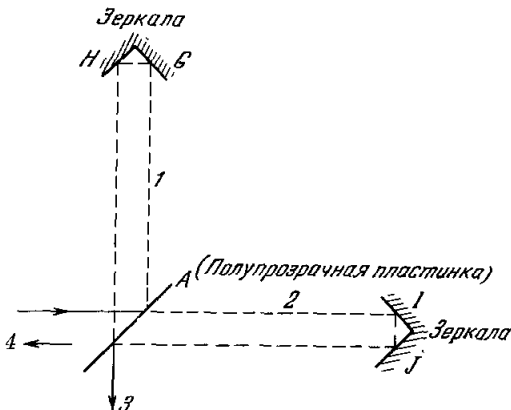


ВОЗЬМЕМ ФОТОН И ...

Когда свет падает на идеальное полупрозрачное (посеребренное) зеркало, половина света проходит сквозь зеркало, а другая половина — отражается. Это вполне понятно, если рассматривать свет как волны: возникают проходящая и отраженная волны, каждая из которых обладает половиной интенсивности падающей волны.

Однако свет является также и пучком фотонов, каждый из которых несет энергию $h\nu$. Частота ν не меняется при отражении от зеркала, поэтому и в отраженном, и в проходящем луче индивидуальные фотоны должны обладать первоначальной энергией $h\nu$. Отсюда делают вывод, что фотон не расщепляется, а оказывается в том или другом луче случайным образом.

Если снова соединить эти два луча в интерферометре (см. рисунок), то, как правило, получатся интерференционные полосы; это обусловлено некоторым сдвигом (который зачастую создается специально) фаз накладывающихся волн: эта разность фаз различна в различных частях пространства, и волны взаимно погашаются в одних местах, а в других — взаимно усиливаются.



Проще всего рассмотреть интерферометр, настроенный так, что интерференционных полос нет. К примеру, если расположить две пары зеркал $G-H$ и $I-J$, отражающих луч под прямыми углами, так, чтобы линия $G-H$ была зеркальным изображением (в полупрозрачном зеркале A) линии $I-J$, то световые волны, прошедшие сквозь зеркало A , при возвращении погасятся, и весь свет пойдет по лучу 3 (отраженному), а луч 4 будет обладать нулевой интенсивностью.

Но что происходит в интерферометре с фотонами? На первый взгляд, интерференция возникает при столкновении двух или более фотонов; но подобное утверждение было

отвергнуто уже в 1909 г., когда Г. И. Тейлор на опыте показал, что образование интерференционных полос не зависит от силы света; в его опытах свет обладал и большой интенсивностью и настолько малой, что через прибор практически проходило не более одного фотона. Из этих опытов вытекало, что интерференцию вызывал одиночный фотон, другими словами, что «фотон может интерферировать сам с собой». Было похоже на то, что «что-что» распространяется сразу по двум возможным путям в интерферометре даже в том случае, когда в интерферометр попадает только один фотон; но что именно распространяется в этом случае?

Подобные вопросы оживленно обсуждались, когда фотоны были новинкой, когда только что была открыта «дуальность» свойств частиц вещества (электронов и др.), обнаруживающих и свойства волн и свойства частиц. В результате этих дискуссий были выработаны ответы на подобные вопросы, но единодушное согласие среди физиков не было достигнуто, и до сих пор многие из нас не совсем уверенно отвечают на вопросы студентов. Здесь я собираюсь привести две (если не больше) точки зрения по этому поводу. Мне показалось, что легче всего изложить их в виде диалога между студентами; я заставлял их говорить кратко, однако в заключение вновь повторяются основные утверждения, дается некоторое резюме*).

- Д ж и м Возьмем фотон...
 Т о м Каким образом?
 Д ж и м Возьмем слабый источник света и откроем диафрагму на достаточное время, чтобы пропустить один фотон.
 Т о м Но ведь с таким же успехом фотонов может оказаться и два и ни одного!
 Б о б Вам нужен один фотон видимого света, не так ли?
 Д ж и м Да.
 Б о б Я могу помочь вам: у меня есть генератор одиночных фотонов резонансной линии натрия ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см). Пучок медленных атомов натрия освещается светом желтой линии натрия, который возбуждает некоторые атомы пучка. Те атомы, которые излучают фотоны в нужную для вас сторону, отклоняются из-за отдачи и попадают на раскаленную вольфрамовую прово-

* Диалог, составляющий основу этой заметки, написан в честь 70-летия со дня рождения (15 сентября 1964 г.) проф. Оскара Клейна (Стокгольм) — одного из пионеров квантовой теории, чье имя известно по знаменитому «парадоксу Клейна», «волновому уравнению Клейна — Гордона» и по «формуле Клейна — Нишны». Contemporary Phys. 7, № 1, стр. 45—53, октябрь 1965. Перевод В. А. Белокопия и В. А. Угарова.

лочку и ионизуются на ней; акт ионизации регистрируется электронным умножителем. Импульс на выходе умножителя позволяет судить о появлении одиночного фотона.

Т о м Не проскочит ли фотон до того, как мы отметим импульс?

Б о б Устанавливаются линзы и зеркала, которые заставляют фотон проделать замкнутый путь длиной в 300 километров; это дает задержку во времени, равную одной миллисекунде. Имеется также диафрагма, которая в нужное время открывается, чтобы пропустить один фотон. Вероятность прохождения еще одного фотона при этом пренебрежимо мала.

Д ж и м Прекрасно. Итак, возьмем фотон и...

Т о м Можете ли вы гарантировать, что у вас один фотон?

Б о б Какие еще нужны гарантии: на мой генератор вполне можно положиться.

Т о м А все-таки, что же позволяет нам убедиться, что у вас есть фотон?

Д ж и м Фотон можно зарегистрировать фотоумножителем...

Т о м Можно, но с некоторой неопределенностью!

Б о б Действительно, фотокатоды дают ошибку около 70%. Однако применение некоторых полупроводников доводит ошибку почти до нуля. Останется только устранить шумы измерительной аппаратуры, например глубоким охлаждением...

Т о м Ну ладно; договоримся, что вы обладаете идеальным счетчиком фотонов. Итак, мы можем приготовить фотон, зная, когда он придет, зарегистрировать его приход. Но мы уничтожим его при регистрации!

Д ж и м Понимаю. И все-таки я уверен, что в итоге можно сказать «возьмем фотон». Ведь фотон обладает существенными признаками частицы: он исходит из точки, он имеет траекторию полета, он...

Б и л л Но это же не так! Свет состоит из волн; в лучшем случае у вас будет волновой пакет! А после прохождения трехсот километров...

Б о б Позвольте мне описать свою установку. Одна линза имеет диаметр a , равный одному метру; на расстоянии $b = 300$ км волновой пакет расположится примерно на величину $\lambda b/a = 18$ см; имея это в виду, второй линзе придан несколько больший размер, чем первой, чтобы получить изображение столь же малое, как и начальный источник света: всего несколько длин волн. Эффект расплывания...

Б и л л Практически сводится к нулю, я согласен. Но где именно фотон пройдет сквозь ваши большие линзы?

Д ж и м Это неважно; он пройдет где-нибудь. Только позвольте мне извлечь фотон из фокуса второй линзы Боба. Этот фокус мы можем считать фотонным источником. К тому же мы знаем — с предупреждением за одну миллисекунду, — куда фотон окажется в фокусе.

Т о м Хорошо, допустим что вы «взяли» фотон. Но что вы будете с ним делать?

Д ж и м Я расщеплю его полупрозрачным посеребренным зеркалом.

Б и л л Но такое зеркало не расщепляет фотон; оно с равной вероятностью либо отражает его, либо пропускает.

Д ж и м Так что фотон движется либо в направлении 1, либо в направлении 2?

Б и л л Именно так. Если вы поместите детекторы фотонов в обоих возможных направлениях, то фотон будет зарегистрирован либо одним, либо другим детектором.

Д ж и м Согласен. Теперь, пожалуйста, обратите внимание на рисунок; ведь я установил зеркала под углом; эти зеркала возвращают оба луча, и эти лучи складываются.

Б и л л Вижу. Ваше устройство аналогично интерферометру Майкельсона. Если два расстояния у вас точно равны, то объединенный луч заставит сработать детектор 3, а не 4, если я правильно подобрал сдвиг фаз.

Д ж и м Верно, но отсюда я и делаю вывод, что фотон расщеплен, что он присутствует и в луче 1, и в луче 2. Здесь нечего выбирать. Нам нужны обе части фотона для наблюдения интерференции, которая ведет к регистрации фотона детектором 3, но не детектором 4.

Б и л л Однако, как можно объяснить тот факт, что из двух фотонных детекторов, помещенных на возможных направлениях движения фотона 1 и 2, работает только один, причем совершенно случайно?

Д ж и м Для возникновения этой случайности и необходима установка этих детекторов.

Б и л л Не хотите ли вы этим сказать, что если один детектор отметил фотон, то из этого следует, что другой детектор уже не может этого сделать?

Д ж и м Да.

Б и л л Хотя, по вашему мнению, через второй детектор проходит половина фотона?

- Д ж и м Нет. Конечно, вторая половина уже не существует — она исчезает, когда в первом луче регистрируют целый фотон. Если из источника вышел только один фотон, можно поглотить и зарегистрировать только один фотон.
- Т о м Это, кажется, не что иное, как «редукция волнового пакета», как любят говорить теоретики?
- Б о б По-видимому, да. Но что это значит? Каким образом наблюдение фотона в данном месте уничтожает вторую половину фотона?
- Б и л л Никакого расщепления фотона нет; на самом деле расщепляются лишь волны.
- Б о б Я не могу с этим согласиться. В моем генераторе создаются фотоны, я уверен в этом. Я могу получить — если нужно — один фотон. Кажется об этом мы уже договорились.
- Р о й Вспомним, чему нас учили. Волна, ассоциированная с одним фотоном, не является реальной; она представляет собой всего лишь математический метод расчета вероятности наблюдения фотона в данном месте. И расщепление волны есть только способ описания того, что одиночный фотон вошел в интерферометр и дошел до полупрозрачного зеркала. Как только мы узнали, что фотон был обнаружен в одном из возможных лучей, вероятность его нахождения в другом возможном луче обращается в нуль.
- Д ж и м Вроде того, как обращается в нуль вероятность выигрыша вашей лошадки, если скачку уже выиграла другая лошадь?
- Р о й Да, вроде этого.
- Т о м Но если речь идет всего лишь о вероятности наблюдения фотона, то не могут ли оба детектора пропустить фотон?
- Р о й Пусть детектор в луче 1 расположен ближе к зеркалу, чем детектор в луче 2. Тогда срабатывание детектора 1 изменит волну — представляющую собой только наше знание о фотоне, — после чего детектору 2 уже нечего регистрировать. Но если детектор 1 не срабатывает в критический момент, тогда волна в луче 2 усиливается, и фотон достоверно должен обнаруживаться именно в луче 2.
- Т о м Но на какой детектор будет действовать волна, если оба они — с точностью до длины волны — расположены на одинаковом расстоянии от полупрозрачного зеркала. Как бы то ни было, если волна описывает только лишь наше знание, она может измениться лишь тогда, когда мы узнали что-то новое. Давайте попросту отвернемся и не будем смотреть на первый детектор. В конце концов можно предусмотреть автоматическую регистрацию поведения детектора.
- Р о й Вот тогда второй детектор отметит появление фотона с той же самой вероятностью, что и первый детектор. Для второго детектора все будет выглядеть так, как если бы первого детектора совсем не было.
- Т о м Конечно. Однако второй детектор не регистрирует фотон в тех случаях, когда более поздняя проверка показаний первого детектора обнаружит оставшийся пока неизвестным для нас, но совершившийся факт регистрации фотона. Не зависит ли в таком случае поведение второго детектора в настоящий момент времени от состояния нашего будущего знания о первом детекторе?
- Р о й Ни коим образом. Мы должны интерпретировать термин «знание» более широко. Когда какой-нибудь детектор регистрирует фотон, то это означает регистрацию пути фотона и тогда, когда ни вы, ни я об этом ничего не знаете.
- Б о б Но ведь это еще более неправдоподобно. Утверждать, что знание, запасаемое в одном блоке электронной памяти, повсюду влияет на волну — без распространения сигнала! — и что другой блок работает в точности так же. Почему бы не принять, что фотон, встретив полупрозрачное зеркало, принимает случайное решение — идти через зеркало или отразиться.
- Д ж и м Потому что тогда вы не сможете объяснить интерференцию. Если бы вы уверенно знали, что по каждому из возможных путей идет половина всех фотонов, тогда вы могли бы закрыть один путь и регистрировать детектором 3 половинную интенсивность. Однако вы знаете, что блокирование одного пути разрушит интерференцию и детектор 3 будет регистрировать столько же фотонов, сколько их регистрирует детектор 4, в то время как при двух открытых путях все фотоны попадают в 3.
- Б и л л А чем плохо волновое объяснение интерференции? Если существует волна и фотон, тогда волна расщепляется, хотя фотон либо проходит, либо отражается.
- Д ж и м В таком случае, если блокировать один путь детектором и обнаружить на этом пути фотон, волна будет по-прежнему распространяться по другому пути; никому не нужная жалкая волна без фотона! Пока вы не «ликвидируете» ее. И мы снова придем к тому, от чего ушли.

- Т о м Нельзя ли засечь фотон, не поглотив его?
- Б о б Конечно, можно. Например — при помощи пластинки из прозрачного материала с массой M , толщиной a и с показателем преломления n . Прохождение через нее фотона с длиной волны λ вызовет смещение пластинки на расстояние $s = a(n - 1)(h/Mc\lambda)$, которое мало; однако...
- Б и л л Понятно. Но такая пластинка вызовет сдвиг фазы волны на $2\pi(n - 1)a/\lambda$, что повлияет на интерференцию или даже нарушит ее.
- Б о б Но нельзя ли подобрать пластинку так, чтобы сдвиг фазы составлял $2\pi N$, где N — целое число? Тогда пластинка не будет влиять на интерференцию.
- Б и л л Давайте сообразим. В таком случае смещение составляет $s = Nh/Mc$. Если мы измеряем смещение (т. е. положение пластинки) с такой точностью, то (по соотношению неопределенностей Гейзенберга) скорость блока известна с точностью до $c/N = h/sM$. Если же пластинка имеет скорость v , то время, которое находится фотон в блоке, меняется на величину $v/c = 1/N$ и, следовательно, меняется сдвиг фазы; отсюда неопределенность фазы составляет 2π , т. е. интерференция полностью нарушается.
- Р о й Да ведь это же еще в начале тридцатых годов подробно обсуждалось в Копенгагене: «Если вы фиксируете положение фотона, то вы ничего не можете сказать об его фазе».
- Б о б Мне кажется, что я нашел способ обойти и эту трудность: давайте подвесим полупрозрачное зеркало так, чтобы измерять импульс зеркала, направленный перпендикулярно его плоскости...
- Р о й Это уже совсем нигкуда не годится. Ибо если измерять импульс зеркала с точностью до импульса одиночного фотона h/λ , то неопределенность положения зеркала будет составлять λ , т. е. интерференция уже не будет иметь места.
- Б о б Но погодите, я придумал еще кое-что. Давайте подвесим зеркало так, чтобы его полупериод колебаний был равен времени, которое фотон затрачивает на путь туда и обратно по плечу интерферометра. Если при вхождении фотона зеркало отклонилось на $+d$ от положения равновесия, при его возвращении оно отклонено на $-d$, и величина отклонения не скажется на фазе волны; значит, интерференция будет такой же, как если бы зеркало было фиксировано в положении равновесия?
- Р о й Остроумно. Но как же тогда измерить переданный импульс?
- Б о б Очень просто. Я измеряю импульс до того, как фотон войдет в интерферометр, и снова — после регистрации фотона детектором 3. Отклонение зеркала, вызванное фотоном, когда он вначале отражается, а потом — на обратном пути идет сквозь зеркало, должно отличаться от отклонения зеркала при другом пути фотона.
- Р о й Однако в последнем случае толчок произойдет на полпериода позже, чем в первом случае; окончательный результат толчков будет одинаков для толкания маятника и в том, и в другом направлении — если толкать во втором случае на полпериода позже. Поэтому ваши измерения абсолютно ничего не говорят о пути фотона.
- Б о б Остроумно. Боюсь, что вы правы. Получается, что я должен произвести одно из измерений импульса, когда фотон находится внутри интерферометра, однако это нарушило бы интерференцию.
- Т о м Все же вами действительно предложен способ выяснить, где находится фотон, не оказывая на него влияния. Не доказывает ли это, что фотон на самом деле находится только в одном луче, т. е. не расщепляется?
- Д ж и м Нечто подобное говорил и Эйнштейн.
- Р о й По ведь на самом деле вы не знали, где фотон, когда подвешивали зеркало; вы должны еще измерить его импульс.
- Б о б Однако импульс зеркала существует, измеряю я его или нет. Если угодно, я могу его измерить, но к фотону это никакого отношения не имеет!
- Р о й Нет имеет: это нарушает интерференцию. Все ваши старания сводятся к тому, чтобы разделить ответ на вопрос, где находится фотон, на ответ, относящийся только к фотону, и ответ, относящийся только к зеркалу, с тем чтобы один из ответов исчерпал бы весь вопрос. Ваша специальная подвеска зеркала автоматически пресекает эту попытку в тот момент, когда интерференция направляет фотон в детектор 3.
- Т о м Если бы зеркало было не на такой подвеске, а свободно плавало, нельзя ли бы было по переданному импульсу определить положение фотона?
- Б о б Совсем не обязательно. Всегда можно сконструировать устройство, которое двигало бы зеркало в направлении подвески и зеркало «ловило» бы на подвеску по вашему желанию — до возвращения фотона. Мне для этого нужно только...

- Т о м Пусть вы правы. Однако если от зеркала отразился длинноволновый *) фотон, скорость зеркала можно измерить по доплер-эффекту, и можно ли считать, что нужное измерение сделано?
- Б о б Не обязательно. Могу предложить систему зеркал, отражающих длинноволновый фотон так, чтобы зеркалу передавался его импульс.
- Т о м Но когда же можно считать измерение осуществленным?
- Б о б Конечно, любой обратимый процесс можно обратить. Однако я бы сдался, если бы у нас фотон взаимодействовал необратимо — с полупроводником, зерном фотопластинки, с сетчаткой глаза.
- Т о м В этом-то и есть гвоздь. В конце концов измерение создает информацию, а информация соответствует некоторому состоянию машины или организма, изменившемуся после ее запоминания. Это изменившееся состояние возникает в некоторый момент и должно сохраняться. Необратимость — это самая сущность информации.
- Д ж и м Разве мы не получаем иногда информацию и без необратимых взаимодействий? К примеру: когда детектор в луче 1 не зарегистрировал ничего, мы знаем, что фотон пошел по лучу 2 **).
- Б о б Я согласен с Вами; однако в данном случае детектор б ы л у с т а н о в л е н в луче 1; существенна сама возможность необратимого взаимодействия.
- Д ж и м А что если поставить кусочек черной бумаги на пути пучка? В этом случае будет необратимое взаимодействие, мы разрушим интерференционную картину, но взамен не получим никакой информации.
- Б о б Не совсем так. Ведь можно измерить температуру куска бумаги до и после взаимодействия.
- Д ж и м Ну, а если я этого не сделаю?
- Б о б Ну что ж? Информация, о которой вы не позаботились, будет попросту утрачена.
- Д ж и м Однако оставим вопрос об информации! Что же происходит с фотоном в интерферометре: расщепляется он или нет?
- Р о й Легко сказать, «оставим вопрос об информации». Ведь сама квантовая механика есть наука об информации. Все ее утверждения сводятся к тому, как использовать доступную в данный момент информацию для предсказания информации в будущем.
- Д ж и м Вы имеете в виду предсказание того, что должно случиться?
- Р о й Да, если вы согласитесь использовать слово «случиться» только для необратимых процессов.
- Т о м Но ведь что-то, конечно, случается — в обычном смысле этого слова — с фотоном внутри интерферометра; поэтому квантовая теория должна быть признана несовершенной.
- Р о й Я не разделяю вашего мнения. Квантовая теория логически замкнута и позволяет предсказать все, что вы можете проверить. Фотоны и волны — это модели, помогающие иногда нашему воображению интерпретировать полную теорию, но эти модели все равно не могут заменить полную теорию.
- Б и л л Разве нельзя придумать модель, которая обладала бы и свойствами фотонов, и свойствами волн? Нечто более сложное, быть может — многомерное, проекциями которого были бы наши современные представления?
- Р о й Ну да. Как тени на стенах пещеры Платона. Кто станет спорить: постройте такую модель, и мы ее обсудим.
- Д ж и м Но ведь существуют трудности похуже, которых мы сейчас даже не коснулись. Например, возьмем два фотона...

На этом мы должны прервать дискуссию, чтобы разобраться, к чему же мы все-таки пришли. Прежде всего следует признать, что многие экстравагантные конструкции Боба никогда не будут осуществлены. Однако не это нас заботит; мысленные опыты в физических спорах имеют свою историю и общеприняты. Разумеется, мысленный опыт может оказаться ошибочным, если его автор что-то просмотрел. Можно привести в качестве примера знаменитый мысленный опыт, предложенный Эйнштейном и отвергнутый Бором в 1930 г. Мы позволили Бобу углубиться в описание деталей фотонного генератора, потому что фотоны излучаются случайно, и кое-кто может считать неправильно поставленным любой мысленный эксперимент, в котором исходным пунктом будет: «возьмем фотон». По-моему, Боб камня на камне не оставил от такой точки зрения. Он не может получить фотон в заданный момент времени, но если

*) Коротковолновый фотон неудобен из-за влияния эффекта Комптона. (Прим. перев.)

**) При этом, однако, должно произойти необратимое взаимодействие запоминающего устройства (или наблюдателя) с «ничего не показывающим» детектором. (Прим. перев.)

Джим согласен ждать, то он получит каждый раз $один фотон$ (за одну миллисекунду вперед) будет знать о его появлении.

Затем дискуссия переносится на следующую проблему: что случится с фотоном, попавшим на полупрозрачное (посеребренное) зеркало? Джим думает, что фотон расщепляется. Том сомневается в этом. Билл предполагает, что расщепляется только волна. Но все попытки наглядно представить себе, что происходит внутри интерферометра, оказываются безуспешными. Самый ходовой способ описания предложил Рой: волна, которая расщепляется, определяет вероятность регистрации фотона в том или ином луче. Но тогда приходится предположить, что, если фотон зарегистрирован в луче 1, то волновой пакет, определяющий вероятность обнаружить фотон в луче 2, сокращается до нуля. Такая «редукция волнового пакета» не является физическим процессом в обычном понимании. Эта редукция происходит внезапно, как бы далеко ни были расположены два волновых пакета, в тот момент, когда в одном из них был обнаружен фотон.

Рой предполагает, что волна представляет собой просто наше знание о фотоне. В таком случае процесс «редукции» понять легче: волновой пакет становится похож на вероятность выиграть скачки; эта вероятность падает до нуля, когда становится ясно, что выиграл соперник. Однако дело не просто в $нашем$ знании (в том, скажем, что такой-то детектор отметил фотон), изменившем нашу уверенность (в том, что вероятности равны для каждого детектора). Помещая идеальные счетчики фотонов в каждый луч и регистрируя их сигналы, мы можем убедиться впоследствии, что каждый вошедший фотон регистрируется только одним из детекторов. Поэтому если придерживаться идеи о расщепленной волне, то следует допустить взаимодействие между детекторами (сводящееся к «редукции волнового пакета»).

И все-таки мы не можем просто предполагать — как это делает Том — что каждый фотон либо пропускается, либо отражается зеркалом. Это противоречило бы наблюдаемой интерференции, т. е. тому факту, что фотоны выходят в луче 3 и не появляются в луче 4, хотя оба пути открыты. Если же мы хотим наглядно представить, как происходит интерференция, нам придется представлять себе волну, которая расщепляется полупрозрачным зеркалом и распространяется обоими путями.

Эти два способа описания — расщепленная волна, способная интерферировать, и фотон, который по закону случая пропускается или отражается, называются $двумя принципиальными аспектами$ одной и той же вещи (по терминологии Нильса Бора). Физик должен выбрать одно из этих описаний в конкретной экспериментальной обстановке. Работе с интерферометром соответствует волновая картина; если для обнаружения фотона используется один или два — по одному в каждом луче — детектора, тогда удобно представление о фотоне. Но существуют промежуточные условия (на которых мы не станем останавливаться), когда ни одна из этих картин не адекватна и без помощи «тяжелой артиллерии» математического аппарата квантовой теории обойтись вообще нельзя.

Дискуссия далее переносится на такую проблему: можно ли зарегистрировать фотон в том или ином луче без поглощения этого фотона? Это оказывается возможным (по крайней мере в мысленном опыте). Например, фотон, входящий в стеклянную пластинку, меняет свой импульс от h/λ до $h/n\lambda$; разность $(n-1)h/\lambda n$ передается стеклу и придает ему скорость $(n-1)h/\lambda M n$. Через интервал времени ah/c пластинка останавливается снова, когда фотон из нее выйдет. Иными словами, как заметил Боб, пластинка сместится на расстояние $(n-1)ah/cM\lambda$.

Но даже в том случае, когда фотон не поглощается, мы теряем возможность наблюдать интерференцию. Согласно принципу неопределенностей Гайзенберга, неопределенность скорости стеклянной пластинки будет составлять $\Delta v = \Delta p/M = h/Ms$, если положение пластинки известно с точностью s . Эта неопределенность в скорости влияет на время, которое фотон пребывает в пластинке, а значит, и на фазу его волны. Этого сдвига фазы как раз достаточно для возникновения другой неопределенности — пойдет ли фотон в луче 3 или в луче 4. Итак, еще раз, если мы регистрируем, локализуем фотон в пространстве, то мы уже не можем наблюдать интересующее нас явление — интерференцию, из-за которой Джим верит в расщепление фотона.

В этом пункте хитроумный Боб выдвинул идею о подвижном зеркале. Однако его надежды на то, что при помощи специальной подвески можно и фотон зарегистрировать, и интерференцию сохранить, рушатся. Все же у него остается некоторый выбор: он может измерять импульс зеркала (например, отражая длинноволновый фотон от зеркала и определяя изменение длины его волны по эффекту Допплера) еще до возвращения фотона от одного из двух угловых зеркал, чтобы узнать путь фотона; если же он ничего не предпринимает, зеркало будет качаться, не нарушая интерференции. Это — настоящая модель парадокса Эйнштейна — Подольского — Розена, обративших внимание (в своей математически обоснованной статье 1935 г.) на тот факт, что можно представить себе условия, при которых можно измерить импульс или положение данной частицы «без физического воздействия на частицу». Однако последнее утверждение (в кавычках) не означает никакого парадокса, поскольку мы считаем, что «одна и та же вещь» — фотон, падающий на полупрозрачное зеркало, —

требует двух совершенно разных описаний в зависимости от того, как поставлен опыт — для локализации фотона в пространстве, или для наблюдения интерференции (Бор, 1935 г.) В зеркале Боба со специальной подвеской нет ничего нового; это просто конкретный пример, в котором нелегко разобраться. Более отчетливые формы того же парадокса сформулированы Фюрри, Дике и Виттке, Фришем. О них-то и хотелось поговорить Джиму. Однако на этом я оборвал дискуссию.

Быть может на наиболее важное заключение наталкивает настойчивость Боба, утверждающего, что «любой обратимый процесс можно обратить», стоит только проявить достаточно изобретательности. Это важное заключение сводится к тому, что измерение нельзя считать совершившимся, пока не произойдет некоторый необратимый процесс, наподобие взаимодействия фотона с зерном фотопластинки. Вспомним, что Том сказал: «Измерение создает информацию, а информация соответствует некоторому состоянию — машины или организма, изменившемуся после ее запоминания. Это изменившееся состояние возникает в некоторый момент и должно сохраняться». Теснейшая связь между информацией и необратимостью уже не раз подчеркивалась Бриллюэном.

Главное заключается в том, как подчеркнул Рой, что мы не должны спрашивать, что происходит с квантовой системой между измерениями. Квантовая теория говорит о том, как использовать доступную информацию для предсказания информации, доступной в будущем. Существуют (согласно Дж. фон Нейману) аргументы в пользу того, что предсказания этой теории не могут быть улучшены. И все же я не могу отделаться от чувства некоторой неудовлетворенности, поскольку мне неясна граница раздела между необратимыми взаимодействиями, которые создают (хотя бы потенциально) информацию и в этом смысле являются «реальными», и теми взаимодействиями — наподобие взаимодействия между фотоном и полупрозрачным зеркалом, — которые не создают информации и являются (в этом смысле) «нереальными», требующими различного описания в различных условиях.

Что же касается последнего предположения Тома насчет возможной модели, с точки зрения которой наши нынешние идеи о волнах и фотонах — просто плоские проекции, наподобие теней на стенах платоновой пещеры, то она довольно привлекательна, хотя такие модели мне неизвестны.

О. Фриш

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. N B o h r, Phys Rev 48, 696 (1935)
2. N B o h r, A S c h i l p p, Einstein: Philosoph — Scientist, 1951.
3. L B r i l l o u i n, Science and Information Theory (Academic Press), 1956 (имеется русск. перев. «Наука и информация», М, ИЛ, 1960) L B r i l l o u i n, Science and Information Theory (Academic Press, 2nd edition), 1962 L B r i l l o u i n, Scientific Uncertainty and Information (Academic Press), 1964 (имеется русск. перев. «Научная неопределенность и информация», М, «Мир», 1966).
4. R. H. D i c k e and J. P. W i t t k e, Introduction to Quantum Mechanics, стр. 120 (Addison Wesley), 1960.
5. A E i n s t e i n, B P o d o l s k y and N. R o s e n, Phys. Rev. 47, 777 (1935).
6. O. R. F r i s c h and M. B u n g e, The Critical Approach to Science and Philosophy (Macmillan) (a celebration volume for Karl Popper's 60-th birthday).
7. W. H. F u r r y, Phys. Rev. 49, 393, 476 (1936)
8. G. I. T a y l o r, Proc. Cambridge Phil. Soc. 15, 114 (1909).