, которая связана с корпускулярным описанием. Иными словами, энергия фотона зависит от его цвета. Красные фотоны имеют энергию, равную $3/5$ энергии голубых фотонов. Предыдущее математическое выражение можно переписать в виде

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi.$$

Физиков так привлекла эта формула, что они дали ей имя: *соотношение неопределенностей Гейзенберга*. (Заметим, что аналогичную и более знакомую формулу можно записать для координаты и импульса частицы.) Одно

из следствий этой формулы для экспериментов, описанных в статье, заключается в том, что решительно невозможно, даже с помощью самой изощренной аппаратуры, измерить одновременно момент времени испускания фотона и его энергию.

Хотя мы пришли к соотношению неопределенностей, рассматривая волновые пакеты, применение этого принципа намного более широко, а обоснование намного более общее. Нельзя не подчеркнуть, что неопределенность есть свойство, присущее всем законам природы. Это не есть просто результат неточности приборов в наших лабораториях. Соотношение неопределенностей удерживает электроны от падения на ядра атомов, строго ограничивает разрешающую способность микроскопов, а согласно некоторым астрофизическим идеям изначально ответственно за неоднородное распределение вещества во Вселенной.