

Путенихин П.В.

Границы теории относительности

Путенихин Петр Васильевич

**Границы
теории относительности**

г.Саратов,
Типография "АМИРИТ"
2018 год

ББК 22.313, 22.314, 22.62
УДК 521.1, 530.12, 530.145.1

Путенихин П.В.

П90 Границы теории относительности. – Саратов: "АМИ-РИТ", 2018. – 116 с., илл.
ISBN 978-5-907035-65-2

Насколько обоснованы утверждения, что из-под горизонта событий Чёрной дыры нельзя не только уйти, но даже послать наружу световой или радиосигнал? Существуют ли вращающиеся Чёрные дыры? Или с зарядом? Действительно ли вся наша Вселенная – это всего лишь голограмма, некая информация "размазанная" по поверхности горизонта событий Чёрной дыры? Ускоренно или замедленно расширяется Вселенная? И, наконец, расширяется ли она вообще? Автор попытался найти обоснованные ответы на эти вопросы, и найденные им ответы оказались совершенно неожиданными.

Книга рекомендуется ведущим специалистам и преподавателям в областях физики и космологии, а также всем, кто интересуется этими науками и имеет некоторые начальные знания. Следует воздержаться от чтения данной книги студентам и аспирантам при подготовке к экзаменам по соответствующим предметам: изложенные в книге доводы во многом противоречат официальной науке.

© П.В.Путенихин, 2018
putenikhin.peter@gmail.com
peter.putenikhin@mail.ru

ISBN 978-5-907035-65-2

© Типография "АМИРИТ", 2018

Квантовые проблемы теории относительности

Квантово-релятивистский эксперимент

С момента своего появления специальная теория относительности вызвала в обществе большой интерес, хотя на первых порах и не была единодушно принята. Тем не менее, со временем она заняла ведущие позиции в научном знании, став одной из доминирующих физических теорий. Хотя более чем через век после своего появления она по-прежнему подвергается многочисленным атакам противников, реальных физических оснований для её опровержения представлено не было.

Наиболее серьёзные возражения формулировались на основе сверхсветовых парадоксов. Теория основана на постулате об инварианте скорости света, которые прямо ведёт к её предельности. Никакие сигналы не могут передаваться быстрее скорости света. Однако теоретические исследования допускали существование в природе сверхсветовых частиц – тахионов. Более того, другая фундаментальная и доминирующая физическая теория – квантовая механика – прямо показала, что существует некое подобие сверхсветовой сигнализации. В теоретических вычислениях и в физическом эксперименте было показано, что между квантовыми частицами происходит сверхсветовое информационное взаимодействие. Связанная с ним информация получила название квантовой информации, а явление названо нелокальной связью. Специальная теория относительности подверглась серьёзной критике:

"В сущности, квантовая теория ... Почти во всех отношениях ... противоположна теории Эйнштейна. ... эти две теории – враждующие противоположности" [8, с.112].

На первых порах эти противоречия удалось нивелировать, поскольку квантовая информация, связывающая запу-

таные частицы, оказалась неуловимой. Тем не менее, хотя сверхсветовая передача классической информации с помощью запутанных частиц пока считается невозможной, тем не менее, даже эта неуловимая квантовая информация позволяет показать отсутствие, по меньшей мере, лоренцева замедления времени. В специальной теории относительности возникли проблемы.

Для их устранения и спасения теории стали вырабатываться различные механизмы. Появилось множество статей, посвященных тахионам и нелокальности, что тахион лоренц-инвариантен, что он не противоречит теории относительности и на него можно распространить её формализм. Поскольку неизбежные причинные парадоксы все-таки скрыть не удалось, появился принцип реинтерпретации (переключения) и другие антинаучные механизмы – мнимая масса, отрицательная энергия, опережающая причинность, тахионная механика.

Однако сверхсветовые, нелокальные проблемы специальной теории относительности видны не только в так называемых общефизических принципах: движении в обратном направлении времени, нарушении причинности, использовании событий, не имевших места. Сверхсветовая квантовая информация, даже будучи в настоящее время физически недоступной для регистрации, явным образом, в эксперименте позволяет поставить под сомнение главные выводы специальной теории относительности – преобразования Лоренца.

Наглядно продемонстрировать противоречие между квантовой механикой и СТО можно в *мысленном эксперименте*, который, опираясь на данные реальных физических экспериментов Аспекта, показывает, что вопреки положениям СТО часы в движущихся друг относительно друга ИСО идут *синхронно*. Соберём экспериментальную установку из трёх ИСО: лабораторной (неподвижной) и двух ИСО А и В, движущихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями относительно неподвижной ИСО.

Движение двух ИСО А и В с точки зрения неподвижной ИСО происходит в сторону источника запутанных фотонов S

с одинаковой удаленности от него таким образом, что фотоны ν_1 и ν_2 из каждой пары достигают каждый своей ИСО одновременно. На рисунке 1 ракетные двигатели у платформ ИСО А и В показаны условно, чтобы продемонстрировать их движение. После разгона платформ двигатели отключаются, и платформы движутся равномерно прямолинейно.

Мы производим линейные измерения поляризации этих двух фотонов анализаторами I и II. Анализатор I в направлении a (движение фотона влево) снабжен двумя датчиками и дает результаты + или -, если встречена линейная поляризации параллельная или перпендикулярная к a. Анализатор II в направлении b (движение фотона вправо) действует аналогично. Принцип действия анализаторов основан на изменении направления движения фотона в канал плюс или минус в зависимости от его поляризации. На выходе каналов стилизовано изображены датчики с пометками плюс и минус. Можно заметить, что установка в общих чертах соответствует мысленному эксперименту Эйнштейна-Подольского-Розена-Боба с фотонами, приведенному в статье Алена Аспекта.

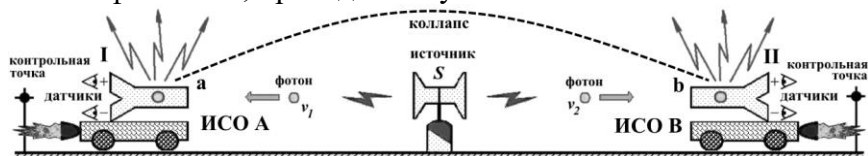


Рис.1. Две движущиеся ИСО и обмен фотонами

Источник запутанных фотонов S неподвижен и фотоны из каждой пары с его точки зрения приходят в движущиеся ИСО одновременно. Строенные стрелки-молнии указывают на точки, в которых находились фотоны в момент коллапса волновой функции.

Допустим, что скорость сближения двух ИСО равна приблизительно $0,86c$, что соответствует релятивистскому замедлению времени в 2 раза. Расстояние между ИСО А и В выбираем таким, что каждая из ИСО достигнет источника фотонов S через 2 часа. Каждый из фотонов ν_1 и ν_2 достигает соот-

ветствующего измерителя I или II, в котором происходит его измерение, в результате чего волновая функция $\Psi(1,2)$ системы запутанных фотонов коллапсирует. Дуговой штриховой линией коллапса на рисунке условно показана нелокальная связь частиц, условный путь передачи так называемой квантовой информации. При этом частицы приобретают собственные состояния (на рисунке это условно показано строеными молниями). При этом невозможно определить, какая из частиц первой приобретает собственное состояние вследствие взаимодействия с измерителем, а какая – вследствие полученного сигнала от другой, парной частицы.

Измерения

В момент, когда каждая из ИСО А и В поравнялись с контрольными точками в неподвижной ИСО, изображенными по краям рис.1 жирными точками с крестиком, показания их таймеров (часов) сбрасываются в ноль – этот момент считается началом отсчета. При этом с точки зрения, например, ИСО В, считающей себя неподвижной, показания часов А становятся равны 1 часу (то есть, установлены в будущее), как показано на рис.2а:

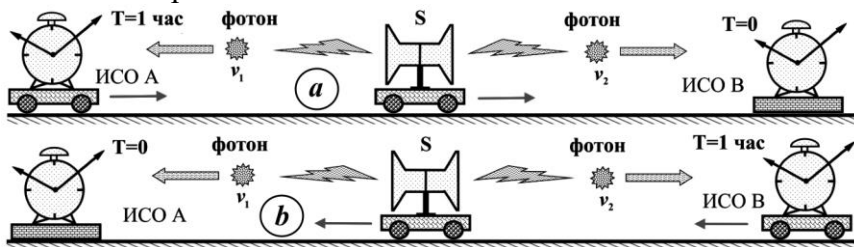


Рис.2. Картина движения с разных точек зрения

Напротив, в соответствии со специальной теорией относительности, с точки зрения ИСО А, также считающей себя неподвижной, в момент синхронизации часов при совмещении с контрольной точкой в лабораторной ИСО в показания 1 час установлены часы ИСО В, как показано на рис.2б.

Поскольку каждая ИСО находится на удалении от источника фотонов S в 2-часах пути, то с точки зрения каждой из этих ИСО она будет находиться в пути ровно 2 часа. При этом с точки зрения этих же ИСО часы другой из них идут медленнее в 2 раза, поэтому показания таймеров (часов) в этих движущихся ИСО равны, соответственно, 1 час (исходное время). В момент встречи они покажут +1 час (время в пути с учетом замедления темпа хода часов) = 2 часа. То есть, нет никаких расхождений в показаниях часов, всё соответствует положениям СТО.

В процессе движения в каждой из ИСО производятся измерения поступающих от источника S запутанных фотонов. При этом результаты измерений заносятся на условную бумажную ленту в три колонки. В первой колонке записывается результат измерения канала "плюс" собственного измерителя, во второй колонке – результат измерения канала "минус", в третьей колонке – показания таймера (часов), когда была сделана запись. Если фотон был зарегистрирован в соответствующем канале, то делается запись "плюс", если фотон не зарегистрирован в этом канале (но зарегистрирован в противоположном канале), то запись "минус". Для второй колонки (второго канала), соответственно, наоборот. То есть, в каждой строке всегда будет присутствовать один знак плюс и один знак минус, поскольку фотон может быть зарегистрирован только в одном из каналов.

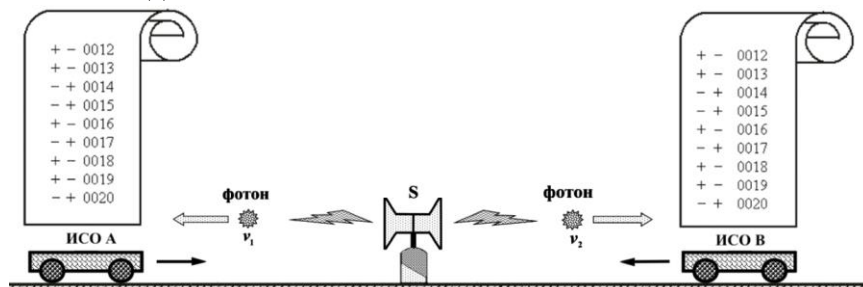


Рис.3. Формирование сигнатур на бумажных лентах

Будем использовать запутанные частицы в состоянии Белла $\phi^+ = 1/\sqrt{2}(|00\rangle + |11\rangle)$, когда в результате коллапса обе квантовые частицы будут находиться в тождественных состояниях. В этом случае в соответствии с квантово-механическим формализмом и экспериментально подтверждёнными свойствами запутанных частиц две записи: на ленте А и на ленте В будут тождественными. То есть первая и вторая колонки на ленте А будут соответствовать тождественно таким же колонкам ленты В, поскольку оба фотона запутанной пары имеет одинаковую поляризацию.

А каковы будут при этом записи в третьих столбцах, колонках лент? Эти показания также будут в точности одинаковыми. Первой причиной является симметрия системы. С точки зрения неподвижной ИСО каждый фотон из запутанной пары приходит в ИСО А и ИСО В одновременно. То есть с её точки зрения, когда фотон ν_1 зарегистрирован измерителем I, в такой же самый момент будет зарегистрирован измерителем II и фотон ν_2 . При этом для каждого момента времени по часам неподвижной ИСО с её точки зрения показания часов ИСО А и В тождественно равны. Следовательно, в каждой из двух ИСО будет зарегистрирован фотон, время регистрации которого по часам этих ИСО будет одним и тем же. Таким образом, мы приходим к выводу, что записи на каждой из лент А и В будут тождественны.

Анализ результатов

Когда две ИСО сойдутся в точке размещения источника запутанных фотонов S, будут получены две ленты с записями наблюдателей А и В. Как было показано, эти ленты являются тождественными. Это означает, что с точки зрения каждой из ИСО были получены соответствующие фотоны из пар в одно и то же время с точки зрения каждой из этих ИСО.

Сразу же бросается в глаза кажущееся противоречие с СТО. Рассмотрим его суть с позиции ИСО А. Как видно из ленты, каждый из фотонов пары поступал в датчик I с интер-

валом в 1 секунду. Но с таким же интервалом второй фотон поступал и в ИСО В. На первый взгляд может показаться, что это означает одинаковый темп хода часов в ИСО А и ИСО В с точки зрения ИСО А. На самом же деле СТО даёт этому простое объяснение: хотя часы в ИСО В идут в два раза медленнее, но и фотоны прибывают в неё в два раза реже, поскольку интервалы в ИСО В также сокращены в два раза. Поскольку расстояния в ИСО В с точки зрения ИСО А укорочены в два раза, то в интервал между двумя фотонами помещается два отрезка ИСО В, что соответствует в два раза более редкому поступлению фотонов в ИСО В. Но поскольку часы ИСО В с точки зрения ИСО А идут также в два раза медленнее, то и показания часов, фиксирующих прибытие фотонов, будут такими же, как и в ИСО А. То есть, формально равенство записей лент А и В здесь не противоречит СТО.

Рассмотрим полученные результаты с учетом положений квантовой механики. С позиции неподвижной ИСО S оба фотона ν_1 и ν_2 из пары прибывают в измерители А и В одновременно. Поэтому коллапс волновой функции пары происходит "по вине" одного из фотонов, которым может быть любой фотон из пары.

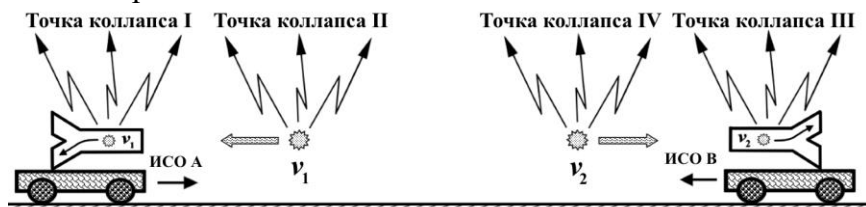


Рис.4. Точки коллапса фотонов по мнению разных ИСО

В соответствие с СТО в момент, когда с точки зрения ИСО А один из фотонов пары был первым зарегистрирован её измерителем, другой фотон находился на большем удалении от ИСО В. Действительно, с её точки зрения ИСО В находится на большем удалении от источника S (в два раза), чем ИСО А, поскольку двигалась меньшее время (в два раза), поэтому и достигнет он её в два раза позднее. Это означает, что

когда фотоны получили собственные состояния, один из них находился в измерителе ИСО А (точка коллапса I), а другой – на подлете к ИСО В (точка коллапса IV) – рис.4:

На первый взгляд никакого противоречия нет: фотон v_1 получил своё состояние вдали от ИСО В (точка коллапса IV), затем прибыл в неё и был зарегистрирован в соответствующем канале измерителя В. В этом случае будет наблюдаться описанная выше картина на лентах А и В – тождество (или симметрия). Тем не менее, возникает парадокс. Оказывается, фотон не может получить своё состояние нигде, кроме как вблизи от измерителей – в точках коллапса I и III.

Парадокс коллапса волновой функции

Рассмотрим теперь описанную картину с точки зрения неподвижной ИСО S. Вследствие симметрии системы мы явно наблюдаем: оба фотона получили своё состояние вблизи от своих измерителей. Только там и нигде более, это очевидное обстоятельство. Что означает "вблизи"? В экспериментах по квантовой нелокальности точность фиксации местоположения фотона достигала от долей до единиц метров. Этого более чем достаточно для наших целей.

Но эти рассуждения проделаны для неподвижной, средней ИСО S. Справедливы ли они для ИСО А и ИСО В? Рассмотрим событие "Проецирование фотона в собственное состояние". Это событие имеет две особенности. Первая: не существует никаких физических средств выяснить, в каком состоянии находится фотон. Второе: собственное состояние фотон приобретает либо в процессе измерения, либо при измерении своей запутанной пары. То есть момент времени, когда фотон получает своё состояние, может быть однозначно зафиксирован. Процесс измерения фотона – это зависимое от места событие. Выше мы умышленно привязывали это событие не просто к месту в Пространстве-Времени, а к другому событию – измерению. Измерение фотонов происходит в измерителях А или В. То есть, два события: упомянутое "Про-

ецирование фотона в собственное состояние" и "Измерение фотона в измерителе А или В" - это два события (из четырех), пространственное расстояние между которыми равно нулю, они происходят в одной точке пространства. А из этого следует вывод СТО: если два события произошли в одном и том же месте с точки зрения одной ИСО, то это справедливо и для любой другой ИСО. Можно сказать и проще: если событие произошло в некотором физическом месте, связанным с каким-либо материальным телом, то это справедливо для любой ИСО. Вопрос относительности одновременности в данном случае значения не имеет, поскольку речь идет именно о *месте* состоявшегося события. В принципе существуют ИСО, в которых это событие ещё не наступило, но когда наступит, то произойдет оно именно в этом месте.

С учетом этих обстоятельств мы приходим к парадоксу: наши рассуждения в рамках СТО показывают, что событие проецирования фотона в собственное состояние для разных ИСО произошло в разных местах – рис.4. С точки зрения ИСО А, фотон ν_2 , зарегистрированный впоследствии измерителем в движущейся ИСО В, получил собственное состояние в точке коллапса IV. А с точки зрения неподвижной ИСО фотон ν_2 получил своё собственное состояние в точке коллапса III. Получается, что СТО *даёт два взаимоисключающих предсказания*. Справедливости ради необходимо подчеркнуть, что эти два взаимоисключающих предсказания получились из предположения, что коллапс волновой функции происходит мгновенно независимо от расстояния между объектами. А мгновенная передача сигнала в СТО невозможна. Но с другой стороны, собственно передачи сигнала не зарегистрировано, и, более того, в квантовой механики введено понятие "нелокальность", чтобы подчеркнуть, что поведение запутанных частиц не связано с передачей классической информации. Для определенности просто ввели новое понятие – квантовая информация.

Еще раз рассмотрим ленты А и В, зарегистрировавшие результаты измерений, с позиции ИСО А. В ИСО А интервал времени между любыми соседними событиями равен

1 секунде. При этом наблюдатели в этой ИСО знают, что мгновенно, на любом расстоянии от них произошли парные события: регистрация вторых фотонов из пар. Причём интервал времени между этими событиями ввиду их мгновенности тоже равен 1 секунде. Наблюдатели в ИСО В уже со своей точки зрения зафиксировали по собственным часам тот же самый интервал – 1 секунду. Но с точки зрения СТО для наблюдателя в ИСО А часы в ИСО В идут медленнее в два раза, поэтому интервал в ИСО В "видится" наблюдателю в ИСО А в два раза короче. Измерения же определенно показывают: интервалы равны! То есть мгновенно переданный из ИСО А в ИСО В сигнал зафиксировал синхронность хода часов этих ИСО. Причём, используя сигнатуру, то есть уникальную, редко повторяющуюся последовательность сигналов на лентах А и В мы обнаружим, что абсолютное время их регистрации в точности совпадает для ИСО А и ИСО В. Это означает, что часы этих двух ИСО идут не только синхронно, но и нет никакого лоренцева смещения их показаний. При первичной установке в ноль часов по контрольным точкам лабораторной ИСО показания часов обеих ИСО были равны. Не было смещения показаний движущейся ИСО в будущее по отношению к показаниям часов неподвижной ИСО.

Такие выводы следуют, если принять мгновенность передачи состояния между запутанными частицами. Если признать, что это взаимодействие происходит со скоростью света, то парадокс для СТО исчезает. Но возникает противоречие с квантовыми экспериментами Алена Аспекта, которые показали, что влияние между частицами происходит со сверхсветовой скоростью. Слабым выходом из положения могло бы быть признание того, что релятивистские эффекты являются математическим формализмом, *кажуцимися* явлениями, а экспериментально наблюдаемые релятивистские эффекты вызваны другими причинами. Это относится главным образом к явлению замедления темпа хода часов. В литературе нет описаний наблюдения чистого (классического) СТО-эффекта замедления хода часов. Вывод о его наличии делается на косвенных

основаниях, которые, надо признать, не только логичны, последовательны, но и прекрасно вписываются в экспериментальные результаты. Что касается сокращения длин отрезков, то эксперименты, в которых были зафиксированы инструментально, также не известны: сокращение отрезков – всего лишь вынужденный вывод, логические следствия, которые, тем не менее, прекрасно объясняют многие явления.

То, что описанный мысленный эксперимент, который можно провести как чисто физический, в реальных условиях, противоречит математической теории, является существенным основанием для ограничения применимости теории к реальному миру. Поэтому есть необходимость проведения экспериментов по проверке выполнения в реальности принципа инвариантности скорости света.

Предположение о реальности сверхсветовой частицы опирается, в частности, на то, что для переноса какой-либо информации обязательно требуется её материальный носитель. Для сверхсветовой информации, следовательно, необходим и сверхсветовой носитель, частица. Поскольку существование сверхсветовой частицы отрицать невозможно, следует ожидать, что такой эксперимент явно подтвердит нарушение второго постулата СТО в физической реальности, к которой теория относительности неприменима, то есть, она является чистой математической задачей.

Что такое информация

Логический анализ ряда широко известных физических явлений, имеющих бесспорные, общепризнанные, многократно проверенные экспериментальные подтверждения неизбежно ведет к выводу: *передача сигнала со сверхсветовой скоростью возможна*. Это означает, что современная физика не отвергает возможности создания не только сверхсветового "телеграфа" (радио, телевидения, связи), но не отвергает и материальную телепортацию, то есть перенос (транспортировку) материальных тел в пространстве, минуя промежуточные точки. На настоящий момент считается, что скорость такой передачи не просто сверхсветовая, а мгновенная, расстояния – ничем не ограничены, и эта скорость реально зарегистрирована в экспериментах. Рассмотрим, из чего следуют эти выводы.

Однако вопреки приведённому выше утверждению общепризнано, что движение быстрее света невозможно. Это ограничение скорости движения является одним из следствий специальной теории относительности Эйнштейна – СТО, которая постулировала инвариантность скорости света. Скорость света согласно СТО имеет одно и то же значение во всех ИСО. Кто бы и где бы ни измерял её – все они получают одно и то же значение скорости. В свою очередь инвариантность скорости света ведёт к её предельности. Никакая другая скорость (тел и сигналов) не может её превысить [18]. Это положение является доминирующим в современной физике и считается Законом Природы. Ничто не может его нарушить. Скорость света – это максимум, предел скорости передачи информации. Она лежит в основе так называемого "локального реализма" Эйнштейна:

"Но одно предположение представляется мне бесспорным. Реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отделённой от неё системой S_1 " [19, с.290].

"... так как во время измерения эти две системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой системой, во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений" [19].

Однако наряду с СТО существует ещё одна доминирующая физическая теория – квантовая механика. Вспомним, что в квантовой механике известно явление "запутанности", "сцепленности". Суть его состоит в том, что две отдельные "запутанные" частицы, каждая из которых находится в состоянии суперпозиции, представляют собой единый объект. Как бы далеко мы не разнесли их – они едины, части одного общего объекта. Но при коллапсе волновой функции (в момент измерения) это единство разрушается, каждая из частиц превращается в самостоятельный объект, у которого появляется своя собственная волновая функция, теперь уже независимая от другой частицы из пары. При этом измерение достаточно произвести только над одной частицей, любой из пары частиц. Например, пропустив один из фотонов пары через поляризатор. В этом случае оба фотона получают определенные поляризации, а волновая функция "схлопнется" (коллапсирует). Вторая из частиц, над которой пока не производилось никаких измерений, словно бы получает некую "квантовую информацию" от первой частицы из пары, принимая соответствующее ей состояние. Частицы при этом получают определённые поляризации, определяемые их исходной, совместной волновой функцией. Считается, что этот процесс происходит мгновенно и на любом расстоянии между частицами.

Но что представляет собой эта загадочная "квантовая информация"? Можно ли её зарегистрировать? И вообще, что это такое – информация в самом общем смысле? Ответ на этот вопрос нас интересует не в виде некоего академического определения понятия информация, а в том фундаментальном

виде, из которого можно определить её отношение к материи, возможность её существования и переноса независимо от вещественных проявлений материи.

Чтобы понять, что такое информация и как она перемещается, давайте задумаемся над тем, что объединяет, что есть общего между всеми теми примерами, в которых мы видим в той или иной степени информацию. Что мы можем, пусть с натягом, назвать информацией? Например, флэш-карта *содержит* информацию. А книга "Война и мир"? Она тоже содержит информацию. Паспорт содержит? Да. Телевизионный сигнал – содержит. Стук по водопроводной трубе – содержит. Звук рожка на охоте – содержит. Воркование голубей, мурлыканье кошек – содержат. Еле заметный жест человека, улыбка, тень на асфальте, фотография – все содержат ту или иную информацию. Свет далёкой звезды, тепло печки, вкус яблока, цвет помидора – содержат информацию. Камень, лежащий у дороги? Травинка в поле? Куст в саду или дерево в лесу? Пустая кастрюля? Чистый лист бумаги? Физический вакуум в данном объеме? Всё это содержит информацию в том или ином виде. Можно ли вообще привести пример чего-либо, не содержащего информацию? Невозможно. Отсюда можно увидеть, что всё, где *содержится* информация – это *нечто*. Что можно выдвинуть на звание "чистой информации" без носителя? Может быть, примерами отсутствия "*нечто*" как такового, нематериальности являются мысль, озарение, душа, смысл в общем, неопределённом... смысле, содержание, значение, "смешной", "умный", "тайна, покрытая мраком", секрет, намёк, "что Вы имеете в виду?", "образ Онегина в произведении Пушкина", ощущения вообще, чувства, любовь, энергия, красота? Но они сами по себе – информация, и являются такими же принадлежностями *нечто*, в приведённом контексте вполне даже очевидных, материальных, осязаемых. Скажем, время - информация?

"Хорошим примером бестелесности информации является *время*. Оно не имеет физических параметров типа массы или энергии. У времени ясно видна идейная сущность – быть

последовательностью событий. Хотя, разумеется, время существует, потому что существуют материальные события" [10].

То есть, нет материи – нет времени? Да, именно так. Понятие времени не менее сложное, чем понятие информации. Если задуматься о сущности времени и ознакомиться с мнением множества авторов, то выяснится, что оно однозначно не определено. Есть ведь и такое определение у Эйнштейна: "Время – это то, что показывают мои часы". Поэтому объяснение сущности одного неопределённого понятия "информация" через ещё более неопределённое понятие "время" – это прекрасная демонстрация шутки Фейнмана, что любые нуки можно объяснить туками.

Время не обладает таким свойством как существование. То есть, *как субстанция время не существует*. То же самое относится и к пространству. А это сразу же требует признать: фактически ни время, ни пространство не являются информацией и даже не содержат её. Единственная субстанция, обладающая свойством *существования* – это Материя.

Здесь необходимо кратко уточнить сущность используемого понятия материи. Материя – это то, что обладает способностью существовать. Краткая формула Бытия: материя – существует. Материя – это то, что существует. Главное после существования свойство материи – это её изменчивость. Изменчивость тождественна движению материи. В процессе движения, изменения материи она проявляет себя в различных видах, формах: вещество, поле и свойствах: пространство, время, энергия. Следует различать материю и вещество – это разные понятия. Хотя с греческого материя и обозначает "вещество", но здесь эти понятия имеют различный смысл. Вещество – это проявления материи.

И время и пространство – это всего лишь отражение, проявления этого свойства Материи, проявления её вещественной формы существования. Вместе с тем время можно считать более фундаментальным *свойством* вещественной формы Материи, чем пространство. Свойство существования Материи можно отождествить с такими понятиями как дви-

жение, изменение, взаимодействие. Только изменяясь, взаимодействуя внутри себя самой, Материя проявляет свойство существования. Не движущаяся в самом широком смысле этого слова, не изменяющаяся Материя не существует. Для нас такое существование, изменение, движение Материи проявляется на чувственном уровне как Время.

Из этого непосредственно следует смысл понятия стрелы Времени. Можно говорить либо об изменениях, либо об отсутствии каких бы то ни было изменений. Эти два состояния можно трактовать в терминах стрелы: стрела указывает наличие изменений, иначе стрелы нет вообще. То есть, об обратном движении или обратном направлении стрелы говорить бессмысленно, поскольку любое изменение – это и есть направление стрелы. Всякое обращение времени также лишено смысла, поскольку любое изменение направления развития процессов по-прежнему – изменение, то есть, движение во времени вперёд. Любое "нечто изменилось" всегда тождественно тому, что "нечто изменилось обратно": и там и там это нечто изменилось. В этом смысле движение в прошлое может рассматриваться как своеобразное движение киноленты в обратном направлении, но это по-прежнему – движение, изменение. Соответственно, логически возможны все без исключения "обратные" процессы: живой организм молодеет вплоть до зародыша; энтропия убывает; тепло от холодного тела передается к горячему; лампочка, подключенная к батарее, улавливает из окружающего пространства фотоны и тепло и возвращает их обратно в батарею в виде электронов, заряжая её; астронавт, упавший под горизонт Черной дыры, благополучно возвращается обратно и тому подобное. Хотя всё это – лишь гипотетические, воображаемые ситуации, несуществующие в реальности, все эти процессы отражают движение времени, изменение, то есть, непрерывную последовательность состояний одно вслед за другим, то есть, всегда – вперёд.

Из этого же следует и двусмысленность понятия симметрии законов физики относительно времени, например, за-

конов механического движения, как и законов, явлений, считающихся явно не симметричными во времени, например, случайных процессов. Эта симметрия не имеет никакого отношения к обращению направления *действительного, абсолютного* Времени как свойства Материи изменяться, двигаться, взаимодействовать.

Очевидно, что аналогично понятию стрелы времени можно ввести понятие стрелы нелокальности, которая фактически является антагонистом стрелы времени. Стрела нелокальности, по сути, является стрелой вещественного (нашего) времени нулевой длины или стрелой времени на уровне Материи. Для нелокальности все события вещественного мира как бы собраны в одну точку. С одной стороны это выглядит как одновременность хода всех мыслимых часов, а с другой низводит релятивистское объединение пространства-времени на уровень чистой математической абстракции, не имеющей никакого материального, вещественного воплощения в реальном физическом мире.

Никакая информация не "витают" просто так в воздухе, она всегда неразрывно привязана к своему носителю – материальному образованию. В работе "Вселенная разумная" Карпенко приводит следующие слова Д.И.Блохинцева:

"... Какова бы ни была информация, принадлежит ли она сознанию живого существа или, записанная кодом электромагнитных волн, распространяется в пространстве, она всегда воплощена в чем-то материальном, т.е. имеющем импульс, энергию и массу. Ни один опыт не подтверждает возможности передачи информации без ее материального носителя" [9].

Сказано вполне определенно: информация и материя неразделимы, и является веским, строго логичным основанием для отождествления материи и информации.

"В физическом мире (человека) информация материализуется через свой носитель и вследствие ему существует" [5].

Здесь определенно утверждается, что информация существует только в единстве с носителем. Более того, это един-

ство отмечено как материализация информации, то есть, отождествление материи и информации.

"Под информацией необходимо понимать не сами предметы и процессы, а их отражение или отображение в виде чисел, формул, описаний, чертежей, символов, образов. Сама по себе информация может быть отнесена к области абстрактных категорий, подобных, например, математическим формулам, однако работа с ней всегда связана с использованием каких-нибудь материалов и затратами энергии" [6].

Сформулировано не вполне четко, но звучит скорее именно так: информация – это абстракция, но без материи недоступна. Хотя формально предметы и информация противопоставляются, но они неотрывны друг от друга через *материальное* отображение.

"Винер предложил определение: "Информация – это обозначение содержания, черпаемого нами из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приведения в соответствии с ним нашего мышления" [11].

И "обозначение" и "содержание" лишь на первый взгляд не похожи на материю или вещество. Но где оно находится, это "обозначение", в чём? Может оно быть оторвано от носителя? Назови как угодно: обозначение, содержание, изображение, отображение, копия, мысль, наконец, – от материи оторваться невозможно. Даже прямое заявление Винера: "Информация – это информация, а не материя, не энергия" не противоречит этому. Пусть сама по себе – не материя. Но без материи не существует. Действительно:

"Любой материальный объект, любое его свойство, структура и организация содержат информацию о самом себе. Информация – это объективное свойство материи быть определяемой. Содержанием информации, существующей в природе, являются все свойства материальных объектов" [10].

Это неплохое, удобное академическое определение, явно указывающее на неразрывную связь между понятиями информации и материи. Но в глубоком философском смысле оно неполно. Информация постулируется как *свойство*. И при

этом она не только *существует* в природе, но и сама содержит другие свойства. Довольно сложная взаимосвязь: свойство, содержащее свойства. Попытка дать определение понятию "существует" неизбежно ведет к материализации этого существующего объекта. Если информация существует, то она существует именно как материальная субстанция, как одно из проявлений материи. В Википедии определение информации приводится в таком виде:

"Информация существует вне нашего сознания, и может иметь отражение в нашем восприятии только как результат взаимодействия: отражения, чтения, получения в виде сигнала, стимула. Информация не материальна, как и все свойства материи. Информация стоит в ряду: материя, пространство, время, системность, функция, и др. что есть основополагающие понятия формализованного отражения объективной реальности в её распространении и изменчивости, разнообразии и проявленности. Информация – свойство материи и отражает её свойства (состояние или способность взаимодействия) и количество (мера) путём взаимодействия" [4].

Как видим, и здесь информация отнесена к свойствам материи. Свойства материи, в свою очередь, неотделимы от материи, и информация проявляется всегда, в какой бы форме материя не выступала. Более того, можно утверждать, что существует только материя, всё остальное – её свойства, проявления: пространство, время, энергия, вещество и, конечно, информация.

"... формула информации, зафиксированная как открытие в Международной регистрационной палате информационно-интеллектуальной новизны... переводится следующим образом: Информация представляет собой всеобщее свойство взаимодействия материального мира, определяющее направленность движения энергии и вещества" [7].

В этой формуле информация обозначена свойством не материи, а взаимодействия. Несколько двусмысленно, поскольку слово "взаимодействия" можно рассматривать как название провозглашенного свойства. Тем не менее, "свойство

взаимодействия материального мира" можно трактовать только как свойство именно материи, обозначенное как способность взаимодействовать. Следовательно, всеобщность этого свойства делает его неотделимым от материи:

"... материалистическое решение основного вопроса философии требует признания необходимости существования материальной среды – носителя информации в процессе такого отражения. Итак, информацию следует трактовать как имманентный (неотъемлемо присущий) атрибут материи, необходимый момент ее самодвижения и саморазвития" [13].

Информация изначально присутствует во всех материальных объектах, но отрыв её от предающей среды, приемника и передатчика следует признать ошибочным:

"... авторы не могут отвлечься от полной схемы передачи информации, предложенной математиками, и рассмотреть отдельно только источник информации. Ведь он таковой, именно потому, что в нём уже есть информация, существующая без наличия передающей среды и приемника информации" [10].

Только наличие передатчика и приемника актуализирует информацию в том виде, в каком мы её интуитивно представляем. Другим словами, содержание информации однозначно определяется передатчиком и/или приемником и при их отсутствии не имеет даже математического смысла, является пустым понятием для разума, сознания.

Таким образом, размышления над понятием информации, анализ мнений многих авторов, попытки найти любые как обоснованные, так и фантастические определения, приводят к неизбежному выводу, что любая информация – это неотрывная от материи часть, информация – это буквально *материя* в какой-либо из своих форм (вещество, поле, плазма и прочее). Информация немыслима без носителя, не может без него существовать. Если есть информация, то обязательно должен быть какой-либо носитель. Напротив, *любой* носитель (и не только вещественный), обязательно содержит какую-либо информацию. Невозможно представить себе, например, ве-

щественный носитель, то есть, по сути – вещество, который не содержит информации. Любое вещество, поле, энергия, любое *нечто* содержит в себе ту или иную информацию. Только *Ничто* не содержит никакой информации. Можно сказать, что карандаш – это информация, яблоко – это информация, электрон – это информация, фотон, Солнце, Галактика, океан, стакан чая и прочее, прочее, прочее – всё это информация. Заметим, что для информации не обязательно наличие сознания, которое само является информацией. Информация – это проявление материи в какой-либо из её бесчисленных форм.

Итак, неизбежным является вывод, что любая информация неотрывна от материального носителя. Вообразить информацию без материального носителя *невозможно*. Ограничимся приведёнными выше доводами, поскольку это для нас сейчас является главным – признание неотделимости информации в любом смысле от материального носителя, их неразрывное единство. Отсюда неизбежное следствие: передача *любой* информации – это передача, перенос материи в какой-либо её форме. Это относится к понятию информации в самом общем виде, будь то костяшки счет или мистическая "квантовая информация". И, наоборот, передача, перенос материи в *любой* форме – это передача, перенос некоторой информации.

Сущность квантовой информации

Квантовая информация является одной из разновидностей информации, которая "функционирует", проявляется в таких явлениях, как запутанность, квантовая телепортацию и, видимо, интерференция. Что же это за информация? И здесь нас вновь должна интересовать только та часть ответа, из которой можно определить, является ли квантовая информация самостоятельной бестелесной, нематериальной абстракцией, существующей независимо от материи, или она – её неотъемлемое свойство.

Наиболее отчетливо "квантовая информация" проявляется в явлении запутанности. Упрощённо запутанность можно

описать как передачу состояния от одной частицы из пары запутанных частиц к другой частице при коллапсе волновой функции, описывающей их общее состояние. В эксперименте Алена Аспекта поведение запутанных частиц описывается законом Малуса [1]:

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

где:

$P_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ - вероятность обнаружить частицы в "синхронном", синглетном состоянии. Для запутанных фотонов, например, – это обнаружение состояния, когда фотоны имеют одинаково направленные спины;

(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - угол между поляризаторами.

Покажем, какое отношение к квантовой информации имеет это уравнение. Очевидно, что по внешнему виду (1) представляет собой формулу для определения вероятности совместного наступления двух *зависимых* событий. То есть, события "измерение 1-го фотона" и "измерение 2-го фотона" являются *зависимыми*. Эта зависимость событий и означает передачу какой-то информации. Нет и быть не может зависимости событий без передачи информации между этими зависимыми событиями. Использование понятия "нелокальность" в классическом смысле – это столбовая дорога в мистику или, как минимум, в религию. То, что между запутанными частицами не обнаружена передача каких-либо сигналов (волн, полевых влияний и других) говорит лишь о том, что эта информация может быть не классической, не вещественной, тем более что скорость её передачи выше скорости света. При получении информации она может быть преобразована не полностью или не тем способом, каким была создана или закодирована. Поэтому следует ожидать, что квантовая информация может быть "прочитана" в таком "сопутствующем", не в первоначальном виде, не в виде собственно "квантовой информации", а в виде возникшей от её передачи поляризации фото-

нов. Такое сопутствующее считывание квантовой информации из запутанных частиц производил в своих знаменитых экспериментах Ален Аспект, экспериментальную установку которого можно представить в следующем виде:

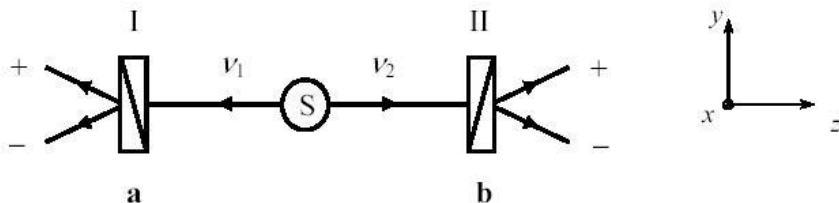


Рис.05. Мысленный ЭПР-эксперимент с фотонами.

Источник S испускает в противоположных направлениях **a** и **b** пары запутанных фотонов v_1 и v_2 в состоянии $|\Psi(1,2)\rangle$, проходящие в дальнейшем через линейные поляризаторы I и II. Можно измерять вероятности одинарного или парного обнаружения в каналах поляризаторов. Свои наблюдения Ален Аспект описывает следующим образом [1]:

"i. Фотон v_1 , который не имел явно определенной поляризации перед ее измерением, получает поляризацию, связанную с полученным результатом, во время его измерения: это не удивительно.

ii. Когда измерение на v_1 сделано, фотон v_2 , который не имел определенной поляризации перед этим измерением, проецируется в состояние поляризации, параллельное результату измерения на v_1 . Это очень удивительно, потому что это изменение в описание v_2 происходит мгновенно, безотносительно расстояния между v_1 и v_2 в момент первого измерения".

В своих экспериментах Аспект использовал пары запутанных частиц, изменяя состояние которых, он фиксировал это сверхсветовое взаимное влияние состояния одной частицы на состояние другой. Здесь мы видим кажущееся противоречие между квантовой механикой с её мгновенным коллапсом волновой функции (нелокальностью) и СТО, которая не допускает сверхсветовой скорости передачи информации. Про-

тиворечие кажущееся, поскольку собственно передачи информации в классическом смысле здесь нет.

Как можно объяснить такое поведение фотонов? Только ли зависимостью между ними? Может быть это случайное совпадение? Сказать-то так можно... Только это такая случайность, вероятность которой равна единице. А такое событие в теории вероятности называется достоверным. Более того, из теории вероятности известно, что если вероятность одного из событий зависит от наступления или не наступления другого, то такая зависимость по определению делает эти два события *зависимыми*. То есть, с точки зрения теории вероятности события по регистрации фотонов являются зависимыми, событиями, связанными причинно-следственными отношениями.

Но, может быть, есть другое объяснение этой загадочной связи? Да, такое объяснение есть, и оно называется нелокальностью. Кратко нелокальность можно описать так: зависимость есть, а связи нет. Такое краткое описание нелокальности не сильно отличается от классического. У нелокальности нет ни физического описания процесса, каковым не является утверждение, что "Сложение волновых функций (амплитуд вероятностей), а не вероятностей (определяемых квадратами модулей волновых функций) принципиально отличает квантовую теорию от классической статистической теории, в которой для независимых событий справедлива *теорема сложения вероятностей*" [14, с.8], ни даже мало-мальски философского обоснования. Коротко и ясно: связи нет, а зависимость есть.

Однако наблюдательный и осведомленный читатель заметит, что в установке Аспекта мы могли бы получить точно такой же результат, если бы фотоны просто имели параллельные поляризации. В этом случае, казалось бы, они всегда парно проходили бы на соответствующие выходы своих поляризаторов. Подобные объяснения дают, в частности, так называемые "теории с дополнительными параметрами". Эти объяснения несложно проверить на установке Аспекта. Мы можем имитировать поведение запутанных фотонов, используя фотоны незапутанные, не имеющие причинно-следственных за-

висимостей в своём поведении. Для такой имитации запутанности необходимо, чтобы каждая пара незапутанных фотонов была бы в такой же "синхронной" поляризации, как и запутанные, и, кроме этого, направление поляризации должно быть у всех пар своё собственное, отличное от других пар. В этом случае, на выходах поляризаторов следовало бы, видимо, ожидать "парные" прохождения фотонов: если один выходит в +канале поляризатора, то и второй обязательно выйдет в +канале своего поляризатора. Для запутанных фотонов – это достоверно так. А вот для имитаций запутанных фотонов – нет. То есть запутанные фотоны имеют более сильную, нелокальную связь, зависимость между собой, чем в общем схожие с ними незапутанные, независимые фотоны.

Анализируя теории с дополнительными параметрами, которые наиболее ярко были провозглашены в так называемом парадоксе ЭПР, Джон Белл пришёл к выводу:

"В квантовой теории с дополнительными параметрами для того, чтобы определить результаты индивидуальных измерений без того, чтобы изменить статистические предсказания, должен быть механизм, посредством которого настройка одного измеряющего устройства может влиять на чтение другого отдаленного инструмента. Кроме того, задействованный сигнал должен распространяться мгновенно так, что такая теория не может быть лоренц-инвариантом" [2].

Это означает, что если квантовые частицы не обмениваются информацией и ведут себя статистически, случайным образом, то такой информацией должны обмениваться измерительные приборы. Но это, как говорится, с больной головы – на здоровую. К тому же и это допущение не позволяет избавиться от обмена информацией, то есть материальным носителем со сверхсветовой скоростью и на любые расстояния.

Носитель квантовой информации

Итак, между квантовыми частицами явно просматривается некоторое информационное взаимодействие. Это взаимо-

действие имеет свои явно выраженные черты, отличные от четырёх других известных взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого ядерных взаимодействий. Частицы, ответственные за эти четыре взаимодействия, известны. Это гравитоны (гипотетическая частица), фотоны, бозоны и глюоны. И все они, несомненно, переносят некоторую информацию. Но к явлению запутанности ни одна из этих частиц явно не причастна, и данных об их регистрации в этом явлении нет. Следовательно, передачу квантовой информации следует закрепить за какой-то особой частицей, дополнив Стандартную модель фундаментальных частиц и взаимодействий ещё одной разновидностью частиц.

Можно предложить варианты её названия и зону "ответственности". Она может называться, например, информино или информинион и отвечать за пятое, информационное взаимодействие. Суть этого взаимодействия – передача некоторых особых, не классических видов информации. Избежать этого удастся вряд ли. Только таким образом можно объяснить явление запутанности, квантовой нелокальности без мистики: допустив существование некоего материального носителя квантовой информации. У такого носителя очевидны следующие свойства. Он движется со скоростью, которая на порядки превышает скорость света, что выделяет его в ряду других переносчиков взаимодействия – фотонов, глюонов и других. Он обладает высокой проникающей способностью, практически не взаимодействует с веществом, что также отличает его от других частиц и затрудняет обнаружение. Неизвестно, взаимодействует ли он с другими "непарными" частицами, то есть не являющимися парой к запутанной частице – источнику.

Этот носитель отчетливо проявляет себя именно в квантовом информационном взаимодействии частиц, поэтому ему можно дать другое название, отражающее его квантовую природу. Это могут быть, например, такие названия: "квантон", "квантинион" или "квантино". Автором последнего названия, вероятно, является А.И.Вейник, неоднократно упоминавший эту частицу в своих работах:

"... скорость квантино ... может изменяться от нуля до бесконечности. ... Кванты, или мировые постоянные, излучают и поглощают поле (квантино)" [3].

Остановимся пока на последнем названии – квантино. О попытках обнаружить квантино пока ничего не известно. Тем не менее, существование такой частицы кажется очевидным.

Очевидно, что обнаружение квантино и разработка средств их регистрации имеет далеко идущие перспективы. Это создание систем передачи информации с невообразимо высокой скоростью. Это создание устройств транспортировки (перемещения) материальных объектов – телепортация, в частности, межзвёздная. Во всяком случае, всё это не противоречит рассмотренным положениям квантовой физики.

Нелокальная передача информации

Создание запутанных состояний

Явление запутанности непосредственно следует из математического формализма квантовой механики. В соответствии с первым постулатом квантовой механики состояние квантовой частицы полностью описывается её волновой функцией. Однако в некоторых случаях квантовым частицам не удаётся приписать индивидуальные волновые функции, а только одну на всех. Такое состояние частиц названо запутанностью. Это состояние удалось получить на реальных частицах, например, в так называемых процессах параметрического распада, преобразования с понижением частоты (*down conversion*) на специальных кристаллах.

Помимо параметрического распада для получения состояния запутанности можно использовать квантовые гейты CNOT. Математическое описание этого процесса очень наглядно и просто. Рассмотрим его. Схематично гейт CNOT можно изобразить следующим образом:

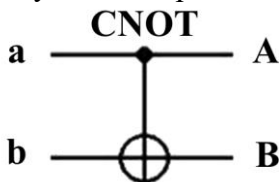


Рис.6. Схема гейта CNOT

Математически этот квантовый оператор описывается выражением:

$$P_{ab}|a,b\rangle = |a, a \oplus b\rangle,$$

где $a \oplus b$ означает логическое сложение по модулю 2.

Как видно из выражения, управляющий сигнал проходит со входа на выход без изменений. Матрица преобразования гейта CNOT имеет вид:

$$|CNOT\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Подадим на управляющий и управляемый входы CNOT два фотона, соответственно, в следующих состояниях:

$$|\psi_a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|\psi_b\rangle = |0\rangle$$

Это состояние системы фотонов на входе гейта будет описываться уравнением и матрицей вида:

$$|\psi_o\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |0\rangle) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + 0|01\rangle + 1|10\rangle + 0|11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

После прохождения фотонов через гейт будет получено новое состояние системы:

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Знак неравенства означает, что на выходе получено запутанное (белловское) состояние фотонов: управляющего и управляемого, поскольку такое состояние не может быть факторизовано, то есть, не может быть представлено как тензор-

ное произведение состояний независимых фотонов. Из этого сразу же следует, что входной управляющий сигнал на выход в неизменном виде все-таки не прошёл.

Состояния квантовых частиц с нелокальными свойствами в квантовой механике известны как состояния полной запутанности – состояния Белла:

$$\begin{aligned} |\phi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle \pm |11\rangle) \\ |\psi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle \pm |10\rangle) \end{aligned} \quad (2)$$

Два из этих состояний в литературе известны под собственными именами: ψ^- – "ЭПР-состояние" и ϕ^+ – "состояние шрёдингеровского кота". Частицы в состоянии запутанности ведут себя как единое целое независимо от расстояния между ними, демонстрируя полную и мгновенную взаимосвязь. Однако приведённые четыре состояния Белла – это лишь часть всех возможных состояний запутанности, их частный случай. Прделаем эти же вычисления с гейтом CNOT с другой парой кубитов:

$$\begin{aligned} |\psi^+\rangle &= \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ |\psi\rangle &= |0\rangle \end{aligned}$$

На входе гейта состояние имеет вид:

$$|\psi^\alpha\rangle \otimes |\psi\rangle = (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes |0\rangle = (\alpha|00\rangle + \beta|10\rangle)$$

Запишем его в виде матрицы:

$$|\psi^\alpha\rangle \otimes |\psi\rangle = \alpha|00\rangle + 0|01\rangle + \beta|10\rangle + 0|11\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ 0 \\ \beta \\ 0 \end{pmatrix}$$

После прохождения выбранных кубитов через гейт CNOT, их состояние будет описываться выражениями:

$$|\psi_1^\alpha\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ 0 \\ \beta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ \beta \end{pmatrix} = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle = |\phi^{\alpha+}\rangle$$

Это явно запутанное состояние, но в более общем виде, чем чистое состояние Белла. Действительно, его невозможно представить в виде тензорного произведения двух кубитов, а это является признаком запутанного состояния:

$$|\phi^{\alpha+}\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Если приравнять $\alpha = \beta = 1$, то есть применить унитарное преобразование – поворот кубитов в пространстве, и нормировать, то мы получим частное значение уравнения – чистое состояние Белла (ЭПР):

$$|\phi_{\alpha=\beta=1}^{\alpha+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\phi^+\rangle$$

Общее, полное состояние запутанности $\phi^{\alpha+}$ – это одно из общих, полных состояний запутанности. Как и чистых состояний Белла, таких общих состояний также четыре:

$$\phi^{\alpha\pm} = \alpha|00\rangle \pm \beta|11\rangle$$

$$\psi^{\alpha\pm} = \alpha|01\rangle \pm \beta|10\rangle$$

В литературе гейт CNOT описывается помимо уравнений также таблицей истинности, в которой, однако, не отражено это свойство гейта – создавать запутанные состояния. То есть, традиционная таблица истинности гейта CNOT неполна и должна быть дополнена строками, отражающими запутанность. В конец полной таблицы состояний гейта CNOT должны быть добавлены две строки, показывающие, что при определённых комбинациях входных сигналов на выходе образуется запутанное состояние, которое не является логическим сложением по модулю 2. Запутанные состояния приведены в общем виде, частным случаем которых являются запутанные состояния Белла ϕ^\pm и ψ^\pm , для которых $\alpha = \beta = 1/\sqrt{2}$.

a	b	A	B
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	1
1	1	1	0
$\alpha 0\rangle \pm \beta 1\rangle$	$ 0\rangle$	$\phi^{\alpha\pm} = \alpha 00\rangle \pm \beta 11\rangle$	
$\alpha 0\rangle \pm \beta 1\rangle$	$ 1\rangle$	$\psi^{\alpha\pm} = \alpha 01\rangle \pm \beta 10\rangle$	

Это дополнение расширяет понятие гейта "Controlled NOT" (CNOT, "управляемое НЕ"), поскольку его управляемый вход при определённых условиях становится управляющим.

Взаимные превращения запутанных состояний Белла

Как видим, существует, по меньшей мере, четыре разновидности запутанного состояния, в общем равноценные. В их дальнейшем анализе мы будем использовать только одно из них – $\alpha|00\rangle + \beta|11\rangle$. Во-первых, это состояние отличается от соответствующего состояния Белла ("состояние шрёдингеровского кота"), что позволяет надеяться на некоторые дополнительные результаты. Во-вторых, три других состояния обладают специфическими свойствами: взаимным превращением друг в друга или инверсией. Это означает, что при повороте в пространстве состояния "шрёдингеровского кота" вид его волновой функции остаётся неизменным:

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Действительно, если пропустить оба фотона пары через соответствующие гейты Адамара, будет получено состояние:

$$|\psi\rangle = H(|\phi^+\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{aligned} &\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \end{aligned} \right) =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) + (|00\rangle - |01\rangle - |10\rangle + |11\rangle) \right) = \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) = |\phi^+\rangle
\end{aligned}$$

Как видим, при повороте фотонов, волновая функция, описывающая их состояние, не изменила своего вида. Практически такая же картина будет наблюдаться и для "ЭПР-состояния":

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle)$$

Пропустив каждый из синглетных фотонов через свой гейт Адамара, мы получим:

$$\begin{aligned}
|\psi\rangle &= H(|\psi^-\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\begin{array}{c} \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) \right) \right) - \\ \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \right) \right) \end{array} \right] = \\
&= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) - (|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle - |11\rangle) \right) = \\
&= -\frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle) = -|\psi^-\rangle
\end{aligned}$$

То есть, при повороте фотонов в ЭПР-состоянии мы получили инверсное "ЭПР-состояние". Но знак минус перед волновой функцией является фазовым множителем, не влияет на результаты измерений и может быть отброшен.

Совершенно иная картина будет наблюдаться при повороте двух оставшихся состояний Белла. Одно из них напоминает состояние "шрёдингерского кота":

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle)$$

Как и фотоны в состоянии шрёдингерского кота, фотоны в этом состоянии при измерении поляризаторами в измерительном базисе будут давать *одинаковые результаты*.

Если один из фотонов каждой из пар будет зарегистрирован в состоянии $|0\rangle$, то и второй также будет зарегистрирован в состоянии $|0\rangle$. Если один из фотонов пар будет зарегистрирован в состоянии $|1\rangle$, то и второй фотон пары тоже будет зарегистрирован в этом же состоянии. То есть, базисные поляризаторы всегда будут давать коллинеарный результат измерений. Однако если повернуть поляризаторы на 45° или, что то же самое, повернуть на этот угол оба фотона пары, мы получим иной результат. После поворота фотонов гейтом Адамара они будут описываться другой волновой функцией:

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle = H(|\phi^-\rangle) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{array}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) - \\ \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \end{array} \right) = \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{2}} ((|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) - (|00\rangle - |01\rangle - |10\rangle + |11\rangle)) = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle) = \psi^+
 \end{aligned}$$

Как видим, после поворота коллинеарное состояние фотонов превращается в синглетное состояние, то есть взаимно перпендикулярные направления поляризации. Если один из фотонов пары будет измерен поляризатором и обнаружен в состоянии $|0\rangle$, то второй фотон пары будет обнаружен в состоянии $|1\rangle$. И наоборот. Фотоны после поворота оказались в ортогональном состоянии запутанности.

Теперь посмотрим, что будет с этой запутанной парой, если её повернуть ещё на 45° . Это также означает: что будет с оставшимся состоянием Белла, если его повернуть на этот же угол:

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle)$$

После прохождения фотонов пары через гейт Адамара, они будут описываться новой волновой функцией (исходной, если считать это двойным поворотом пары):

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle &= H(|\psi^+\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) + \\ \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) \end{array} \right) = \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{2}} ((|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) + (|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle - |11\rangle)) = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle) = |\phi^-\rangle
 \end{aligned}$$

Как видим, если до поворота запутанные фотоны находились в ортогональном (синглетном) состоянии запутанности, то после поворота они (вновь) оказались в коллинеарном состоянии. В первом случае измерение фотонов давало ортогональные поляризации фотонов, во втором (после поворота) – измерения будут давать коллинеарные результаты. Можно предположить, что существует промежуточное положение (угол поворота поляризаторов), в котором фотоны будут демонстрировать вообще отсутствие корреляции!

Для того чтобы избежать возможной необходимости внесения корректив в результаты анализа, мы выбираем самое устойчивое к поворотам состояние запутанности – состояние "шрёдингерского кота" в его расширенном не-белловском варианте: $\phi^{\alpha\beta} = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle$.

Исследование не-белловских состояний

Поведение запутанных частиц является удивительно согласованным, но поведение частиц в не-белловских состояниях имеет некоторые отличия от поведения частиц в чистых состояниях Белла. Чтобы показать это, проведём математическое исследование не-белловских состояний на мысленной экспериментальной установке:

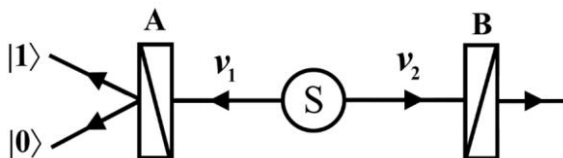


Рис.7. Схема экспериментальной установки

На изображенной установке частицы v_1 и v_2 от источника запутанных фотонов S поступают двум исследователям: А – Алисе и В – Бобу. Алиса, вращая свой двухканальный (расщепляющий) поляризатор, изменяет состояния квантовых частиц на стороне Боба вследствие их запутанности. Не используя классические каналы связи, Боб попытается определить направление поляризатора Алисы. Однако ещё до проведения математического анализа можно сделать очевидное предсказание: никакие действия Алисы не могут создать на стороне Боба состояния, по которым Боб смог бы узнать о действиях Алисы. Рассмотрим волновую функцию не-белловского состояния запутанности, имеющую вид:

$$|\psi\rangle = \alpha|0_A 0_B\rangle + \beta|1_A 1_B\rangle$$

Назовём это состояние "поляризованной запутанностью", поскольку оно напоминает поток фотонов, описываемых вектором, наклоненным под углом с проекциями α и β .

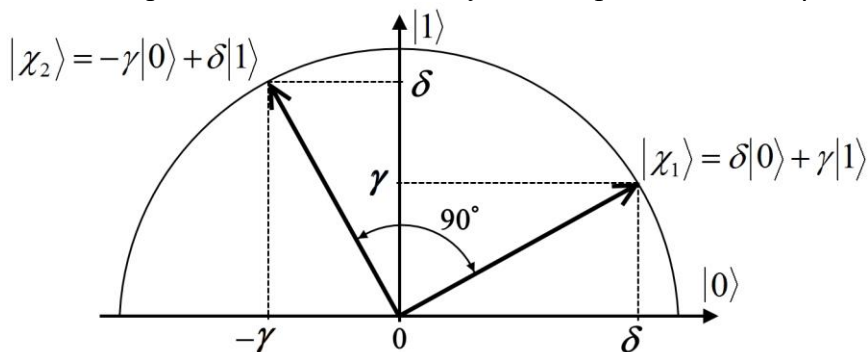


Рис.8. Проекторы Алисы

Эти фотоны измеряет Алиса расщепляющим поляризатором, наклоненным под углом с проекциями δ и γ . Этот поляризатор имеет два ортогональных выхода, описываемые волновыми уравнениями, показанными на рисунке. Проекторы каждого из двух выходов этого измерителя Алисы, следовательно, имеют вид:

$$\begin{aligned} |\chi_1\rangle\langle\chi_1| &= (\delta|0_A\rangle + \gamma|1_A\rangle)(\delta\langle 0_A| + \gamma\langle 1_A|) = \\ &= (\delta^2|0_A\rangle\langle 0_A| + \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| + \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| + \gamma^2|1_A\rangle\langle 1_A|) \\ |\chi_2\rangle\langle\chi_2| &= (-\gamma|0_A\rangle + \delta|1_A\rangle)(-\gamma\langle 0_A| + \delta\langle 1_A|) = \\ &= (\gamma^2|0_A\rangle\langle 0_A| - \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| - \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| + \delta^2|1_A\rangle\langle 1_A|) \end{aligned}$$

Запишем действие этих проекторов Алисы, которое они оказывают только на её фотоны, и упростим выражения с учетом того, что $\langle 1_A|0_A\rangle = \langle 0_A|1_A\rangle = 0$ и $\langle 0_A|0_A\rangle = \langle 1_A|1_A\rangle = 1$. Напомним о тождественности дираковских записей скалярного произведения: $\langle 0|0\rangle \equiv \langle 0|0\rangle$. Вычисляем результат действия первого проектора:

$$\begin{aligned} |\chi_1\rangle\langle\chi_1|\psi\rangle &= \left(\begin{array}{l} \delta^2|0_A\rangle\langle 0_A| + \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| + \\ + \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| + \gamma^2|1_A\rangle\langle 1_A| \end{array} \right) (\alpha|0_A 0_B\rangle + \beta|1_A 1_B\rangle) = \\ &= \delta^2|0_A\rangle\langle 0_A| \cdot \alpha|0_A 0_B\rangle + \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| \cdot \alpha|0_A 0_B\rangle + \\ &+ \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| \cdot \alpha|0_A 0_B\rangle + \gamma^2|1_A\rangle\langle 1_A| \cdot \alpha|0_A 0_B\rangle + \\ &+ \delta^2|0_A\rangle\langle 0_A| \cdot \beta|1_A 1_B\rangle + \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| \cdot \beta|1_A 1_B\rangle + \\ &+ \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| \cdot \beta|1_A 1_B\rangle + \gamma^2|1_A\rangle\langle 1_A| \cdot \beta|1_A 1_B\rangle = \\ &= \delta^2\alpha|0_A\rangle\langle 0_A||0_A 0_B\rangle + \delta\gamma\alpha|0_A\rangle\langle 1_A||0_A 0_B\rangle + \\ &+ \gamma\delta\alpha|1_A\rangle\langle 0_A||0_A 0_B\rangle + \gamma^2\alpha|1_A\rangle\langle 1_A||0_A 0_B\rangle + \\ &+ \delta^2\beta|0_A\rangle\langle 0_A||1_A 1_B\rangle + \delta\gamma\beta|0_A\rangle\langle 1_A||1_A 1_B\rangle + \\ &+ \gamma\delta\beta|1_A\rangle\langle 0_A||1_A 1_B\rangle + \gamma^2\beta|1_A\rangle\langle 1_A||1_A 1_B\rangle = \\ &= \delta^2\alpha|0_A\rangle\langle 0_A||0_A\rangle|0_B\rangle + \delta\gamma\alpha|0_A\rangle\langle 1_A||0_A\rangle|0_B\rangle + \\ &+ \gamma\delta\alpha|1_A\rangle\langle 0_A||0_A\rangle|0_B\rangle + \gamma^2\alpha|1_A\rangle\langle 1_A||0_A\rangle|0_B\rangle + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \delta^2 \beta |0_A\rangle\langle 0_A | 1_A\rangle |1_B\rangle + \delta \gamma \beta |0_A\rangle\langle 1_A | 1_A\rangle |1_B\rangle + \\
& + \gamma \delta \beta |1_A\rangle\langle 0_A | 1_A\rangle |1_B\rangle + \gamma^2 \beta |1_A\rangle\langle 1_A | 1_A\rangle |1_B\rangle = \\
& = \delta^2 \alpha |0_A\rangle \cdot 1 \cdot |0_B\rangle + \delta \gamma \alpha |0_A\rangle \cdot 0 \cdot |0_B\rangle + \\
& + \gamma \delta \alpha |1_A\rangle \cdot 1 \cdot |0_B\rangle + \gamma^2 \alpha |1_A\rangle \cdot 0 \cdot |0_B\rangle + \\
& + \delta^2 \beta |0_A\rangle \cdot 0 \cdot |1_B\rangle + \delta \gamma \beta |0_A\rangle \cdot 1 \cdot |1_B\rangle + \\
& + \gamma \delta \beta |1_A\rangle \cdot 0 \cdot |1_B\rangle + \gamma^2 \beta |1_A\rangle \cdot 1 \cdot |1_B\rangle \\
|\chi_1\rangle\langle \chi_1 | \psi\rangle & = \left(\begin{array}{l} \delta^2 \alpha |0_A\rangle |0_B\rangle + \gamma \delta \alpha |1_A\rangle |0_B\rangle + \\ \delta \gamma \beta |0_A\rangle |1_B\rangle + \gamma^2 \beta |1_A\rangle |1_B\rangle \end{array} \right) = \\
& = \delta^2 \alpha |0_A\rangle |0_B\rangle + \delta \gamma \beta |0_A\rangle |1_B\rangle + \gamma \delta \alpha |1_A\rangle |0_B\rangle + \gamma^2 \beta |1_A\rangle |1_B\rangle
\end{aligned}$$

Покажем, что полученное состояние является тензорным произведением двух состояний:

$$|\chi_1\rangle\langle \chi_1 | \psi\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

Ясно, что на стороне Алисы фотон принял состояние её поляризатора, а на стороне Боба фотон вследствие запутанности перешёл в своё определённое состояние:

$$\begin{aligned}
|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle & = (\delta |0_A\rangle + \gamma |1_A\rangle) \otimes (\kappa |0_B\rangle + \lambda |1_B\rangle) \\
& = \delta |0_A\rangle \kappa |0_B\rangle + \gamma |1_A\rangle \kappa |0_B\rangle + \delta |0_A\rangle \lambda |1_B\rangle + \gamma |1_A\rangle \lambda |1_B\rangle \\
& = \delta \kappa |0_A\rangle |0_B\rangle + \gamma \kappa |1_A\rangle |0_B\rangle + \delta \lambda |0_A\rangle |1_B\rangle + \gamma \lambda |1_A\rangle |1_B\rangle \\
& = \delta \kappa |0_A\rangle |0_B\rangle + \delta \lambda |0_A\rangle |1_B\rangle + \gamma \kappa |1_A\rangle |0_B\rangle + \gamma \lambda |1_A\rangle |1_B\rangle
\end{aligned}$$

Коэффициенты этих состояний находим из соотношения (парные равенства слагаемых):

$$\delta^2 \alpha + \delta \gamma \beta + \gamma \delta \alpha + \gamma^2 \beta = \delta \kappa + \delta \lambda + \gamma \kappa + \gamma \lambda$$

Здесь принесена в жертву математическая строгость - коэффициенты показаны в виде мнемонических сумм лишь для наглядности, на самом деле ни суммирования, ни равенства в этом уравнении нет – его можно рассматривать, как перечисление, в котором запятые не показаны. Правильнее было бы складывать квадраты этих коэффициентов (суммы равны единице), но визуальность существенно хуже. Главное, что

коэффициенты, стоящие в одинаковых позициях, равны. Коэффициенты первого сомножителя нам известны, поэтому из простого сравнения слагаемых находим:

$$\begin{cases} \delta^2 \alpha = \delta \kappa \\ \delta \gamma \beta = \delta \lambda \\ \gamma \delta \alpha = \gamma \kappa \\ \gamma^2 \beta = \gamma \lambda \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \delta \alpha = \kappa \\ \gamma \beta = \lambda \end{cases}$$

После измерения своего фотона Алисой состояние системы Алиса-Боб описывается тензорным произведением волновых функций:

$$|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle = (\delta|0_A\rangle + \gamma|1_A\rangle) \otimes (\delta\alpha|0_B\rangle + \gamma\beta|1_B\rangle)$$

Таким образом, вследствие измерения первым каналом поляризатора фотон Алисы перешёл в состояние $|\psi_A\rangle = \delta|0_A\rangle + \gamma|1_A\rangle$, а запутанный с ним фотон Боба перешёл в состояние (после нормировки):

$$|\psi_B\rangle = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}}|0_B\rangle + \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}}|1_B\rangle.$$

Очевидно, что это относится только к фотонам, которые прошли через первый канал поляризатора Алисы. Оценим величину (долю) от общего числа фотонов, которые прошли через этот канал. Вероятность перехода фотона Алисы в состояние первого проектора найдём по формуле

$$\begin{aligned} P_1 &= |\langle \chi_1 | \psi_A \rangle|^2 = \langle \psi_A | \chi_1 \rangle \langle \chi_1 | \psi_A \rangle = \\ &= (\delta \langle 0_A | + \gamma \langle 1_A |) (\alpha | 0_A \rangle | 0_B \rangle + \beta | 1_A \rangle | 1_B \rangle) \otimes \\ &\otimes (\alpha \langle 0_A | \langle 0_B | + \beta \langle 1_A | \langle 1_B |) (\delta | 0_A \rangle + \gamma | 1_A \rangle) = \\ &= [\alpha \delta | 0_B \rangle + \beta \gamma | 1_B \rangle] \otimes (\alpha \langle 0_A | \langle 0_B | + \beta \langle 1_A | \langle 1_B |) (\delta | 0_A \rangle + \gamma | 1_A \rangle) = \\ &= [\alpha \delta | 0_B \rangle + \beta \gamma | 1_B \rangle] \otimes \left[\begin{array}{l} \delta \alpha \langle 0_A | \langle 0_B | \langle 0_A \rangle + \gamma \alpha \langle 0_A | \langle 0_B | \langle 1_A \rangle + \\ \delta \beta \langle 1_A | \langle 1_B | \langle 0_A \rangle + \gamma \beta \langle 1_A | \langle 1_B | \langle 1_A \rangle \end{array} \right] = \\ &= [\alpha \delta | 0_B \rangle + \beta \gamma | 1_B \rangle] \otimes [\delta \alpha \langle 0_B | + \gamma \beta \langle 1_B |] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \alpha\delta\delta\alpha\langle 0_B \| 0_B \rangle + \beta\gamma\delta\alpha\langle 0_B \| 1_B \rangle + \alpha\delta\gamma\beta\langle 1_B \| 0_B \rangle + \beta\gamma\gamma\beta\langle 1_B \| 1_B \rangle \\
&= \alpha\delta\delta\alpha + \beta\gamma\gamma\beta
\end{aligned}$$

$$P_1 = \alpha^2\delta^2 + \beta^2\gamma^2$$

Теперь рассмотрим второй проектор Алисы:

$$\begin{aligned}
|\chi_2\rangle\langle\chi_2| &= (-\gamma|0_A\rangle + \delta|1_A\rangle) \cdot (-\gamma\langle 0_A| + \delta\langle 1_A|) = \\
&= (\gamma^2|0_A\rangle\langle 0_A| - \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| - \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| + \delta^2|1_A\rangle\langle 1_A|)
\end{aligned}$$

Запишем действие этого проектора, которое он оказывает только на фотоны Алисы, и затем упростим все выражения:

$$\begin{aligned}
|\chi_2\rangle\langle\chi_2|\psi\rangle &= \begin{pmatrix} \gamma^2|0_A\rangle\langle 0_A| - \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| \\ -\gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| + \delta^2|1_A\rangle\langle 1_A| \end{pmatrix} (\alpha|0_A\rangle|0_B\rangle + \beta|1_A\rangle|1_B\rangle) = \\
&= \gamma^2|0_A\rangle\langle 0_A| \cdot \alpha|0_A\rangle|0_B\rangle - \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| \cdot \alpha|0_A\rangle|0_B\rangle - \\
&\quad - \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| \cdot \alpha|0_A\rangle|0_B\rangle + \delta^2|1_A\rangle\langle 1_A| \cdot \alpha|0_A\rangle|0_B\rangle + \\
&\quad + \gamma^2|0_A\rangle\langle 0_A| \cdot \beta|1_A\rangle|1_B\rangle - \delta\gamma|0_A\rangle\langle 1_A| \cdot \beta|1_A\rangle|1_B\rangle - \\
&\quad - \gamma\delta|1_A\rangle\langle 0_A| \cdot \beta|1_A\rangle|1_B\rangle + \delta^2|1_A\rangle\langle 1_A| \cdot \beta|1_A\rangle|1_B\rangle \\
&= \gamma^2\alpha|0_A\rangle\langle 0_A \| 0_A \rangle|0_B\rangle - \delta\gamma\alpha|0_A\rangle\langle 1_A \| 0_A \rangle|0_B\rangle - \\
&\quad - \gamma\delta\alpha|1_A\rangle\langle 0_A \| 0_A \rangle|0_B\rangle + \delta^2\alpha|1_A\rangle\langle 1_A \| 0_A \rangle|0_B\rangle + \\
&\quad + \gamma^2\beta|0_A\rangle\langle 0_A \| 1_A \rangle|1_B\rangle - \delta\gamma\beta|0_A\rangle\langle 1_A \| 1_A \rangle|1_B\rangle - \\
&\quad - \gamma\delta\beta|1_A\rangle\langle 0_A \| 1_A \rangle|1_B\rangle + \delta^2\beta|1_A\rangle\langle 1_A \| 1_A \rangle|1_B\rangle = \\
&= \gamma^2\alpha|0_A\rangle|0_B\rangle - \gamma\delta\alpha|1_A\rangle|0_B\rangle - \delta\gamma\beta|0_A\rangle|1_B\rangle + \delta^2\beta|1_A\rangle|1_B\rangle \\
|\chi_2\rangle\langle\chi_2|\psi\rangle &= \gamma^2\alpha|0_A\rangle|0_B\rangle - \delta\gamma\beta|0_A\rangle|1_B\rangle - \\
&\quad - \gamma\delta\alpha|1_A\rangle|0_B\rangle + \delta^2\beta|1_A\rangle|1_B\rangle
\end{aligned}$$

Покажем, что это полученное состояние также является тензорным произведением двух состояний:

$$|\chi_2\rangle\langle\chi_2|\psi\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

Ясно, что на стороне Алисы фотон принял состояние её поляризатора, а на стороне Боба фотон вследствие запутанности перешёл в своё состояние:

$$\begin{aligned} |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle &= (-\gamma|0_A\rangle + \delta|1_A\rangle) \otimes (\kappa|0_B\rangle + \lambda|1_B\rangle) = \\ &= -\kappa\gamma|0_A\rangle|0_B\rangle - \lambda\gamma|0_A\rangle|1_B\rangle + \kappa\delta|1_A\rangle|0_B\rangle + \lambda\delta|1_A\rangle|1_B\rangle \end{aligned}$$

Коэффициенты этих состояний находим, сравнивая это уравнение $|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$ и уравнение $|\chi_2\rangle \langle \chi_2 | \psi\rangle$ действия проектора на фотоны Алисы (как и выше, здесь коэффициенты показаны в виде сумм лишь для визуального удобства):

$$\gamma^2\alpha - \delta\gamma\beta - \gamma\delta\alpha + \delta^2\beta = -\kappa\gamma - \lambda\gamma + \kappa\delta + \lambda\delta$$

Коэффициенты первого тензорного сомножителя нам известны (это коэффициенты проектора), поэтому из простого сравнения слагаемых находим коэффициенты второго сомножителя:

$$\begin{cases} \gamma^2\alpha = -\kappa\gamma \\ -\gamma\delta\beta = -\lambda\gamma \\ -\delta\gamma\alpha = \delta\kappa \\ \delta^2\beta = \delta\lambda \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -\gamma\alpha = \kappa \\ \delta\beta = \lambda \end{cases}$$

Таким образом, после измерения вторым каналом поляризатора своего фотона Алисой состояние системы Алиса-Боб описывается тензорным произведением волновых функций:

$$|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle = (-\gamma|0_A\rangle + \delta|1_A\rangle) \otimes (-\gamma\alpha|0_B\rangle + \delta\beta|1_B\rangle)$$

Фотон Алисы перешёл в состояние $|\psi_A\rangle = -\gamma|0_A\rangle + \delta|1_A\rangle$, а запутанный с ним фотон Боба перешёл в состояние (после нормировки):

$$|\psi_B^\perp\rangle = -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}}|0_B\rangle + \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}}|1_B\rangle.$$

Ортогональные поляризаторы Алисы создают ортогональные потоки фотонов. Проверим для сравнения, являются ли фотонные потоки на стороне Боба тоже ортогональными. Условием ортогональности является равенство нулю скалярного произведения:

$$\begin{aligned}
\langle \psi_B | \psi_B^\perp \rangle &= \left(\frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 0_B | + \frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} | 0_B \rangle \right) \left(\frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 1_B | + \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} | 1_B \rangle \right) = \\
&= -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 0_B || 0_B \rangle + \\
&+ \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 0_B || 1_B \rangle - \\
&- \frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 1_B || 0_B \rangle + \\
&+ \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \langle 1_B || 1_B \rangle = \\
&= -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \times \frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} + \\
&+ \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \times \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} = \\
&= -\frac{\gamma\delta\alpha^2}{\sqrt{(\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2)(\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2)}} + \\
&+ \frac{\delta\gamma\beta^2}{\sqrt{(\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2)(\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2)}} = \\
&= \frac{\delta\gamma\beta^2 - \gamma\delta\alpha^2}{\sqrt{(\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2)(\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2)}} = \\
&= \frac{\delta\gamma(\beta^2 - \alpha^2)}{\sqrt{(\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2)(\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2)}}
\end{aligned}$$

Как видим, в общем случае на стороне Боба образуются два не ортогональных потока фотонов (смесь). Лишь в случае

базисных измерений Алисы (γ или δ равно нулю) или использования белловского состояния запутанности ($\alpha = \beta$) типа "шрёдингерского кота" на стороне Боба образуются ортогональные потоки фотонов.

Итак, мы нашли волновую функцию фотона, возникающую на стороне Боба, если парный ему запутанный фотон на стороне Алисы пройдёт через второй канал поляризатора. Оценим величину (долю) от общего числа фотонов, которые прошли через этот канал. Вероятность перехода фотона Алисы в состояние второго проектора найдём по формуле

$$\begin{aligned}
 P_2 &= |\langle \chi_2 | \psi_A \rangle|^2 = \langle \psi_A | \chi_2 \rangle \langle \chi_2 | \psi_A \rangle = \\
 &= (-\gamma \langle 0_A | + \delta \langle 1_A |) (\alpha \langle 0_A | \langle 0_B | + \beta \langle 1_A | \langle 1_B |) \otimes \\
 &\otimes (\alpha \langle 0_A | \langle 0_B | + \beta \langle 1_A | \langle 1_B |) (-\gamma \langle 0_A | + \delta \langle 1_A |) = \\
 &= (-\alpha\gamma \langle 0_B | + \beta\delta \langle 1_B |) \otimes (-\gamma\alpha \langle 0_B | + \delta\beta \langle 1_B |) = \\
 &= \alpha\gamma\alpha \langle 0_B | \langle 0_B | - \beta\delta\gamma\alpha \langle 0_B | \langle 1_B | - \alpha\gamma\delta\beta \langle 1_B | \langle 0_B | + \\
 &+ \beta\delta\delta\beta \langle 1_B | \langle 1_B | = \alpha\gamma\alpha + \beta\delta\delta\beta \\
 P_2 &= \alpha^2\gamma^2 + \beta^2\delta^2
 \end{aligned}$$

Для контроля правильности вычислений сделаем проверку. Очевидно, что общая "доля" всей смеси должна быть равна единице:

$$\begin{aligned}
 P_1 + P_2 &= \alpha^2\delta^2 + \beta^2\gamma^2 + \alpha^2\gamma^2 + \beta^2\delta^2 = \\
 &= \alpha^2\delta^2 + \beta^2\delta^2 + \alpha^2\gamma^2 + \beta^2\gamma^2 + \alpha^2\gamma^2 = \\
 &= \delta^2(\alpha^2 + \beta^2) + \gamma^2(\alpha^2 + \beta^2) = 1
 \end{aligned}$$

Следовательно, вычисления произведены корректно. С учетом полученных соотношений составляющих потоков в смеси Боба найдём долю фотонов, прошедших через произвольный поляризатор Боба $|\chi_B\rangle = \kappa|0_B\rangle + \lambda|1_B\rangle$:

$$P_B = P_1 \times |\langle \chi_B | \psi_B \rangle|^2 + P_2 \times |\langle \chi_B | \psi_B^\perp \rangle|^2$$

Подставляем в уравнение известные значения величин и производим последовательные преобразования:

$$\begin{aligned}
P_B = & (\alpha^2 \delta^2 + \beta^2 \gamma^2) \cdot \left(\kappa \langle 0_B | + \lambda \langle 1_B | \right) \cdot \left(\begin{aligned} & \left(\frac{\delta \alpha}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} |0_B\rangle + \right. \\ & \left. + \frac{\gamma \beta}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} |1_B\rangle \right) \end{aligned} \right)^2 + \\
& + (\alpha^2 \gamma^2 + \beta^2 \delta^2) \cdot \left(\kappa \langle 0_B | + \lambda \langle 1_B | \right) \cdot \left(\begin{aligned} & \left(-\frac{\gamma \alpha}{\sqrt{\gamma^2 \alpha^2 + \delta^2 \beta^2}} |0_B\rangle + \right. \\ & \left. + \frac{\delta \beta}{\sqrt{\gamma^2 \alpha^2 + \delta^2 \beta^2}} |1_B\rangle \right) \end{aligned} \right)^2
\end{aligned}$$

Раскрываем внутренние скобки и упрощаем получившиеся выражения с учетом свойств дираковских записей скалярного произведения $\langle 1|0\rangle = \langle 0|1\rangle = 0$ и $\langle 0|0\rangle = \langle 1|1\rangle = 1$:

$$P_B = (\alpha^2 \delta^2 + \beta^2 \gamma^2) \cdot \left(\begin{aligned} & \frac{\delta \alpha}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} \kappa \langle 0_B || 0_B \rangle + \\ & \frac{\gamma \beta}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} \kappa \langle 0_B || 1_B \rangle + \\ & \frac{\delta \alpha}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} \lambda \langle 1_B || 0_B \rangle + \\ & \frac{\gamma \beta}{\sqrt{\delta^2 \alpha^2 + \gamma^2 \beta^2}} \lambda \langle 1_B || 1_B \rangle \end{aligned} \right)^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + (\alpha^2 \gamma^2 + \beta^2 \delta^2) \cdot \left| \begin{array}{l} -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \kappa \langle 0_B \| 0_B \rangle \\ +\frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \kappa \langle 0_B \| 1_B \rangle \\ -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \lambda \langle 1_B \| 0_B \rangle \\ +\frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \lambda \langle 1_B \| 1_B \rangle \end{array} \right|^2 = \\
& = (\alpha^2 \delta^2 + \beta^2 \gamma^2) \cdot \left| \frac{\delta\alpha}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \kappa + \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \lambda \right|^2 + \\
& + (\alpha^2 \gamma^2 + \beta^2 \delta^2) \cdot \left| -\frac{\gamma\alpha}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \kappa + \frac{\delta\beta}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \lambda \right|^2 = \\
& = (\alpha^2 \delta^2 + \beta^2 \gamma^2) \cdot \left| \frac{\delta\alpha\kappa + \gamma\beta\lambda}{\sqrt{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2}} \right|^2 + \\
& + (\alpha^2 \gamma^2 + \beta^2 \delta^2) \cdot \left| \frac{\delta\beta\lambda - \gamma\alpha\kappa}{\sqrt{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2}} \right|^2 = \\
& = (\alpha^2 \delta^2 + \beta^2 \gamma^2) \times \frac{(\delta\alpha\kappa + \gamma\beta\lambda)^2}{\delta^2\alpha^2 + \gamma^2\beta^2} + (\alpha^2 \gamma^2 + \beta^2 \delta^2) \times \frac{(\delta\beta\lambda - \gamma\alpha\kappa)^2}{\gamma^2\alpha^2 + \delta^2\beta^2} \\
& P_B = (\delta\alpha\kappa + \gamma\beta\lambda)^2 + (\delta\beta\lambda - \gamma\alpha\kappa)^2 = \\
& = (\delta\alpha\kappa)^2 + 2\delta\alpha\kappa\gamma\beta\lambda + (\gamma\beta\lambda)^2 + (\delta\beta\lambda)^2 - 2\delta\beta\lambda\gamma\alpha\kappa + (\gamma\alpha\kappa)^2 = \\
& = (\delta\alpha\kappa)^2 + (\gamma\alpha\kappa)^2 + (\gamma\beta\lambda)^2 + (\delta\beta\lambda)^2 = \\
& = (\alpha\kappa)^2 (\delta^2 + \gamma^2) + (\beta\lambda)^2 (\gamma^2 + \delta^2) \\
& P_B = (\alpha\kappa)^2 + (\beta\lambda)^2
\end{aligned}$$

Полученное выражение показывает, что результат измерения Боба, вероятность прохождения фотонов через его поляризатор не зависит от действий Алисы, поскольку не содержит коэффициентов её проекторов. Возьмём, например, запутанные пары в чистом состоянии Белла с проекциями $\alpha = \beta = 1/\sqrt{2}$. Тогда из полученного выражения находим:

$$P_B = \frac{1}{2}\kappa^2 + \frac{1}{2}\lambda^2 = \frac{1}{2}(\kappa^2 + \lambda^2) = \frac{1}{2}$$

Как видим, в этом случае независимо от направления поляризатора Боба через него пройдёт ровно половина от общего числа фотонов, что полностью соответствует формализму квантовой теории.

Теперь возьмём не-белловское состояние запутанных частиц с углом наклона 30° к горизонтали, то есть, с проекциями $\alpha = \sqrt{3}/2$ и $\beta = 1/2$. Тогда из полученного выражения находим:

$$P_B = \frac{3}{4}\kappa^2 + \frac{1}{4}\lambda^2$$

Это означает, что в отличие от белловского, в случае не-белловского состояния запутанности вероятность прохождения фотонов через поляризатор Боба зависит от направления поляризатора. Запутанные фотоны будто имеют некоторое определенное, выделенное направление, являются "поляризованно запутанными". Можно отметить, что точно такой же результат получает и Алиса. Через ортогональные первый и второй каналы её поляризатора, соответственно, пройдут фотоны с вероятностью:

$$P_1 = \frac{1}{4}\gamma^2 + \frac{3}{4}\delta^2 \quad P_2 = \frac{3}{4}\gamma^2 + \frac{1}{4}\delta^2$$

Полученные результаты являются весьма примечательными. Ортогонально-коллинеарное поведение запутанных фотонов является фундаментальной причиной невозможности передачи информации чисто математическими средствами: при любом измерении фотонов на одной стороне образуются два ортогональных потока на другой, причём любой дисбаланс одного из этих потоков всегда компенсируется вторым.

То есть, уменьшение прохождения фотонов одного потока через данный поляризатор будет тождественно восполнено (компенсировано) увеличением прохождения через него же фотонов из ортогонального потока.

Логика и философия нелокальности

Вопрос о полноте квантовой механики, поднятый в 1935 году Эйнштейном, Подольским и Розеном, был решён в пользу квантовой механики. Само явление "пугающего дальнего действия" или вероятностной корреляции, превосходящей классические, получило название нелокальности. Суть её простыми словами можно описать как "частицы не передают друг другу информацию, но ведут себя так, будто они эту информацию передают". К такому противоречивому выводу квантовая теория пришла неизбежно, поскольку стремилась сохранить приверженность теории относительности. Но это не совсем корректная позиция. Действительно, теория относительности – это совершенно другая теория, не являющаяся разделом квантовой теории. Мгновенная передача информации самой квантовой механике не противоречит, не приводит внутри неё ни к каким парадоксам. Мгновенная передача информации противоречит теории относительности. Но причём здесь квантовая механика? Это проблема не квантовой механики, это проблема специальной теории относительности! И решить этот антагонизм двух теорий может только независимый арбитр, стоящий над этими теориями.

Формальная логика не допускает истинности высказываний типа "связь есть, но её нет". В квантовой теории, казалось бы, нашли выход из этого тупика: между частицами передаётся так называемая "квантовая информация", которая отличается от информации классической. Но сама фраза "передаётся нечто" уже требует наличия этого "нечто". Неважно, как его называть "квантовая информация", квантино, тахион или как-либо иначе, вопрос сразу же переходит в философскую плоскость материальности этого "нечто". Можно за-

крыть глаза на это, не вдаваться в эти философские тонкости, но они никуда не исчезают. При любых достаточно глубоких рассуждениях материальность носителя "квантовой информации" неизбежно выходит на передний план. От ответа на этот вопрос о материальности носителя "квантовой информации" уйти невозможно.

Можно привести немало примеров противоречивости нелокальной формулы. Например, предположим, что две монеты всегда выпадают одной и той же стороной. Это нелокальность. Без признания наличия связи между ними невозможно дать логически разумное объяснение такому поведению, только мистическая нелокальность. Или игральные кубики, которые всегда выпадают одинаковым числом вверх. Разумеется, все числа на кубиках выпадают равновероятно, но всегда одинаковые. Можно смело заявить, что не существует разумного логического объяснения этому явлению, если отрицать передачу сигналов от одного объекта к другому. Рассмотрим подробнее ещё одну очень наглядную мысленную демонстрацию, которая отчетливо показывает антилогичность, мистическую сущность нелокальности. Мысленный эксперимент проведём на следующей установке:



Рис.9. Нелокальные кубики

Источник запутанных фотонов S испускает в двух противоположных направлениях одновременно 8 пар запутанных фотонов $v_1 \dots v_8$, которые поступают на 8 соответствующих вращаемых поляризаторов $\Pi_1 \dots \Pi_8$. На выходах поляризаторов установлены, соответственно, по 8 регистраторов, преобразующих прошедшие через поляризаторы фотоны в 8 электрических импульса на каждой стороне установки. Эти импульсы

поступают на двоичный дешифратор полученного двоичного кода в десятичный индикатор, на который выводится полученное число. Каналы на 8 бит позволяют высветить на индикаторах числа от 0 до 255. Поляризаторы вращаются строго синхронно, в любой момент времени располагаясь под одинаковыми углами к горизонту. Волновая функция системы фотонных потоков имеет вид:

$$\begin{aligned}
 |\phi^+\rangle^{\otimes 8} &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \right)^{\otimes 8} = \\
 &= \frac{1}{128} (|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle) \otimes \\
 &(|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle) \otimes (|00\rangle + |11\rangle)
 \end{aligned}$$

Слагаемых после преобразования будет слишком много (256 штук), поэтому покажем только три из них:

$$\left(|\phi^+\rangle \right)^{\otimes 8} = \frac{1}{128} \left(\begin{array}{l} |00000000\rangle |00000000\rangle + \dots + \\ |01010101\rangle |01010101\rangle + \dots + \\ |11111111\rangle |11111111\rangle \end{array} \right)$$

Слагаемые показаны в виде 8-разрядных сомножителей из соображения наглядности: каждый из сомножителей относится к одному из каналов – правому или левому. Эти слагаемые могли быть изображены и в других, тождественных видах, например:

$$\begin{aligned}
 |01010101\rangle &\equiv |0101\rangle |0101\rangle \equiv |01\rangle |01\rangle |01\rangle |01\rangle \equiv \\
 &|0\rangle |1\rangle |0\rangle |1\rangle |0\rangle |1\rangle |0\rangle |1\rangle \equiv \\
 &|0101\rangle \otimes |0101\rangle \equiv |01\rangle \otimes |01\rangle \otimes |01\rangle \otimes |01\rangle \equiv \\
 &|0\rangle \otimes |1\rangle \otimes |0\rangle \otimes |1\rangle \otimes |0\rangle \otimes |1\rangle \otimes |0\rangle \otimes |1\rangle \equiv \\
 &|0101\rangle \cdot |0101\rangle \equiv |01\rangle \cdot |01\rangle \cdot |01\rangle \cdot |01\rangle \equiv \\
 &|0\rangle \cdot |1\rangle \cdot |0\rangle \cdot |1\rangle \cdot |0\rangle \cdot |1\rangle \cdot |0\rangle \cdot |1\rangle \equiv |01\rangle |010101\rangle |01\rangle \equiv \dots
 \end{aligned}$$

Также слагаемые могут быть записаны в следующем виде (кубики А и В):

$$|01010101 \rangle |01010101 \rangle = |0101010101 010101 \rangle = \\ |0_{A^1} 1_{A^0} 0_{A^1} 0_{A^0} 1_{A^1} 0_{A^0} 1_{A^0} 0_{A^1} 0_{B^1} 0_{B^0} 1_{B^0} 0_{B^1} 0_{B^0} 1_{B^1} \rangle$$

После прохождения через поляризаторы и регистраторы на вход дешифраторов поступают бинарные числа (фотон с номером 8 соответствует старшему биту), которые будут преобразованы в десятичные и выведены на индикатор. Например, если через поляризаторы пройдут показанные ниже фотоны, то бинарный и десятичный коды будут иметь следующие значения:

$$v_8 - v_6 - v_4 - v_2 v_1 \Rightarrow 10101011_2 = 171_{10}$$

В уравнении фотоны, не прошедшие через поляризаторы, показаны прочерком. Поскольку все поляризаторы коллинеарны, то независимо от угла их поворота и вследствие попарной запутанности фотонов через одноименные поляризаторы всегда будут парные прохождения: либо оба фотона пары пройдут через свои поляризаторы, либо оба будут ими поглощены. Это означает, что показания двух десятичных индикаторов всегда будут одинаковыми. Все пары независимы друг от друга, между разными парами нет никакой зависимости, поэтому числа на индикаторах всегда будут случайными. Другими словами, мы имеем два удалённых друг от друга числовых табло, на которых появляются случайные числа, но всегда одинаковые, – своеобразные цифровые игральные кубики с 256 гранями. Эта установка позволяет имитировать действительно "нелокальный кубик", в отличие от обычных кубиков или монет, нелокальную связь между которыми установить фактически невозможно. Эти квантовые "нелокальные кубики" будут демонстрировать мгновенную корреляцию, даже если они разнесены на сотни километров, а ИСО, в которых они находятся, удаляются от источника в разные стороны с одинаковыми скоростями.

Теперь попробуем выяснить, почему два удаленных друг от друга индикатора в любой момент времени и на любом расстоянии показывают одно и то же случайное число? Логи-

ка, здравый смысл и материалистическая философия не допускают никакой мистики – такое совпадение возможно, только если между индикаторами есть связь. Всегда, без исключений, когда на одном индикаторе, например, 15, то на втором – обязательно 15. Если на первом – 63, то и на втором – тоже 63. И так для любого числа от 0 до 255. Все эти числа случайны, нет никаких закономерностей их появления, кроме одной: оба индикатора всегда показывают одинаковые числа. Логически можно предположить два объяснения. Первое: это совершенно удивительное совпадение, но, как говорится, так не бывает. Второе: это зависимость одного индикатора от другого, то есть между ними есть связь, передача информации от одного индикатора (поляризатора, дешифратора, фотонов) к другому, на другой стороне.

Заметим, что в рассмотренной схеме "кубик" имеет условные 256 граней, поскольку использованы 8 запутанных пар фотонов. Если взять только 3 пары запутанных фотонов, то каждый из кубиков будет соответствовать реальному телу – октаэдру рис.10. Две пары фотонов позволяют эмулировать пару нелокальных "кубиков" – тетраэдры, а одна пара запутанных фотонов – обычную пару нелокальных монет.

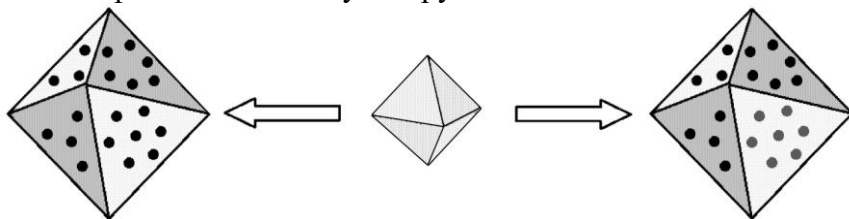


Рис.10. Пара нелокальных кубиков-октаэдров

Однако попытаемся еще раз найти объяснение без привлечения сигналов, которыми обмениваются фотоны или индикаторы. Тогда всё-таки потрясающее совпадение? Все фотоны имеют абсолютно случайные состояния. Вращение поляризаторов приводит к тому, что фотоны достигают их каждый раз со случайным направлением поляризации. Это должно быть очень сильным совпадением: каждый раз одно и то же

число на двух не связанных друг с другом индикаторах. Но теория вероятности отрицает такое совпадение. При увеличении числа измерений вероятность случайных совпадений уменьшается и стремится при наших условиях к близкой нулю величине (2^{-16}). В нашем же случае – всегда полное совпадение показаний индикаторов: на них всегда без исключения высвечиваются одинаковые числа. Следовательно, случайность тоже исключена.

Тогда, может быть, фотоны при генерации всего лишь запоминают свои состояния и при измерении просто их демонстрируют? Такое решение предлагают квантовые теории дополнительных переменных. По сути, это вариация на тему передачи информации. Но в своей знаменитой статье [2] Белл пришёл к выводу для подобных экспериментов ЭПР-типа, что для сохранения статистических (то есть, случайных) результатов индивидуальных измерений необходим сверхсветовой механизм влияния друг на друга удалённых измерителей. То есть, если не фотоны обмениваются друг с другом сигналами, то ими должны обмениваться измерители. Но в чём тогда разница? Что позволено измерителям, должно быть позволено и фотонам! Результат индивидуального измерения одного фотона, несомненно, стохастический, случайный. Поэтому на соответствующем индикаторе нашей экспериментальной установки высветится непредсказуемое, абсолютно случайное число. Этот результат передаётся второму фотону, у которого свой результат измерения безусловно коррелируется с первым фотоном: на втором индикаторе высвечивается то же самое число, что и на первом индикаторе, но при этом автоматически этот результат становится точно таким же *статистическим, вероятностным, случайным*. Если мы, вопреки логике, отказываемся от информационной связи между фотонами, то вывод остаётся только один – мистическая нелокальность.

Квантовая механика не предлагает никакого объяснения явлению такой сильной корреляции (нелокальности), только описывает её проявления. В сущности, нелокальность не является частью квантовой теории, она за пределами этой тео-

рии. Поэтому квантовой механике нет никакого дела до того, мистика это или за ней скрываются какие-либо реальные физические процессы.

Вместе с тем, между запутанными частицами явно просматривается информационная связь, которая *в принципе* не может существовать без физического носителя. Квантовомеханическое, математическое описание этой связи верное, но *никакая информация не может быть передана без физического носителя*, каковым может быть всё что угодно: частица, поле, волна или почтовые голуби. Только выявление этого носителя и создание способов его регистрации может позволить использовать запутанность для передачи информации и дать возможность Бобу без использования классических (досветовых) каналов связи определить, какие действия со своим поляризатором совершала Алиса.

Квантовая телепортация

Телепортация состояния

Общепризнанно и считается аналитически и экспериментально строго доказанным, что никакими измерениями над запутанными парами фотонов информацию передать невозможно. Однако в корректном физическом эксперименте произведена передача квантового состояния от одной частицы к другой. Противоречием это не является, поскольку само по себе квантовое состояние не является информацией классической: её непосредственное измерение в настоящее время физически невозможно. Следовательно, передача информации о квантовом состоянии также не тождественна передаче классической информации. Эта информация получила собственное название: квантовая информация.

Эксперимент по передаче квантовой информации также получил собственное название – квантовая телепортация. При первом знакомстве с нею может создаться ложное впечатление о её сходстве с телепортацией, давно известной из художественной научно-фантастической литературы, то есть, мгновенным перемещением тел, минуя промежуточные положения. Нет, реальная квантовая телепортация не имеет практически ничего общего с научно-фантастической. Неосуществимая пока для материальных тел научно-фантастическая литературная телепортация была осуществлена в реальном физическом эксперименте при передаче *информации* о состоянии квантовой частицы.

Что интересно, явление квантовой телепортации было обнаружено при математических преобразованиях в формализме квантовой информатики, корректность которых впоследствии была подтверждена в эксперименте.

Имеющиеся в литературе математические описания квантовой телепортации приводятся в несколько упрощённом виде, без подробных промежуточных выкладок. Конечно, это хорошо для подготовленного и осведомленного читателя. Но мы попробуем проанализировать математику квантовой телепортации более подробно, чем в литературе. Рассмотрим один из вариантов схемы установки для осуществления такой телепортации. Напомним, что в отличие от традиционной телепортации, в квантовой телепортируется не физический объект, а некие сведения о его состоянии. Мгновенно и на большое расстояние передаётся так называемая "квантовая информация", а конкретно – состояние квантовой частицы – кубита, состояние которого передающему не известно, например, $a|0\rangle+b|1\rangle$. В качестве кубита используется фотон.

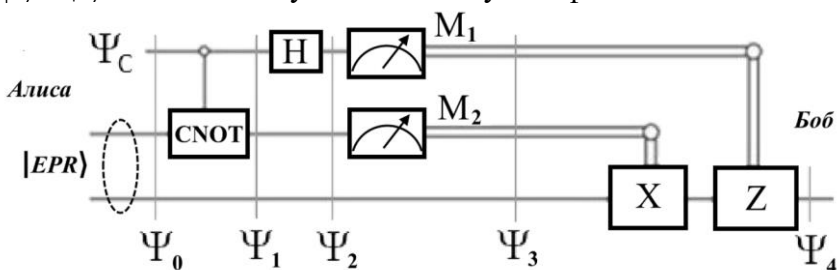


Рис.11. Установка для квантовой телепортации

Элементы: гейт CNOT, гейт Адамара Н и измерители M_1 , M_2 находятся на стороне Алисы, а гейты X и Z - на стороне Боба. В качестве "носителя" традиционно используются запутанные частицы в одном из состояний Белла:

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Одна из частиц запутанной пары остаётся у Алисы, а другая отправляется Бобу. Однако запутанных состояний известно четыре, и все они могут быть использованы в протоколе телепортации. Это чистые состояния Белла (2). Рассмотрим выкладки, использующие все эти состояния. Для этого обо-

значим кубит, состояние которого телепортируется, нижним индексом С, а кубиты, принадлежащие Алисе и Бобу, соответственно, индексами А и В. Тогда состояния кубитов, участвующих в телепортации, будут записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 |\Psi_C\rangle &= \alpha|0_C\rangle + \beta|1_C\rangle \\
 |\Psi^{\phi\pm}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A0_B\rangle \pm |1_A1_B\rangle) \\
 |\Psi^{\psi\pm}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A1_B\rangle \pm |1_A0_B\rangle)
 \end{aligned}$$

Таким образом, для каждого из четырёх протоколов телепортации, в зависимости от используемого состояния Белла – телепортационной "несущей", состояние на входе устройства телепортации будет, соответственно, иметь вид:

$$\begin{aligned}
 |\Psi_0^\phi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|0_C\rangle + \beta|1_C\rangle) \otimes (|0_A0_B\rangle \pm |1_A1_B\rangle) = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}\{\alpha|0_C\rangle(|0_A0_B\rangle \pm |1_A1_B\rangle) + \beta|1_C\rangle(|0_A0_B\rangle \pm |1_A1_B\rangle)\}
 \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}
 |\Psi_0^\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|0_C\rangle + \beta|1_C\rangle) \otimes (|0_A1_B\rangle \pm |1_A0_B\rangle) = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}\{\alpha|0_C\rangle(|0_A1_B\rangle \pm |1_A0_B\rangle) + \beta|1_C\rangle(|0_A1_B\rangle \pm |1_A0_B\rangle)\}
 \end{aligned}$$

Это четыре уравнения телепортации. Кубиты Алисы пропускаются через гейт CNOT, что приводит к изменению состояний запутанной частицы Алисы на управляемом входе гейта. Совместное состояние всех трёх частиц принимает, соответственно, вид:

$$\begin{aligned}
 |\Psi_1^\phi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}\{\alpha|0_C\rangle(|0_A0_B\rangle \pm |1_A1_B\rangle) + \beta|1_C\rangle(|1_A0_B\rangle \pm |0_A1_B\rangle)\} \\
 |\Psi_1^\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}\{\alpha|0_C\rangle(|0_A1_B\rangle \pm |1_A0_B\rangle) + \beta|1_C\rangle(|1_A1_B\rangle \pm |0_A0_B\rangle)\}
 \end{aligned}$$

Далее телепортируемый кубит С Алисы пропускается через гейт Адамара Н, в котором он преобразуется по следующему правилу:

$$\begin{aligned} |0\rangle &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \\ |1\rangle &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда получаем третье состояние (напомним: для всех четырех состояний Белла):

$$\begin{aligned} |\Psi_2^\phi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \alpha \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (|0_{A_B}\rangle \pm |1_{A_B}\rangle) + \right. \\ &\quad \left. \beta \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (|1_{A_B}\rangle \pm |0_{A_B}\rangle) \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \{ \alpha (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (|0_{A_B}\rangle \pm |1_{A_B}\rangle) + \beta (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (|1_{A_B}\rangle \pm |0_{A_B}\rangle) \} \\ |\Psi_2^\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \alpha \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (|0_{A_B}\rangle \pm |1_{A_B}\rangle) + \right. \\ &\quad \left. \beta \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (|1_{A_B}\rangle \pm |0_{A_B}\rangle) \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \{ \alpha (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (|0_{A_B}\rangle \pm |1_{A_B}\rangle) + \beta (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (|1_{A_B}\rangle \pm |0_{A_B}\rangle) \} \end{aligned}$$

Раскроем скобки и перегруппируем кубиты в этом уравнении по их принадлежности Алисе или Бобу (кубиты С и А принадлежат Алисе, поэтому индекс им оставляем общий):

$$|\Psi_2^\phi\rangle = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\alpha |0\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B \pm \alpha |0\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \\ &\alpha |1\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B \pm \alpha |1\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \\ &\beta |0\rangle_C |1\rangle_A |0\rangle_B \pm \beta |0\rangle_C |0\rangle_A |1\rangle_B - \\ &\beta |1\rangle_C |1\rangle_A |0\rangle_B \mp \beta |1\rangle_C |0\rangle_A |1\rangle_B \end{aligned} \right\} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \left\{ +\alpha|00\rangle_A|0\rangle_B \pm \alpha|01\rangle_A|1\rangle_B + \alpha|10\rangle_A|0\rangle_B \pm \alpha|11\rangle_A|1\rangle_B \pm \right. \\
&\quad \left. \pm \beta|00\rangle_A|1\rangle_B + \beta|01\rangle_A|0\rangle_B \mp \beta|10\rangle_A|1\rangle_B - \beta|11\rangle_A|0\rangle_B \right\} \\
&\quad |\Psi_2^{\psi}\rangle = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\alpha|0\rangle_C|0\rangle_A|1\rangle_B \pm \alpha|0\rangle_C|1\rangle_A|0\rangle_B + \\ &\alpha|1\rangle_C|0\rangle_A|1\rangle_B \pm \alpha|1\rangle_C|1\rangle_A|0\rangle_B + \\ &\beta|0\rangle_C|1\rangle_A|1\rangle_B \pm \beta|0\rangle_C|0\rangle_A|0\rangle_B - \\ &\beta|1\rangle_C|1\rangle_A|1\rangle_B \mp \beta|1\rangle_C|0\rangle_A|0\rangle_B \end{aligned} \right\} = \\
&= \frac{1}{2} \left\{ +\alpha|00\rangle_A|1\rangle_B \pm \alpha|01\rangle_A|0\rangle_B + \alpha|10\rangle_A|1\rangle_B \pm \alpha|11\rangle_A|0\rangle_B \pm \right. \\
&\quad \left. \pm \beta|00\rangle_A|0\rangle_B + \beta|01\rangle_A|1\rangle_B \mp \beta|10\rangle_A|0\rangle_B - \beta|11\rangle_A|1\rangle_B \right\}
\end{aligned}$$

Группируем однотипные слагаемые Алисы и в результате получаем (очевидные индексы опускаем и разделяем уравнения на четыре, каждое из которых является телепортационной "несущей" – состоянием Белла):

$$\begin{aligned}
|\Psi_2^{\phi+}\rangle &= \frac{1}{2} \left\{ |00\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle(\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle) + \right. \\
&\quad \left. |10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \right\} \\
|\Psi_2^{\phi-}\rangle &= \frac{1}{2} \left\{ |00\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |01\rangle(\beta|0\rangle - \alpha|1\rangle) + \right. \\
&\quad \left. |10\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |11\rangle(-\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \right\} \\
|\Psi_2^{\psi+}\rangle &= \frac{1}{2} \left\{ |00\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |01\rangle(\beta|1\rangle + \alpha|0\rangle) + \right. \\
&\quad \left. |10\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) + |11\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) \right\} \\
|\Psi_2^{\psi-}\rangle &= \frac{1}{2} \left\{ |00\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) + |01\rangle(\beta|1\rangle - \alpha|0\rangle) + \right. \\
&\quad \left. |10\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |11\rangle(-\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) \right\}
\end{aligned}$$

Как видим, каждое из четырех полученных чисто математическими преобразованиями состояний имеет четыре равновероятных исхода. После измерения на M_1 и M_2 пары кубитов Алисы, на стороне Боба будет получено одно из этих состояний. Если передать Бобу результаты измерения Алисы, то он сможет произвести над своим кубитом соответствующие унитарные преобразования, в результате которых получит со-

стояние своего кубита, копирующее состояние телепортируемого кубита Алисы:

M_1M_2	$\Psi_3^{\phi+}$	Преобразование	Результат $\Psi_4^{\phi+}$
00	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	I	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
01	$\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$	X	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
10	$\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$	Z	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
11	$\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$	XZ	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$

M_1M_2	$\Psi_3^{\phi-}$	Преобразование	Результат $\Psi_4^{\phi-}$
00	$\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$	Z	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
01	$-\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$	XZ	$-(\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle)$
10	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	I	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
11	$-\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$	X	$-(\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle)$

M_1M_2	$\Psi_3^{\psi+}$	Преобразование	Результат $\Psi_4^{\psi+}$
00	$\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$	X	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
01	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	I	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
10	$\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$	XZ	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
11	$\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$	Z	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$

M_1M_2	$\Psi_3^{\psi-}$	Преобразование	Результат $\Psi_4^{\psi-}$
00	$\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$	XZ	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
01	$-\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	Z	$-(\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle)$
10	$\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$	X	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
11	$-\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$	I	$-(\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle)$

При этом, как видим, ни один из равновероятных результатов не повторяется в других "несущих". То есть, каждому из результатов на стороне Алисы – 00, 01, 10 и 11 для каждой из "несущих" соответствует свой отличный результат на стороне Боба, и наоборот. Например, результат на стороне Боба, не требующий никаких преобразований – I, соответствует результату измерений на стороне Алисы – 00, 01, 10 и 11 – в зависимости от "несущей".

Таким образом, мы смогли телепортировать неизвестное состояние частицы Алисы, используя каждое из четырех запутанных состояний Белла. Однако помимо чистых запутанных состояний Белла, как отмечено выше, существуют состояния, которые также являются запутанными. Например, состояние:

$$|\Psi_x\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

не может быть представлено как тензорное произведение двух волновых функций, что является признаком запутанного состояния. Видимо, это состояние также может быть использовано для телепортации. Проверим это. Для этого вновь обозначим кубит, состояние которого телепортируется, нижним индексом C, а кубиты, принадлежащие Алисе и Бобу, соответственно, индексами A и B. Тогда состояния кубитов, участвующих в телепортации, будут записаны таким образом:

$$|\Psi_C\rangle = \alpha|0_C\rangle + \beta|1_C\rangle$$

$$|\Psi_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|0_A0_B\rangle + b|1_A1_B\rangle)$$

Состояние на входе устройства телепортации в этом случае будет иметь вид:

$$|\Psi_0^x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|0_C\rangle + \beta|1_C\rangle) \otimes (a|0_A0_B\rangle + b|1_A1_B\rangle) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}\{\alpha|0_C\rangle(a|0_A0_B\rangle + b|1_A1_B\rangle) + \beta|1_C\rangle(a|0_A0_B\rangle + b|1_A1_B\rangle)\}$$

Кубиты Алисы пропускаются через гейт CNOT, что приводит к изменению состояний запутанной частицы Алисы на

управляемом входе гейта. Совместное состояние всех трёх частиц принимает вид:

$$|\Psi_1^x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \alpha |0_C\rangle (a |0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle) + \beta |1_C\rangle (a |1_A 0_B\rangle + b |0_A 1_B\rangle) \right\}$$

Далее телепортируемый кубит С Алисы пропускается через гейт Адамара Н, в котором он преобразуется по описанному выше правилу (3). Отсюда получаем третье состояние:

$$\begin{aligned} |\Psi_2^x\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \alpha \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (a |0_A 0_B\rangle + b |1_A 1_B\rangle) + \right. \\ &\quad \left. \beta \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (a |1_A 0_B\rangle + b |0_A 1_B\rangle) \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \alpha (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (a |0_A 0_B\rangle + b |1_A 1_B\rangle) + \right. \\ &\quad \left. \beta (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (a |1_A 0_B\rangle + b |0_A 1_B\rangle) \right\} \end{aligned}$$

Раскроем скобки и перегруппируем кубиты в уравнении по их принадлежности Алисе или Бобу (кубиты С и А принадлежат Алисе, поэтому индекс им оставляем общий - А):

$$\begin{aligned} |\Psi_2^x\rangle &= \frac{1}{2} \left\{ \alpha a |0\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B + \alpha b |0\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \right. \\ &\quad \left. \alpha a |1\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B + \alpha b |1\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \right. \\ &\quad \left. \beta a |0\rangle_C |1\rangle_A |0\rangle_B + \beta b |0\rangle_C |0\rangle_A |1\rangle_B - \right. \\ &\quad \left. \beta a |1\rangle_C |1\rangle_A |0\rangle_B - \beta b |1\rangle_C |0\rangle_A |1\rangle_B \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \alpha a |00\rangle_A |0\rangle_B + \alpha b |01\rangle_A |1\rangle_B + \alpha a |10\rangle_A |0\rangle_B + \alpha b |11\rangle_A |1\rangle_B + \right. \\ &\quad \left. \beta b |00\rangle_A |1\rangle_B + \beta a |01\rangle_A |0\rangle_B - \beta b |10\rangle_A |1\rangle_B - \beta a |11\rangle_A |0\rangle_B \right\} \end{aligned}$$

Группируем однотипные слагаемые Алисы и в результате получаем (очевидные индексы опускаем):

$$|\Psi_2^x\rangle = \frac{1}{2} \left\{ |00\rangle (\alpha a |0\rangle + \beta b |1\rangle) + |01\rangle (\beta a |0\rangle + \alpha b |1\rangle) + \right. \\ \left. |10\rangle (\alpha a |0\rangle - \beta b |1\rangle) + |11\rangle (\alpha b |1\rangle - \beta a |0\rangle) \right\}$$

Проверим правильность выкладок. Подставим a=b=1:

$$|\Psi_2^x\rangle = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &|00\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle(\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle) + \\ &|10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \end{aligned} \right\}$$

Результат совпадает с полученными выше уравнениями, что можно рассматривать как свидетельство корректности преобразований. Итак, мы видим, что полученное чисто математическими преобразованиями состояние, как и выше, имеет четыре равновероятных исхода. После измерения на M_1 и M_2 пары кубитов Алисы, на стороне Боба будет получено одно из этих состояний. Если передать Бобу результаты измерения Алисы, то он сможет произвести над своим кубитом соответствующие унитарные преобразования, в результате которых получит состояние своего кубита, копирующее состояние телепортируемого кубита Алисы, хотя в несколько "деформированном" виде:

M_1M_2	Ψ_3^x	Преобразование	Результат Ψ_4^x
00	$\alpha a 0\rangle + \beta b 1\rangle$	I	$\alpha a 0\rangle + \beta b 1\rangle$
01	$\alpha b 1\rangle + \beta a 0\rangle$	X	$\alpha b 0\rangle + \beta a 1\rangle$
10	$\alpha a 0\rangle - \beta b 1\rangle$	Z	$\alpha a 0\rangle + \beta b 1\rangle$
11	$\alpha b 1\rangle - \beta a 0\rangle$	XZ	$\alpha b 0\rangle + \beta a 1\rangle$

Наличие коэффициентов a и b означает, по всей видимости, что исходный телепортируемый кубит повернут на некоторый угол. Очевидно, этот угол известен до начала телепортации и в конце неё может быть унитарным преобразованием применён к результату.

Телепортация запутанности

В процессе традиционной телепортации состояния кубиты преобразуются в специальной установке и последовательно принимают соответствующие состояния. Однако интересно рассмотреть более общий случай, когда телепортируется не состояние одного кубита, а состояние запутанности пары ку-

битов, что, вероятно, позволит получить новый интересный результат. Для этой телепортации мы немного изменим схему установки – поменяем местами гейт CNOT и гейт Адамара.

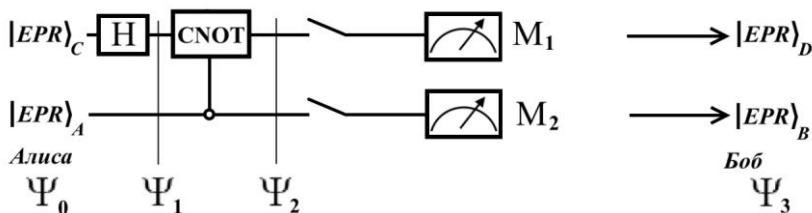


Рис.12. Установка для телепортации запутанности

Пометим кубиты, принадлежащие Алисе, индексами А и С, а принадлежащие Бобу, соответственно, индексами В и D

$$|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle)$$

$$|\Psi_{CD}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_C 0_D\rangle + |1_C 1_D\rangle)$$

Тогда на стороне Алисы исходные, начальные состояния кубитов, участвующих в телепортации запутанности, будут записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} 2|\Psi_0\rangle &= (|0\rangle_C + |1\rangle_C) \otimes (|0\rangle_A + |1\rangle_A) = \\ &= |0\rangle_C (|0\rangle_A + |1\rangle_A) + |1\rangle_C (|0\rangle_A + |1\rangle_A) \end{aligned}$$

Здесь мы совершаем кажущееся нарушение формализма теории, поскольку фотоны Алисы запутаны с фотонами Боба, поэтому, казалось бы, не могут быть описаны собственной волновой функцией. Однако при отсутствии воздействий на фотоны Боба для Алисы её фотоны ничем не отличаются от обычных, незапутанных фотонов, и она может работать с ними как с обычными фотонами. Независимые фотоны Алисы описываются волновыми функциями:

$$|\Psi_A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A\rangle + |1_A\rangle)$$

$$|\Psi_C\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_C\rangle + |1_C\rangle)$$

Теперь пропустим кубит С Алисы через гейт Адамара (3). В результате получаем функцию системы

$$2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = (|0\rangle_C + |1\rangle_C)(|0\rangle_A + |1\rangle_A) + (|0\rangle_C - |1\rangle_C)(|0\rangle_A + |1\rangle_A) \quad (4)$$

Раскрываем скобки у правых сомножителей

$$2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = |0\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + |0\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C)$$

Теперь раскрываем оставшиеся скобки и собираем однотипные члены уравнения

$$2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = |0\rangle_A|0\rangle_C + |0\rangle_A|1\rangle_C + |1\rangle_A|0\rangle_C + |1\rangle_A|1\rangle_C + |0\rangle_A|0\rangle_C - |0\rangle_A|1\rangle_C + |1\rangle_A|0\rangle_C - |1\rangle_A|1\rangle_C$$

После группировки и сокращения получаем

$$2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = 2|0\rangle_A|0\rangle_C + 2|1\rangle_A|0\rangle_C$$

Здесь мы выполнили хотя и очевидные, но не вполне обоснованные операции: совпадающие члены мы сложили, а члены, имеющие противоположные знаки, сократили. И окончательно получаем выражение

$$\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = (|0\rangle_A + |1\rangle_A)|0\rangle_C$$

Заметим, что полученная волновая функции выглядит, мягко говоря, весьма и весьма странно:

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_C\rangle + |1_A 0_C\rangle)$$

Это состояние не является запутанным, но любое совместное измерение всегда даст нулевую (горизонтальную) поляризацию фотона С. Вместе с тем, интуитивно мы понимаем, что фотоны независимы друг от друга, поэтому статистически следует ожидать, что результату измерения $|1_C\rangle$ равновероятно должны соответствовать и измерения $|0_A\rangle$ и $|1_A\rangle$. Конечно, такое объяснение имеет определенный смысл, однако формаль-

но из преобразований явно такой результат не следует, поэтому эту странность, неопределенность оставим для будущих исследований:

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 1_C\rangle + |1_A 1_C\rangle) \quad (5)$$

Пропустим теперь полученную выше пару для $|0_C\rangle$ через гейт CNOT. Для этого перепишем полученное состояние в матричном виде:

$$\begin{aligned} |\Psi_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A\rangle + |1_A\rangle) \otimes |0_C\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0_A\rangle \otimes |0_C\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1_A\rangle \otimes |0_C\rangle = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|1|0_A 0_C\rangle + 0|0_A 1_C\rangle + 1|1_A 0_C\rangle + 0|1_A 1_C\rangle) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

После прохождения фотонов Алисы через гейт CNOT состояние в матричном виде будет иметь вид:

$$|\Psi_2\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

В дираковской форме волновая функция теперь уже не может быть представлена как тензорное произведение двух независимых волновых функций фотонов А и С, что означает запутанное состояние этих фотонов (чистое состояние Белла ϕ^+ , состояние шрёдингеровского кота):

$$|\Psi_2\rangle = \phi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Для контроля сделаем эти же преобразования в дираковской форме. Используем выражение (4):

$$2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle = (|0\rangle_C + |1\rangle_C)(|0\rangle_A + |1\rangle_A) + (|0\rangle_C - |1\rangle_C)(|0\rangle_A - |1\rangle_A)$$

Раскроем правые скобки в слагаемых:

$$\begin{aligned}
2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + \\
&\quad + |0\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C) = \\
2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + \\
&\quad + |0\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C)
\end{aligned}$$

Пропустим фотоны через гейт CNOT

$$\begin{aligned}
2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C) + \\
&\quad + |0\rangle_A(|0\rangle_C - |1\rangle_C) + |1\rangle_A(|1\rangle_C - |0\rangle_C)
\end{aligned}$$

Перегруппируем слагаемые

$$\begin{aligned}
2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C + |0\rangle_C - |1\rangle_C) + \\
&\quad + |1\rangle_A(|0\rangle_C + |1\rangle_C - |0\rangle_C + |1\rangle_C)
\end{aligned}$$

И вновь мы получаем тот же самый довольно странный результат. Если мы суммируем однотипные слагаемые, то должны также и сокращать их:

$$\begin{aligned}
2\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A(|0\rangle_C + |0\rangle_C) + |1\rangle_A(|1\rangle_C + |1\rangle_C) \\
\sqrt{2}|\Psi_1\rangle &= |0\rangle_A|0\rangle_C + |1\rangle_A|1\rangle_C \\
|\Psi_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A0_C\rangle + |1_A1_C\rangle)
\end{aligned}$$

Итак, мы получили тот же результат, что и в матричной форме: на стороне Алисы фотоны А и С перешли в запутанное состояние. Однако каждый из этих фотонов запутан также и со своей исходной парой, поэтому запутанными оказываются и фотоны, переданные Бобу:

$$|\Psi_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_B0_D\rangle + |1_B1_D\rangle)$$

Если Алиса не делает над своими фотонами никаких измерений, то состояние запутанности сохранится и на стороне Боба. Это означает, что фотонам Боба передано запутанное

состояние. В этом случае все измерения у Боба фотонов D и B будут давать 100% парных прохождений при любой ориентации поляризаторов.

Если же Алиса произведёт измерение над любым из своих фотонов, то её фотоны перейдут в собственные состояния с разрушением запутанности, и точно так же запутанность разрушится и на стороне Боба. Теперь на стороне Боба при любом положении поляризаторов парных прохождений будет только 50%. Таким образом, Боб мгновенно узнает, произвела Алиса измерение или нет.

Однако на стороне Алисы фотоны были пропущены через гейт CNOT, поэтому на стороне Боба запутанность может иметь иной вид:

$$|\Psi_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_B 1_D\rangle + |1_B 0_D\rangle)$$

Очевидно, в этом случае парных прохождений не будет вообще, что также позволяет определить состояние фотонов на стороне Алисы.

Вместе с тем, еще раз отметим, что выкладки опираются на некоторые неочевидные допущения, поэтому окончательный ответ, видимо, может дать только эксперимент. В частности, в описанном алгоритме Боб не сможет обнаружить действий Алисы, если допустить существование аналитически отсутствующего решения (5). Однако и в этом случае следует проверить, не возникнет ли такой же обратный эффект: равновероятные измерения на стороне Боба при отсутствии измерений у Алисы, а при измерении, например, M_1 появления выделенного направления поляризаторов Боба, когда вероятность парных прохождений будет отличаться от 25%.

Квантовый семафор

Следует признать, что главной проблемой при использовании запутанности для передачи информации считается невозможность регистрации фактического состояния квантовых

частиц и, как следствие, невозможность различения их неизвестных состояний. Еще одно ограничение на такое различение создаёт запрет на клонирование квантовых частиц: наличие копий частиц давало бы возможность множеством измерений определить их состояние, то есть, выявить различие между частицами, передаваемыми от передатчика к приёмнику.

Таким образом, можно считать, что для принимающей стороны главной проблемой является проблема различимости, то есть, возможности различить посылаемые передатчиком сигналы, квантовые состояния. Передатчик изменяет состояния своих частиц, что приводит к изменению состояния удалённых, принимаемых приёмником частиц, то есть передаёт им квантовую информацию. Считается твердо установленным, что приёмник не способен различить квантовые частицы по их изменённым состояниям, не способен непосредственно "прочитать" эти изменения квантового состояния частицы, превратив их в классическую, читаемую информацию.

Обнаруженное в предыдущем разделе гипотетическое решение проблемы различимости квантовых состояний при передаче квантовой информации запутанными частицами использует две пары запутанных фотонов и исходит из некоторых не строго обоснованных предположений. Приведёт ли на самом деле запутывание фотонов Алисы к запутыванию связанных с ними фотонов Боба? И можно ли получить аналогичное решение, например, использованием квантового гейта CNOT (рис.6) в режиме фильтрации запутанных фотонов? В этом случае для создания канала связи потребуется лишь одна пара запутанных фотонов. Рассмотрим возможности гейта CNOT для использования в режиме фильтрации, селекции фотонов в различных состояниях.

Как известно, гейт CNOT осуществляет логическое сложение сигналов по модулю 2, причём считается, что сигнал на управляющем выходе равен сигналу на управляющем выходе просто вследствие того, что это одна и та же линия ($a = A$). Однако это справедливо только для ортогональных состояний управляющего кубита. Управляющий кубит в произвольном

состоянии будет запутан с управляемым кубитом, потеряет своё первоначальное состояние и перейдет в состояние запутанности.

Таким образом, гейт CNOT оказывается чувствительным к направлениям поляризации как управляемого, так и управляющего фотонов, и это, вероятно, может позволить приёмнику определенно зарегистрировать эти направления.

Для определенности назовем "несущей" нелокальную связь фотонов, передающую квантовую информацию. В качестве несущей передаваемой информации удобнее всего использовать чистое запутанное состояние Белла ϕ^+ , состояние шрёдингерского кота:

$$\phi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Соответственно, изменение угла наклона поляризатора у передатчика при измерении собственных фотонов из запутанных пар можно назвать фазовой модуляцией нелокальной несущей. При такой модуляции на стороне приёмника также происходит изменение угла наклона поляризации фотонов. Вот эту фазовую составляющую нелокальной несущей на стороне приёмника и позволяет выделить квантовый гейт CNOT.

В основу модуляции положено следующее явление. Логический анализ явления запутанности с точки зрения квантовой теории приводит к выводу, что опережающее измерение запутанных фотонов в одном канале, передатчике приводит к созданию во втором канале, приемнике двух смешанных плоско-поляризованных потоков с взаимно перпендикулярными поляризациями. Собственно эффект модуляции несущей состоит в изменении их угла поляризации.

Рассмотрим механизм модуляции на простейшей схеме эксперимента по проверке квантовой корреляции, приведенной на рис.13. Источник S испускает пару запутанных фотонов ν_1 и ν_2 , которые встречают на своем пути два поляризатора I и II, расположенные перпендикулярно, то есть с взаимным углом, равным $\pi/2$.

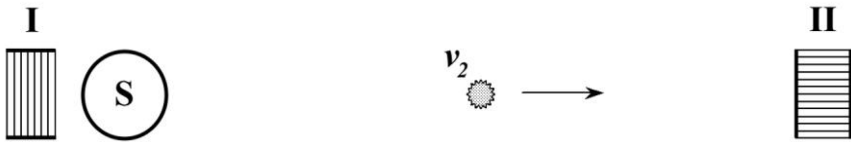


Рис.13. Образование крестовой поляризации

На рисунке фотон ν_1 не показан, поскольку считаем, что он был измерен своим поляризатором I. После коллапса волновой функции фотоном ν_1 на поляризаторе I второй фотон ν_2 приобретает одну из двух возможных поляризаций: параллельную или перпендикулярную к направлению модулирующего поляризатора I.

Воспользуемся квантово-механической формулой, дающей вероятность прохождения фотона через поляризатор, если угол между поляризаторами равен θ :

$$P(\theta) = \cos^2(\theta)$$

Очевидно, в рассматриваемом случае *совместных* прохождений фотонов не будет:

$$P_{\perp}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

Однако через каждый из поляризаторов некоторые фотоны пройдут. Наблюдатели, находящиеся рядом с поляризаторами, зафиксируют вероятность прохождения фотонов, равную $1/2$. Если источник испустит, например, 1000 фотонов, то через каждый из поляризаторов пройдут ровно половина – 500 фотонов. Но это будут некоррелированные фотоны: среди пар не будет ни одной, в которой один из фотонов прошёл через поляризатор одновременно со вторым фотоном на другом поляризаторе.

Наоборот, если поляризаторы параллельны, то есть угол между ними равен нулю, то через поляризаторы будут проходить только парные фотоны: если пройдет первый фотон, то второй будет спроектирован в коллинеарную поляризацию и пройдет через свой поляризатор с вероятностью 1. Предполо-

жим, что первый поляризатор находится вплотную к источнику S , а второй – на некотором удалении. Поэтому фотоны в направлении влево будут измерены сразу же при вылете из источника. В этот же момент их парные фотоны будут приобретать поляризацию, параллельную первому поляризатору. Это означает, что выходной поток в сторону второго поляризатора будет состоять словно бы из двух фотонных потоков. Первый из этих потоков – это поток плоско поляризованных фотонов с известным направлением поляризации – параллельной первому поляризатору. Будет и второй поток – из фотонов, которые имеют другое направление поляризации. Попробуем выяснить, какое именно.

Установим на пути потока фотонов поляризатор P , параллельный первому. Очевидно, что известный нам поток из плоско поляризованных фотонов пройдет через поляризатор с достоверностью. Известно также, что это ровно $1/2$ от общего числа всех фотонов, испущенных источников в данном направлении. Исследователь на этой стороне зафиксирует этот факт. Но он может не знать, что фотоны в потоке имеют определенные направления поляризации и скажет, что через поляризатор проходят $1/2$ от всех фотонов в потоке. Он (исследователь) не разделяет этот поток на два и считает, что через поляризатор с вероятностью $1/2$ проходит любой из прилетевших фотонов. Но мы знаем, что в общем потоке имеется известный нам подпоток, который пройдет через поляризатор с вероятностью 1, и их общее количество равно тому количеству, которое фиксирует исследователь. Следовательно, остальные фотоны не пройдут через поляризатор, а будут задержаны с вероятностью 1. То есть из остальных фотонов через поляризатор не пройдет ни один. Это означает, что средняя вероятность фотонов в остальном потоке равна 0. Поэтому мы можем с уверенностью сказать, что этот поток весь состоит из плоско поляризованных фотонов с поляризацией, перпендикулярной направлению нашего поляризатора (и, соответственно, первого поляризатора), поскольку через поляриза-

тор с достоверностью не проходят только перпендикулярно поляризованные фотоны.

Это обстоятельство не должно вызвать особых возражений и вполне объяснимо. Фотоны, которые не прошли через первый поляризатор, коллапсировали, очевидно, получив направление поляризации, перпендикулярное первому поляризатору и были им поглощены. Парный им фотон автоматически был спроектирован в такое же направление поляризации и тоже был поглощен вторым поляризатором.

Итак, мы можем с достаточной уверенностью заявить, что в рассматриваемой схеме эксперимента по второму направлению, вправо излучаются два потока плоско поляризованных фотонов: с вертикальной и с горизонтальной поляризацией (относительно первого поляризатора). Это обстоятельство не противоречит математике квантовой теории. Понятно, что эти потоки представляют собой случайную смесь, в которой фотоны с ортогональными поляризациями встречаются в случайной последовательности.

Эту смесь из ортогонально поляризованных фотонов можно вращать, наклоня поляризатор I вблизи передатчика. В простейшем случае мы можем выбрать два фиксированных направления, когда потоки вертикально-горизонтальные и имеют наклоны ± 45 градусов к горизонтали. Это максимально возможные градации углов.

Пусть для передачи информации передатчик на своей стороне измеряет фотоны из запутанных пар одним из этих положений: вертикальным или наклонённым под 45° поляризатором. В этом случае на стороне приёмника фотоны также образуют два разных сигнала, каждый из которых состоит из двух таких же ортогональных поляризованных потоков в виде вертикального и наклонного под 45° "крестов". Следовательно, измерений на стороне приёмника должно быть четыре, поскольку он принимает четыре различно поляризованных фотона: вертикально, горизонтально, под углом $+45^\circ$ и под углом -45° . Главная цель приёмника – различить эти два ортогонально поляризованных потока-креста.

Попробуем выяснить, возможно ли это. Произведём измерения четырёх возможных состояний с помощью одной и той же схемы.

Передача сигнала нуля

Сначала рассмотрим смесь из двух потоков ортогонально поляризованных фотонов: с вертикальной и горизонтальной поляризацией, вертикальный "крест". Попробуем использовать его для передачи сигнала "ноль", "нет", false, точка азбуки Морзе и так далее. Каждый из фотонов этой смеси имеет либо вертикальную поляризацию, либо горизонтальную. Пропустим эту смесь через гейт CNOT: поток поступает на управляющий вход гейта, а на управляемый вход подадим фотоны с горизонтальной поляризацией. С выходов гейта CNOT фотоны подаются на два соответствующих расщепляющих поляризатора с \pm выходами (П1 и П2 на рис.14). Произведем измерения фотонов этого потока.

Измерение вертикальной составляющей потока прямого "креста". Для вертикально поляризованного потока на входе гейта имеем входное двухкубитное состояние:

$$|\Psi_{in}^1\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = 0|00\rangle + 0|01\rangle + 1|10\rangle + 0|11\rangle$$

Этот вектор в матричном виде, в виде столбца коэффициентов запишем в следующем виде:

$$|\Psi_{in}^1\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Следовательно, после прохождения через гейт CNOT волновая функция в матричном виде будет преобразована следующим образом:

$$|\Psi_{out}^1\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

В дираковской форме эта волновая функция может быть представлена как тензорное произведение двух независимых волновых функций, то есть, не является запутанной парой:

$$|\Psi_{out}^1\rangle = |11\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle \quad (6)$$

Пропустим эти два фотона (из потока и управляемый фотон на выходе) через два наклонённых на 45 градусов расщепляющих поляризатора, каждый из фотонов - через свой поляризатор. Поскольку фотоны независимые, то через эти одинаково ориентированные поляризаторы на одноименные выходы пройдёт по 50% фотонов с управляющего и управляемого выходов гейта CNOT. Вероятность парного прохождения, то есть, когда на одноименные выходы разных поляризаторов пройдут оба фотона пары, согласно закону Малуса будет равна:

$$P_{11} = \cos^2 \frac{\pi}{4} \times \cos^2 \frac{\pi}{4} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

Это очевидно, поскольку в базисе поляризаторов фотоны описываются одинаковыми волновыми функциями

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$$

Таким образом, поскольку фотоны не запутанные, совпадений при прохождении через поляризаторы будет 50%, (25% – оба прошли на плюс, 25% – оба прошли на минус).

Пример. Пусть общее число запутанных фотонных пар на входах поляризаторов будет 100. Вертикально поляризованных в этом потоке будет 50 пар или 100 одиночных фотонов, то есть по 50 на каждый поляризатор. На плюсовые и минусовые выходы каждого из поляризаторов пройдут по 25 фотонов. Поскольку фотоны независимые, реализуются равнове-

роятно все комбинации, поэтому, например, на плюсовые выходы совместно пройдут $12,5+12,5=25$ фотонов или 25% от их общего количества. В целом совпадающих прохождений будет $25+25=50$ фотонов из 100.

Измерение горизонтальной составляющей потока прямого "креста". Для горизонтально поляризованного фотона на управляющем входе гейта CNOT и горизонтально поляризованного фотона на управляемом входе имеем волновую функцию:

$$|\Psi_{in}^0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = 1|00\rangle + 0|01\rangle + 0|10\rangle + 0|11\rangle$$

Или в матричном виде:

$$|\Psi_{in}^0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

На выходе CNOT получаем функцию в матричном виде:

$$|\Psi_{out}^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

В дираковской форме эта волновая функция также может быть представлена в виде тензорного произведения двух независимых волновых функций, то есть, пара также не является запутанной:

$$|\Psi_{out}^0\rangle = |00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle \quad (7)$$

Поскольку фотоны на управляющем и управляемом выходах гейта CNOT независимые, то при их прохождении через наклонённые на 45 градусов поляризаторы также будет по 25% совпадений. Волновые функции фотонов будут иметь вид

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

Вероятность парного прохождения, то есть, когда через одноименные выходы поляризаторов пройдут оба фотона, как и в предыдущем случае, будет равна:

$$P_{00} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

То есть, и в этом случае совпадений при прохождении через поляризаторы будет 25%, (25% – оба прошли на плюсовые выходы, 25% – оба прошли на минусовые выходы). Общее совместное одноименное прохождение, таким образом, составит

$$P_{11+00} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$$

Такое 50-процентное совпадение обозначим как сигнал "ноль", "нет", false, точка азбуки Морзе и так далее.

Передача сигнала единицы

В случае поворота поляризатора передатчика на вход приемника поступят два ортогонально поляризованных потока фотонов с наклоненной на 45 градусов вертикальной и горизонтальной поляризацией (наклонный "крест"). Попробуем использовать его для передачи сигнала "единица", "да", true, тире азбуки Морзе и так далее. Смесь в этом случае будет содержать два потока фотонов с волновыми функциями:

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

Измерение составляющей Ψ^+ потока наклонного "креста". Для этой составляющей на управляющем входе гейта CNOT и горизонтально поляризованного фотона на его управляемом входе имеем волновую функцию и её матричную форму:

$$|\Psi_{in}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle \otimes |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \otimes |0\rangle =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} (1|00\rangle + 0|01\rangle + 1|10\rangle + 0|11\rangle) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

После их прохождения через гейт получим состояние в матричном виде:

$$|\Psi_{out}^+\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

В дираковской форме волновая функция теперь уже не может быть представлена как тензорное произведение двух независимых волновых функций, что означает запутанное состояние фотонов (чистое состояние Белла ϕ^+ , состояние шрёдингеровского кота):

$$|\Psi_{out}^+\rangle = \phi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Поскольку фотоны запутанные, то при их прохождении через наклонённые на 45 градусов поляризаторы оба всегда с единичной достоверностью пройдут на одноименные выходы. И на плюсовой и на минусовой выходы фотоны пройдут одновременно с вероятностью:

$$P_{++} = P_{--} = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2}$$

Вероятности разноименных прохождений равны нулю:

$$P_{+-} = P_{-+} = 0$$

Таким образом, совпадений при прохождении через поляризатор будет 100%, (50% – оба прошли на плюсовой выход, 50% – оба прошли на минусовой выход):

$$P_{++} + P_{--} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

По числу фотонов это, соответственно, составит 50 фотонов из 100.

Измерение составляющей Ψ^- потока наклонного "креста". Для этой составляющей потока на управляющем входе гейта и горизонтально поляризованного фотона на управляемом входе гейта имеем волновую функцию и её матричную форму:

$$\begin{aligned} |\Psi_{in}^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle \otimes |0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \otimes |0\rangle = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |10\rangle) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

После их прохождения через гейт CNOT получим совместное состояние в матричном виде:

$$|\Psi_{out}^-\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

И в этом случае в дираковской форме волновая функция не может быть представлена как тензорное произведение двух независимых волновых функций, что означает запутанное состояние фотонов (чистое состояние Белла ϕ^-). Эта волновая функция имеет следующий вид:

$$|\Psi_{out}^-\rangle = \phi^- = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Поскольку фотоны запутанные, то через наклонённые на 45 градусов поляризаторы, как и в предыдущем случае, пройдёт 50% пар управляющих и управляемых фотонов с выхода гейта CNOT. То есть, на одноименные выходы расщепляющих поляризаторов оба фотона пройдут с вероятностью:

$$P_{++} = P_{--} = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2}$$

По числу фотонов это вновь составит 50 фотонов из 100 для каждого из совпадений. Соответственно, вероятности разноименных прохождений в этом случае также равны нулю:

$$P_{+-} = P_{-+} = 0$$

Таким образом, как и в предыдущем случае, совпадений при прохождении через поляризатор будет 100%, (50% – оба прошли на плюсовой выход, 50% – оба прошли на минусовый выход), то есть, для суммарного прохождения фотонов двух потоков эта величина составит 100 фотонов из 100:

$$P_{++} + P_{--} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

Такое 100-процентное совпадение мы обозначим как сигнал "единица", "да", true, тире азбуки Морзе и так далее.

Как видим, передатчик формирует два отчетливо различимых для приёмника потока. Первое и второе измерения, вертикальный крест дают в приёмнике количество совпадений (50%), надёжно отличающееся от количества совпадений, которое дают третье и четвёртое измерения (100%), наклонный крест. Состояния фотонов на стороне передатчика формируются, например, поворотом рукоятки поляризатора – в вертикальное или наклонное положение. Фотонам на стороне приёмника эти состояния передаются со сверхсветовой (нелокальной) скоростью. Квантовый гейт CNOT позволяет различить эти модулированные состояния запутанных фотонов, определить в каком положении на стороне передатчика находилась рукоятка поворотного поляризатора. Обобщенно результаты измерений можно свести в две таблицы состояний: для сигналов 1 и для сигналов 0.

Поскольку возможны 4 комбинации сигналов на выходах измерителей, для нижнего уровня достоверности должно производиться измерение как минимум 4-х последовательных

фотонов. Согласно колонкам Сигнал 0 обязательно будут зафиксированы противофазные фотоны.

Таблицы состояний для сигналов

Сигнал 0		Сигнал 1	
Датчик 1+	Датчик 2+	Датчик 1+	Датчик 2+
0	0	0	0
0	1	-	-
1	0	-	-
1	1	1	1

Другими словами, наличие противофазных фотонов (разноименных совпадений) означает получение приемником сигнала 0. Очевидно, что и передатчик и приемник можно легко автоматизировать, использовать компьютерную технику. Наиболее сложным является формирование несущей, то есть создание и разделение фотонных пар между передатчиком и приемником, создание своеобразного подобия телеграфных проводов.

Но здесь возникает серьезный вопрос: каким же образом неуловимая, неощутимая квантовая информация вдруг позволила все-таки передать информацию классическую, вещественную? Вероятно, что в данном случае, по всей видимости, удалось обойти запрет на клонирование фотона. Хотя о единственном случае клонирования было известно и ранее: это клонирование фотона в базисном состоянии. Такое клонирование осуществляет гейт CNOT. Эта одна-единственная, буквально крошечная возможность создания клонированного фотона, допустила возможность передачи классической информации, формально даже и не нарушая теорему о запрете клонирования кубита.

Опишем такую возможность передачи информации в виде небольшой истории с традиционными участниками Алисой и Бобом, которые решили осуществить передачу сигналов посредством квантового нелокального семафора. Почему семафор, а не традиционные телепортация или телеграф? Дело в том, что два ортогональных сигнала – вертикальный и

наклонный кресты поляризованных фотонов довольно сильно напоминают морской семафор, когда матрос размахивает флажками, образуя разные фигуры. Очевидно, что разница наклонов в 45 градусов соответствует максимальной различимости положения таких крестов. Конечно, в этом случае используется не морская семафорная азбука, а азбука Морзе, поскольку у таких флажков только два положения.

Итак, для такого эксперимента они собрали модель квантового нелокального семафора примерно такого вида:

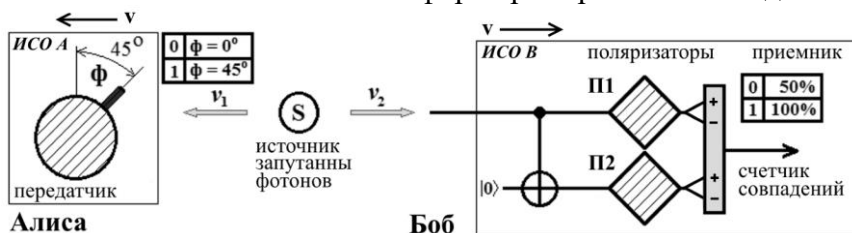


Рис.14. Квантовый нелокальный семафор

На одинаковом расстоянии от себя они установили источник запутанных фотонов S, который испускает непрерывную последовательность фотонных пар v_1 и v_2 . Свои полученные фотоны Алиса пропускает через вращаемый поляризатор. Чтобы передать Бобу сообщение с помощью азбуки Морзе, Алиса поворачивает свой поляризатор в одно из двух положений. Вертикальное положение поляризатора означает точку (ноль), наклонное под 45 градусов – тире (единицу). На своей стороне Боб принимает вторые из пар запутанные фотоны и пропускает их через квантовый гейт CNOT, подавая на его управляющий вход полученные запутанные фотоны, а на управляемый вход – фотоны с горизонтальной поляризацией. С выхода гейта управляющий и управляемый фотоны Боб пропускает через наклоненные под 45 градусов расщепляющие поляризаторы и с помощью устройства совпадения измеряет парные регистрации, когда оба фотона одновременно прошли либо на одноименные их выходы (плюсовые или минусовые), либо на разноименные. Конечно, использование

расщепляющих поляризаторов не обязательно, поскольку всякое прохождение на один выход тождественно отсутствию такого прохождения на другой. Устройство совпадения выдаёт информацию о процентном соотношении парных регистраций. Если все фотоны парно прошли через одноименные выходы поляризаторов (100%-ное совпадение), то Боб записывает тире (единицу). Если одноименных регистраций только 50%, то Боб записывает точку (ноль). Поскольку совпадения формируются при коллапсе волновых функций запутанных фотонов v_1 и v_2 , то такая передача текста азбукой Морзе происходит со сверхсветовой скоростью.

Однако в заключение следует сделать, видимо, неожиданный вывод. Остаются сомнения в окончательном и убедительном доказательстве того, что квантовая нелокальность может быть использована для сверхсветовой передачи информации. Слишком уж много вопросов возникает в физике при такой возможности. Но, если приведённые выкладки ошибочны, то в чём ошибка? Возможно, она заключена в трактовке запутанности. Если посмотреть литературу по CNOT, то можно встретить утверждения, что на выходе гейта фотоны запутаны *всегда* и во всех режимах. В этом случае селекция фотонов на выходах предложенной схемы не позволит различить их исходное состояние и передачи информации не будет. Другими словами, уравнения (6) и (7) тоже, видимо, представляют запутанные состояния фотонов, хотя это довольно странные состояния запутанности. Действительно, в этом случае оба фотона находятся в собственных состояниях и имеют точно определённые поляризации, а их совместное состояние является тензорным произведением, означающим отсутствие запутанности, вопреки многочисленным заявлениям от имени квантовой механики! Такая запутанность, если она, действительно, имеет место, весьма красочна. Фотон с достоверно известной поляризацией без какого бы то ни было влияния извне поворачивает её на глазах экспериментатора. И сразу же становится очевидным, что такая запутанность с ещё большей простотой позволяет произвести сверхсветовую пе-

редачу информации. Поворачивая поляризатор у одного фотона, мы получаем на выходе такое же вращение.

Такую сигнализацию довольно сложно использовать в дальней космической связи, поскольку требуется создать некое фотонное подобие обычной телеграфной линии связи (провода, оптоволокну). Но её достаточно просто использовать для кодированной передачи информации. Источник запутанных фотонов передает их отправителю и получателю, например, по обычной волоконно-оптической линии, либо со спутника. Передача информации производится либо непосредственно путем описанной семафорной сигнализации, либо передачей открытого ключа. Любое постороннее вмешательство в сеанс связи сразу же обнаруживается по нарушению контрольных сумм и может быть незамедлительно пресечено.

Очевидно, что ИСО Алисы и Боба могут двигаться относительно друг друга с любой скоростью. В этом случае мы обнаруживаем серьёзные проблемы в специальной теории относительности. Сверхсветовая сигнализация полностью разрушает базовые принципы теории: теряет смысл инвариант скорости света, все преобразования Лоренца отвергаются, а парадоксы причинности приобретают двойственность. В теории относительности предсказывается обратное движение во времени, а в реальных измерениях ничего такого нет.

Противоречия в описании Черной дыры

Одним из первых точных решений уравнений Эйнштейна общей теории относительности, теории гравитации считается решение Шварцшильда для стационарной Черной дыры. Обычно говорят, что именно он вычислил, предсказал возможность существования космологических объектов, особых звёзд – Черных дыр. Однако известно, что они также были явно предсказаны и в рамках физики Ньютона. Главное свойство, особенность таких особых звёзд была отражена в их названии – Черная дыра. Действительно, визуально эти звёзды выглядят как некая дыра, провал в пространстве-времени, в который вещество и даже излучение, свет проваливаются как в обычную яму, бездонную дыру.

Тем не менее, такие удивительные, фантастические предсказания общей теории относительности получили и реальные экспериментальные, наблюдательные подтверждения, что поставило теорию на одно из первых мест среди научных теорий. Но здесь придется сделать одно важное замечание. То, что получено в результате вычислений или наблюдений, само по себе – лишь символы, знаки, изображения, которые говорить не умеют. Нужны их интерпретации, трактовки. Но у трактовок, как известно, всегда имеется неприятная сторона – субъективность. Поэтому некоторые предсказания и наблюдения нередко можно рассматривать не как подтверждение этих трактовок, интерпретаций, а, наоборот, как их опровержение. И такие опровержения можно найти по целому ряду наблюдений или математических предсказаний теории относительности. Например, невозможность уйти из-под горизонта событий Черной дыры; так называемая голографическая Вселенная, заключающаяся в равенстве количества информа-

ции в Черной дыре и площади её горизонта событий; ускоренное расширение Вселенной. Рассмотрим противоречия этих трактовок подробнее.

Можно ли уйти из-под горизонта событий?

Если ознакомиться с темой гравитационной сингулярности на форумах в интернете, в научной и научно-популярной литературе, в научно-популярных документальных фильмах и учебниках, то можно увидеть единодушное мнение о том, что на расстоянии гравитационного радиуса от Черной дыры время останавливается, скорость падающего на Черную дыру тела приближается к скорости света, а разрывающая сила, приливная сила, действующая на него, приближается к бесконечности. Однако можно заметить и упоминаемые как-то вскользь отклонения. Исходя из этих утверждений, можно сделать вывод: фактически ни одна из наблюдаемых Черных дыр в принципе не может иметь внутри сингулярности, а падение на сверхмассивную Черную дыру, вообще-то, вполне безопасно для астронавта. Из этого можно прийти еще к одному странному выводу: утверждение о фатальных всепоглощающих свойствах Черной дыры несколько преувеличены. Поэтому в общем случае следующее утверждение является ошибочным:

"... любой безрассудный специалист по ракетной технике, рискнувший попасть под гравитационный радиус $r = 2M$ внешнего гравитационного поля, обречен на гибель" [12].

В случае сверхмассивной Черной дыры такое огромное усилие возникает, только если тело неподвижно на горизонте. Однако для свободно падающего тела (лифт Эйнштейна) это усилие исчезает, а вместо неё возникает приливная сила, величина которой может быть ничтожно малой. Расчеты показывают, что приложенная к телу человека приливная сила при его падении, например, под гравитационный радиус сверхмассивной Черной дыры в центре Млечного Пути ничтожно мала

– меньше грамма. Фактически этот человек находится в состоянии невесомости!

Это довольно интересное обстоятельство – невесомость на гравитационном радиусе Черной дыры. И здесь следует обратить внимание на ещё один интересный факт. Как известно, гравитационный радиус сверхмассивной Черной дыры растет пропорционально её массе. Следовательно, сила притяжения некоторого тела к Черной дыре на расстоянии гравитационного радиуса будет тем меньше, чем больше масса этой дыры. Получается, что при некоторой массе такой дыры на тело будет действовать сила притяжения, например, как на поверхности Земли. Расчеты показывают, что груз массой в 1 кг будет весить 1 кГ на горизонте Черной дыры, масса которой равна 3×10^{43} кг или $3 \times 10^{13} M_{\odot}$ (масса Солнца).

Это огромная масса даже для сверхмассивной Черной дыры. Но её размеры – 0,4 св. лет – ничтожно малы даже в масштабах нашей галактики. Конечно, возможность образования такой Черной дыры, выглядит все-таки довольно сомнительно, поскольку она почти в 1 000 раз больше массы возможного кандидата на предельную сверхмассивную Черную дыру. Считается, что Черные дыры в квазарах, имеющих аккреционные диски, не могут иметь массу, больше чем $5 \times 10^{10} M_{\odot}$. Тем не менее, как обычно говорят, физически она ничему не противоречит. На горизонте событий такой Черной дыры действует сила притяжения как на поверхности Земли. Что может помешать световому лучу покинуть его? Есть даже возможность подняться космолету над этим горизонтом.

Почему это так? Из чего следует, что из-под горизонта сверхмассивной Черной дыры вопреки утверждениям теории относительности можно уйти? Рассмотрим ситуацию с обратной стороны, откуда возникло утверждение о невозможности уйти из-под горизонта событий.

Допустим, что некий космолет попадает под горизонт такой сверхмассивной Черной дыры. Согласно уравнениям теории относительности, теперь уже даже скорости света недостаточно, чтобы улететь или послать световой сигнал нару-

жу. Однако это утверждение имеет несколько иные основания, чем традиционно молчаливо подразумеваемые. На гравитационном радиусе Черной дыры невозможна *стационарная* орбита спутника, поскольку тангенциальная скорость, равная скорости света, для него недостижима. Обращаем внимание: скорость *тангенциальная*, то есть, перпендикулярная к радиусу. В этом, собственно, и состоит смысл первой или второй космической скорости, из которых и следует гравитационный радиус.

Однако первая космическая скорость определяет условие инерционного (без двигателей) движения по некоторой орбите. В случае сверхмассивной Черной дыры на космолет может действовать сила притяжения, не превышающая такую на поверхности Земли. Возникает естественный вопрос: что может помешать звездолету, включив двигатели, подняться вверх, удалиться от центра Черной дыры?

Попробуем задать такой вот странный вопрос: с какой скоростью должен лететь космолёт, чтобы улететь, например, с Земли? Ответ – со второй космической скоростью – неверный. Правильный ответ: с любой ненулевой скоростью. По определению скорость обозначает изменение расстояния между объектами за некоторое время. Если космолёт движется от Земли по радиусу со скоростью 4 км/час, то, очевидно, он рано или поздно покинет не только Землю, но и Солнечную систему. Конечно, очень не скоро и топлива на это ему понадобится безумно много.

Это прямо означает, что первая космическая скорость задает условие инерционного (без двигателей) движения по некоторой орбите. Но она не имеет никакого отношения к активному движению – с включенными двигателями – по радиусу. В нашем конкретном случае сверхмассивной Черной дыры на космолет действует сила притяжения, в точности равная таковой на поверхности Земли. Весит он ровно столько, сколько и на Земле. Возникает естественный вопрос: что может помешать звездолету, включив двигатели, подняться вверх, удалиться от центра Черной дыры? Тяга двигателей,

несомненно, обеспечит существенно большее усилие, чем притяжение Черной дыры в этой точке.

Но как же все-таки быть с первой космической скоростью? Очень просто. Этот космолет с выключенными двигателями, действительно, не сможет остаться на стационарной орбите и очень скоро упадет на сингулярность. Хотя и уйти на бесконечность ему будет непросто, но уйти из-под горизонта такой Черной дыры ему ничто не мешает. И, тем более, послать наружу световой или радиосигнал.

Очевидно, здесь появляется ряд возможностей. Например, выйдя в наружную окрестность горизонта, космолет может быть подхвачен спасательным кораблем. Но и находясь под горизонтом, космолет может спокойно обмениваться радиосигналами с кораблем, находящимся вне горизонта. Описанные в литературе эксперименты с падением на сингулярность приобретают весьма реальные очертания для осуществления. На довольно большом расстоянии под горизонтом сверхмассивной Черной дыры какой-либо зонд может спокойно передавать сигналы наружу. Например, видеофильм о том, что видит наблюдатель в космолете, падающем под горизонт событий.

Можно возразить, что эти рассуждения явно опираются на формализм ньютоновой физики. Но тогда выходит, что согласно заявлениям теории относительности в области своей применимости ньютонова физика предсказывает *иной* исход, чем теория относительности, что для последней автоматически становится противоречием. Таким образом, мы видим явные отклонения от общепринятых выводов теории относительности: выявленная её математическими средствами возможность обойти её же запрет. Уйти из-под горизонта сверхмассивной Черной дыры и обмениваться из-под него сигналами с внешним миром возможно в принципе. Однако на этом парадоксальные, противоречивые трактовки решений теории относительности не заканчиваются.

Информация Черной дыры

Одним из уникальных, особых, невероятно фантастических вариантов Бытия, несомненно, является гипотеза, идея о так называемой голографической Вселенной. Эта совершенно абсурдная, противоречивая, крайне ненаучная фантазия в последние годы стала довольно популярной.

Но, как это нередко случается, начало ей положили строго научные открытия. Станным образом они трактуются так, будто вся наша Вселенная представляет собой чистую информацию, записанную на поверхности горизонта событий Черной дыры, некую голограмму. Однако гипотеза, фактически отвергая материалистическую философию, все-таки содержит серьезные внутренние логические противоречия. Источником её можно считать выводы, полученные Бекенштейном при исследовании Черных дыр. Одна из возможных формулировок этих выводов имеет вид:

"Энтропия черной дыры, измеренная в битах, пропорциональна площади ее горизонта, измеренной в планковских единицах" [15].

Известно, что энтропия системы имеет непосредственную связь с информацией, содержащейся в этой системе, поэтому закономерно появилось более компактное толкование этого тезиса в понятиях информации:

"Информация равна площади" [15].

Иначе говоря, информация, содержащаяся в Черной дыре, *равна* количественно площади её горизонта событий, измеренной в планковских единицах. Выглядит весьма загадочно, странно и противоестественно, поскольку получается, что в веществе Чёрной дыры информация отсутствует, но содержится в крайне условном, эфемерном "объекте" – горизонте событий. Впрочем, выкладки, доводы, подтверждающие эту гипотезу, на поверку оказываются ошибочными.

Чтобы увидеть это, достаточно рассмотреть две Черные дыры с массой каждой, например, близкой к минимальной,

равной приблизительно 2,3 масс Солнца. Очевидно, что каждая из них содержит один и тот же объём информации, поскольку в противном случае любые рассуждения о её количестве просто теряют смысл. Также очевидно, что обе Черные дыры имеют одинаковую площадь горизонта событий просто потому, что это две *одинаковые* Черные дыры.

Соединим эти две Черные дыры в одну. Суммарный объём информации при этом должен остаться прежним, иначе нам следовало бы объяснить, куда исчезла или откуда появилась дополнительная информация. Никаких разумных объяснений такому изменению информации, видимо, не существует в принципе:

$$B_{\Sigma} = \frac{8\pi}{\ell_h^2} \left(\frac{4,6 \cdot GM_c}{c^2} \right)^2$$

С другой стороны, масса суммарной Черной дыры также удвоится. Однако площадь горизонта событий при этом увеличится не в два раза, поэтому суммарный объём информации в планковских площадях суммарной Черной дыры составит

$$B_{\Sigma_g} = \frac{4\pi}{\ell_h^2} \left(\frac{2 \times 4,6 \cdot GM_c}{c^2} \right)^2$$

Итак, мы получили два выражения для суммарного количества информации в Черной дыре: как сумму информации двух одинаковых Черных дыр и как количество информации Черной дыры удвоенной массы. Как видим, эти две величины друг другу не равны:

$$\frac{B_{\Sigma}}{B_{\Sigma_g}} = \frac{8\pi}{\ell_h^2} \left(\frac{4,6 \cdot GM_c}{c^2} \right)^2 : \frac{4\pi}{\ell_h^2} \left(\frac{2 \times 4,6 \cdot GM_c}{c^2} \right)^2 = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{2}$$

Возникает противоречие, поскольку один и тот же итоговый объект имеет разное количество информации. Следовательно, количественное соответствие между площадью горизонта событий и информацией в Черной дыре по указанному правилу не может быть установлено.

Точно такое же несоответствие можно обнаружить и в связи площади горизонта событий с энтропией. Это вполне

ожидаемо, поскольку существует связь между информацией и энтропией. На то, что Черная дыра имеет энтропию S , пропорциональную площади ее горизонта событий указывает Хокинг [17, с.55] и приводит уравнение этой связи:

$$S = \frac{1}{4} A$$

Мы имеем полное право преобразовать эту пропорцию в более наглядную форму, выразив пропорциональность в явном символьном виде:

$$S = \frac{1}{4} k_R R^2 = \frac{1}{4} k_m \frac{4G^2}{c^4} m^2 = \frac{k_m G^2}{c^4} m^2,$$

Из этих двух уравнений следует

$$A = \frac{4k_m G^2 m^2}{c^4}$$

Здесь R – гравитационный радиус Черной дыры массой m , G – гравитационная постоянная, c – скорость света, а k_R и k_m – константы, дополнительные коэффициент пропорциональности, учитывающий все другие, возможно, не учтенные параметры Черной дыры. Как и в случае с информацией, здесь мы также обнаруживаем такое же загадочное, скачкообразное изменение энтропии. Две отдельные одинаковые Черные дыры, видимо, имеют в сумме энтропию

$$S_2 = 2 \times \frac{k_m G^2}{c^4} m^2$$

Если же они сливаются, то энтропия такой суммарной Черной дыры будет уже иной

$$S_\Sigma = \frac{k_m G^2}{c^4} (2m)^2 = \frac{4k_m G^2}{c^4} m^2 = 4S = \frac{1}{4} (A \times 4)$$

Конечно, энтропия возросла, что не запрещено, но коэффициент пропорциональности в рассмотренной ситуации явно стал другим, в 4 раза больше. Следовательно, и в этом случае энтропия не может быть пропорциональной площади горизонта событий Черной дыры.

Вращающиеся и заряженные Черные дыры

Два противоречивых предсказания теории, вернее, противоречивые трактовки её предсказаний подсказывают, что следует поискать ещё. Одну из таких дополнительных противоречивых трактовок можно найти в описании вращающейся Черной дыры Керра.

Это одно из частных точных решений уравнений Эйнштейна. Если проанализировать трактуемые характеристики решения, то можно обнаружить противоречие: остановка времени на горизонте событий несовместимо с движением в его окрестности. В самом деле, решение Керра опирается на обстоятельство, которое в принципе допускает экспериментальную проверку – регистрацию вращения, условно говоря, самого горизонта событий с увлечением падающих на него тел, частиц, излучения.

Принято считать, что у стационарной Черной дыры нет и быть не может никаких внешних характеристик, помимо массы, момента импульса и определённых зарядов. При всей строгости получения решения Керра, в нем обнаруживается противоречие с базовым формализмом теории относительности. Согласно теории относительности для внешнего наблюдателя на горизонте событий *любой* Черной дыры время останавливается. Как следствие остановки времени на горизонте событий становится невозможным и всякое движение, в том числе и вращение. Действительно, допустим, что наблюдатель с циферблатными часами падает на такую Черную дыру, скорость вращения которой в точности равна одному обороту в час, а плоскости вращения стрелок часов и Черной дыры совпадают. Если минутная стрелка часов направлена на внешнего наблюдателя, то она *всегда* должна быть направлена именно на него.

Внешний наблюдатель будет видеть, как падающие на Черную дыру часы замедляют свой ход, то есть минутная стрелка движется медленнее, чем один оборот за час. Следо-

вательно, её направление для внешнего наблюдателя все время будет меняться и уже не будет направлено на него.

Напротив, для наблюдателя, свободно падающего на Черную дыру, время течет как обычно и всякое движение в его окрестности продолжается, стрелка часов всегда направлена в одну и ту же точку – на внешнего наблюдателя. Получается, что в пределах одного оборота Черной дыры с одной точки зрения стрелка смотрит в одну сторону, а с другой точки зрения – в другую, что невозможно.

Противоречие снимается, если признать, что и скорость вращения при падении часов на Черную дыру для внешнего наблюдателя также замедляется. Но на самом горизонте часы останавливаются, следовательно, и скорость вращения также становится равной нулю. А это означает, что для внешнего наблюдателя вращение Черной дыры невозможно, для него такие дыры не существуют.

Несколько иное противоречие в трактовке можно обнаружить в описании Черной дыры с зарядом. Из элементарной электростатики мы знаем, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются. Теперь обратим внимание на Черные дыры с аккреционным диском. С одной стороны вращение диска, вроде бы, явно свидетельствует о вращении и самой Черной дыры. Но такое мнение не является достаточным основанием. Планеты, например, вращаются вокруг звезд совсем не потому, что вращаются звезды. Но нас интересует другое. Если Черная дыра заряжена, то она неизбежно вызовет поляризацию плазмы аккреционного диска. На внутренней части диска будут скапливаться частицы противоположного заряда, и именно они будут поглощены Черной дырой в первую очередь, уменьшая её заряд. Напротив, внешние слои диска будут отталкиваться и, видимо, джеты Черной дыры будут в большей степени иметь одноименный с нею заряд. То есть, отброшенные джетами частицы унесут часть заряда Черной дыры. В конечном счете, Черная дыра останется с нейтральным зарядом. Сложно судить о скорости этого процесса разряда Черной дыры, но он неизбежен.

Скорость расширения Вселенной

То, что измерение, определение *изменения* скорости расширения Вселенной связано с заметными техническими трудностями, не препятствует тому, чтобы с приемлемой точностью определить эту скорость в тот или иной момент времени в *абсолютном* значении. С другой стороны само это обстоятельство вряд ли можно считать противоречием, парадоксом трактовки. Скорее, это один из возможных взглядов, гипотез на проблему стационарности Вселенной. Здесь более важным является другое обстоятельство. В схожей трактовке – о характере расширения – можно определенно обнаружить противоречие. Согласно наблюдениям соотношение между красным смещением удалённых галактик и их удалённости не соответствует стандартному закону Хаббла: отдалённые галактики оказались менее яркими, чем это предсказывает закон, что трактуется как факт ускоренного расширения Вселенной. Действительно, согласно этому закону постоянная Хаббла H должна отвечать следующему соотношению между скоростью v удаляющейся галактики и её удалённостью R :

$$H = \frac{v}{R}$$

Скорость удаления галактики пропорциональна красному смещению: чем больше красное смещение, тем выше скорость галактики. Напротив, удаленность галактики обратно пропорциональна её яркости: чем она дальше, тем ниже её яркость. Поскольку в результате астрофизических наблюдений яркость галактики при известной скорости оказалась ниже, то это трактуется как её бóльшая удаленность – R_{fact} , что, в свою очередь, очевидно, соответствует меньшему значению постоянной Хаббла в прошлом:

$$H_{fact} = \frac{v}{R_{fact}}$$

Если выразить фактическую удаленность галактики через предсказываемую законом, то получим:

$$H_{fact} = \frac{v}{kR}, \text{ где } R_{fact} = kR, k \geq 1$$

Нам не известно, из каких соображений на самом деле было сделано заключение об ускоренном расширении Вселенной. Но такой вывод в приведенных выкладках, что называется, лежит на поверхности. Вполне возможно, что именно на основе подобных рассуждений и сделан вывод, что раньше постоянная Хаббла H_{fact} имела меньшее значение, чем в настоящее время H , то есть, Вселенная расширяется ускоренно:

$$H_{fact} = \frac{v}{kR} = \left(\frac{v}{R} \right) : k = \frac{H}{k}$$

Однако возникают некоторые сомнения в корректности приведенных вычислений. Во-первых, если далёкая звезда менее яркая, то выходит, что раньше она двигалась быстрее и, соответственно, поэтому должна была удалиться дальше. Но это означает замедленное расширение. Во-вторых, в приведённых уравнениях неявно присутствует доплер-эффект, поскольку рассматриваются скорости относительного движения галактики и наблюдателей. В общей теории относительности, как известно и нередко указывается в литературе, красное смещение является результатом изменения масштабного фактора. То есть, скорость в этом случае является как бы побочным эффектом. Попробуем определить это же ускорение расширения, исходя непосредственно из масштабного фактора. Рассмотрим два варианта расширения Вселенной с некоторыми условными параметрами расширения.

Первый вариант. Сразу же после испускания фотона удалённой галактикой на расстоянии $R = 2$ от наблюдателей Вселенная мгновенно расширилась в 2 раза, после чего мгновенно же и прекратила расширение. В этом случае говорить о доплер-эффекте нельзя, поскольку галактика и наблюдатели больше не удаляются друг от друга. Однако масштабный фактор явно изменился, увеличив до 4 расстояние между галактикой и наблюдателями. В самом деле, в момент излучения фотона он был равен 2, как мы приняли, и фотон имел единич-

ную длину. После мгновенного расширения Вселенной удвоились и масштабный фактор μ , соответственно, длина волны фотона. Будем считать, что удвоение соответствует и красному смещению $z = 2$. Очевидно, что до наблюдателя фотон пройдёт удвоенное расстояние $R = 4$, которому будет соответствовать уменьшение его светимости в 16 раз.

Второй вариант. Фотон почти полностью прошёл расстояние $R = 2$ от галактики до наблюдателей в стационарной Вселенной. Яркость, светимость его (звезды, конечно) уменьшилась в 4 раза. И только на минимальном удалении от наблюдателей Вселенная мгновенно расширилась в те же 2 раза, после чего мгновенно же прекратила расширение. Масштабный фактор также увеличился в 2 раза, увеличив, соответственно, и длину волны фотона в 2 раза. Как и в первом варианте это будет соответствовать красному смещению $z = 2$. Однако фотон до этого момента прошёл только расстояние $R = 2$, поэтому его яркость (яркость звезды) уменьшилась только в те самые 4 раза. Допплер-эффект отсутствует и в данном случае, поскольку область пространства, в котором в момент расширения находился фотон, и которая фактически является его излучателем, и наблюдатели не удаляются друг от друга. Действительно, если все-таки признать наличие доплер-эффекта в процессе мгновенного расширения Вселенной, то красное смещение в этот момент должно стать равным бесконечности.

Сравнивая варианты, мы имеем все основания заключить, что в первом случае Вселенная расширялась замедленно, во втором – ускоренно. Но при этом, ускоренному расширению опять-таки соответствует более высокая яркость удалённых галактик. Результат, следует заметить, странный и даже невероятный. Более того, его даже можно назвать нелепым, поскольку он резко противоречит существующим взглядам: при ускоренном расширении Вселенной, пространства, оказывается, мы должны видеть далёкие галактики более яркими. Это ведет к довольно неприятным последствиям для гипотезы

о темной энергии, в основе которой лежит именно ускоренное расширение Вселенной.

Вместе с тем, почему первый способ вычисления дал результат об ускоренном расширении, а второй, наоборот, о замедленном? Какой способ правильный? Рассмотрим расхождение детальнее. Для большей наглядности перепишем закон Хаббла в терминах яркости. Поскольку яркость Y обратно пропорциональна удаленности, то получаем, соответственно, для ускоренного (s) и нормального (n) расширения Вселенной

$$H_s = vY_s$$

$$H_n = vY_n$$

Величину скорости или красного смещения берём одну и ту же, поскольку несоответствие в том и состоит: для некоторого красного смещения яркость оказывается ниже, чем это следует из основного закона Хаббла. Поэтому:

$$\frac{H_s}{Y_s} = v = \frac{H_n}{Y_n}$$

И здесь теперь уже явно видим: чем больше постоянная Хаббла, тем больше и яркость галактики. То есть, при ускоренном расширении Вселенной удаляющиеся галактики при некотором заданном красном смещении имеют более высокую яркость, $Y_s > Y_n$. Теперь мы можем выяснить причину обнаруженного расхождения с предыдущими вычислениями: это традиционная проблема интерпретации. Мы назвали постоянную Хаббла в прошлом H_{fact} , но фактически эта постоянная соответствует нормальному расширению Вселенной, без ускорения. Следовательно, и величина удаленности R_{fact} также соответствует этому режиму расширения – без ускорения. Поэтому величина R – это удаленность галактики в режиме ускоренного, нынешнего, как считается, расширения Вселенной. Но мы приняли, что $k \geq 1$, считая, что измеренное значение удаленности – это прошлое значение, удаленность, которая должна была быть при нормальном расширении Вселенной. Но в реальности всё наоборот: галактика оказалась дальше,

чем должна быть при нормальном, не ускоренном расширении, то есть, $R_{fact} < R$. При нормальном, без ускорения расширения Вселенной в прошлом удаленность должна быть меньше, чем при ускоренном, нынешнем. То есть, следует принять $k \leq 1$ и соотношения вновь приводят к замедленному расширению Вселенной.

Конечно, приведенные вычисления сделаны для некоторых довольно абстрактных ситуаций. Но так ли они далеки от реальности? Конечно, строго научными, аналитическими их назвать сложно. Поэтому попробуем проделать эти же вычисления строго формально, аналитически, как говорится, с линейкой и калькулятором в руках.

Традиционно за основу возьмем уравнение движения тела в расширяющемся пространстве. Из формализма общей теории относительности известно соотношение для масштабного фактора:

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Преобразуем его в обычное дифференциальное уравнение:

$$\dot{a} - Ha = 0$$

Это уравнение имеет простое решение, которое можно назвать стандартным законом Хаббла для расстояний:

$$r = r_0 e^{Ht}$$

Действительно, дифференцированием находим уравнение для скорости, которое теперь уже явно имеет вид известного стандартного уравнения закона Хаббла

$$v = \dot{r} = r_0 H e^{Ht} = Hr$$

Для проверки подставляем эти величины в уравнение для масштабного фактора и убеждаемся, что они ему точно соответствуют:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{\dot{r}}{r} = \frac{r_0 H e^{Ht}}{r_0 e^{Ht}} = H$$

Нам также известно, что в космологии используются соответствующие наблюдательные параметры – яркость удаленной галактики и её красное смещение. Яркость является математически тождественной величиной для удалённости. Определяя яркость стандартной свечи – сверхновой Ia, получают точное значение её удалённости. Чем ярче звезда, тем она ближе к нам. Второй параметр – красное смещение в точности соответствует скорости, с какой галактика удаляется от нас: чем больше смещение, тем выше скорость удаления. Иначе говоря, фактически в законе Хаббла присутствуют не скорости и расстояния, а красные смещения и яркости. И главным основанием для утверждений об ускоренном расширении Вселенной как раз и стал тот факт, что яркость дальних сверхновых оказалась ниже, чем это должно следовать из закона Хаббла. Но мы попробуем аналитически проверить, какой вывод должен следовать из обнаруженного несоответствия. Мы просто построим два графика: зависимости от времени скорости удаления и удалённости или, что то же самое, красного смещения и яркости. Каждому моменту времени, тем самым, на графике будут соответствовать две эти величины. Кроме этих двух графиков, мы здесь же построим еще два таких же графика, но исходя из предположения, что галактика удаляется с ускорением, с тем самым несоответствием стандартному закону. Поскольку ускорение в стандартном законе Хаббла мы можем отразить только величиной постоянной Хаббла, то ускорение, очевидно, означает, что раньше было одно её значение, а со временем оно увеличилось. Точный закон увеличения постоянной Хаббла нам не известен, да, собственно говоря, и не нужен, поэтому мы просто возьмем за основу один из возможных в принципе вариантов, когда постоянная возрастает с течением времени. Параметр такого возрастания, константу $a > 0$ мы так и назовём – ускорением расширения:

$$H_{new} = H(1 + at)$$

H – исходное, первичное значение постоянной
 H_{new} – новое, ускоренное значение постоянной

Как видим, в начальный момент времени $t = 0$ значение постоянной Хаббла принято равным некоторому исходному значению H , а в дальнейшем она увеличивается и достигает современного значения H_{new} , если ускорение, темп её возрастания $a > 0$. С учетом этого запишем уравнения движения для разных режимов:

Уравнение движения без ускорения

$$r_1 = r_0 e^{Ht}$$

Уравнение ускоренного движения

$$r_2 = r_0 e^{Ht(1+at)}$$

Уравнение скорости движения без ускорения, пропорциональной красному смещению:

$$v_1 = \dot{r}_1 = r_0 H e^{Ht}$$

Уравнение скорости ускоренного движения, пропорциональной красному смещению:

$$\begin{aligned} v_2 = \dot{r}_2 &= \left(r_0 e^{Ht(1+at)} \right)' = r_0 e^{Ht(1+at)} \times H(1+2at) = \\ &= Hr_0 (1+2at) e^{Ht(1+at)} \end{aligned}$$

Выводы об ускоренном расширении сделаны на основании того, что для одного и того же красного смещения, то есть скорости удаления, яркости различны. Поэтому нам нужно найти моменты времени, когда красные смещения для двух уравнений движения равны, то есть, равны скорости движения. Очевидно, что эти одинаковые скорости, это одно и то же красное смещение были достигнуты в *разные* моменты времени для каждого из режимов расширения:

$$v_1 = v_2 = r_0 H e^{Ht} = Hr_0 (1+2at) \cdot e^{Ht(1+at)}$$

В этом уравнении мы отбросили индексы у времени, чтобы не усложнять его вид, читаемость чрезмерно мелкими индексами. В данном случае просто нужно помнить: время слева – это время t_1 , время достижения красного смещения при обычном расширении, а время справа – это время t_2 , время достижения этого же красного смещения при ускоренном расширении. Упростим запись

$$r_0 H e^{Ht} = H r_0 (1 + 2at) \cdot e^{Ht(1+at)}$$

Сокращаем

$$e^{Ht} = (1 + 2at) \cdot e^{Ht(1+at)}$$

Логарифмируем и восстанавливаем индексы у времени

$$Ht_1 = Ht_2(1 + at_2) + \ln(1 + 2at_2) \quad (8)$$

Каждое из времён соответствует моменту достижения одного и того же красного смещения. Теперь мы можем сравнить и расстояния, соответствующие этому красному смещению в каждом из режимов движения. Для этого просто вычисляем их отношение:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{H r_0 e^{Ht(1+at)}}{r_0 H e^{Ht}} = \frac{e^{Ht(1+at)}}{e^{Ht}}$$

Как и выше, в уравнении индексы у времени не проставляем, чтобы не делать запись слишком мелкой, трудно читаемой. Но мы помним, что в числителе – время t_2 , а в знаменателе – t_1 . Выше мы получили соотношение для этих двух времён. Подставляем в знаменатель значение величины Ht_1 из уравнения (8) и вновь отбрасываем индексы мелким шрифтом у времени, тем более что теперь это уже одно и то же время t_2 :

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{e^{Ht(1+at)}}{e^{Ht(1+at) + \ln(1+2at)}}$$

Преобразуем

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{e^{H(1+at)t}}{e^{Ht(1+at)}(1 + 2at)} = \frac{1}{1 + 2at} \leq 1$$

Полученная величина при заданных условиях однозначно меньше единицы. Индекс 2, напомним, соответствует ускоренному расширению. Полученное соотношение показывает, что $r_1 > r_2$. Мы исходили из условия, что красные смещения галактик одинаковые. В результате получили, что галактика, двигавшаяся с ускорением, находится на меньшем удалении. Учитывая, что это удаление обратно пропорционально яркости, делаем вывод: ускоренно двигавшаяся галактика видится

более яркой, то есть, она ближе. Таким образом, при ускоренном расширении Вселенной галактики видны более яркими.

Поскольку у нас есть две пары уравнений, соответствующие обычному и ускоренному расширению Вселенной, мы можем сопоставить яркости и красные смещения для двух вариантов расширения Вселенной также и на графиках. Делаем графические построения и получаем следующую картину:

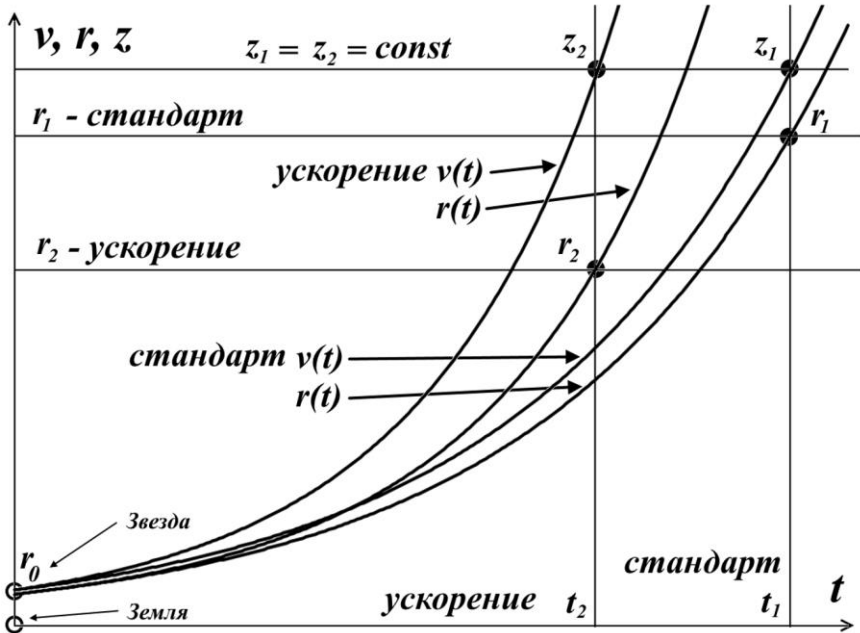


Рис.15. Графики скорости и расстояний

Мы исходим из наблюдательного факта, что удалённые галактики имеют более низкую светимость. То есть, некоторому конкретному красному смещению, соответствующему какой-то скорости, отвечает некоторая удалённость галактики. Поэтому проведём на графике горизонтальную линию, соответствующую этому некоторому красному смещению $z_1 = z_2 = \text{const}$. Это два сравниваемых закона, поэтому мы и берём равенство в них именно красного смещения.

Поскольку красное смещение – это следствие той или иной скорости движения, то тем самым мы выбрали точки на этих графиках – скорости движения галактики согласно стандартному закону Хаббла и его ускоренной версии. Как видим, эти красные смещения соответствуют двум разным моментам времени t_1 и t_2 . Это не должно вызывать удивления, поскольку достижение указанного красного смещения, естественно, произойдет в разные моменты времени. Если галактика двигалась без ускорения, то это будет момент времени t_1 , если же она двигалась ускоренно, то, очевидно, этот момент наступил бы раньше – t_2 . И здесь мы переходим к самому главному: в эти же моменты времени галактика имела и соответствующие удалённости – r_1 и r_2 .

Заметим, что шкала времени – это не обычная календарная шкала от большого взрыва до наших дней. Это шкала времени по внутренним часам удаляющейся звезды. Поскольку движение относительное, то мы можем с полным основанием считать, что не звезда удаляется от Земли, а Земля удаляется от звезды. В этом случае каждое время на шкале и означает, что в этот момент излученные фотоны достигли Земли. Два разных времени такого события означают простое совмещение на одном рисунке двух разных графиков.

Что можно противопоставить приведённым выкладкам? Это строгие аналитические вычисления, исходящие из неоспоримых исходных данных, предположений, астрономических наблюдений. Единственное, что можно назвать неполнотой – это отсутствие точных *числовых* значений удалённостей галактики в зависимости от её характера движения. Да, числовые значения параметров взяты предельно условными. На данном графике в компьютерную программу были заложены некоторые условные значения безразмерных параметров. Несомненно, что с иными, реальными физическими значениями этих параметров и графики будут иметь несколько иной вид, но представляется совершенно маловероятным, чтобы его *характер* принципиально отличался от представленного. А главная его сущность проявилась в неравенстве $r_1 > r_2$, что

означает: при ускоренном расширении Вселенной удалённые галактики должны быть *более яркими*, чем при равномерном или замедленном расширении.

Следует откровенно признать, что в научном смысле это не только интересные, но и довольно странные, очевидно, спорные выводы, поскольку они резко противоречат не только мнению большой группы всемирно известных ученых, крупнейших специалистов в этой области, но и мнению ряда других авторитетных организаций, высоко оценивших труд этих ученых. Кроме того, эти выводы автоматически ставят под сомнение и выводы специалистов в области общей теории относительности и космологии, поскольку темная энергия теперь уже должна объяснить причину замедления, а не ускорения расширения, либо просто уйти из формализма теории. Вместе с ней, видимо, должны быть пересмотрены и решения, связанные с лямбда-членом в уравнении Эйнштейна. Отказ от темной энергии вновь поднимает вопрос о плоскостности Вселенной, поскольку общая масса её должна быть пересчитана, уменьшена ни много, ни мало – на 75 процентов, массу ставшей теперь уже ненужной темной энергии.

Здесь нельзя обойти и проблему ещё одной темной субстанции – темной материи. Считается, что это ненаблюдаемое вещество вызывает формирование специфических кривых вращения звёзд в галактиках. Например, в галактике Млечный путь звёзды как вблизи её центра, так и на её окраине движутся практически с одной и той же скоростью. Однако возникает весьма странная ситуация. Неважно, кто вызывает такое движение звезд – темная или какая иная материя. Дело в том, что такие кривые вращения, такой характер движения звёзд приводит к неестественной картине. Простые вычисления и анализ показывают: никакие рукава галактики не могут просуществовать даже на протяжении двух оборотов галактики. То, что у нашей галактики такие "стройные" рукава выглядит просто мистически. На протяжении нескольких миллиардов лет жизни *именно в наши дни* рукава Млечного Пути, а также множества других галактик приобрели такую правильную

форму. Всего оборот назад рукава Млечного Пути должны были быть закручены в обратном направлении. Всего через один-два оборота в будущем они полностью исчезнут. Еще раз повторим: эта картина возникнет не по причине наличия темной материи, которую никто пока не обнаружил. Эти эффекты определяются исключительно *кривыми вращения*, которые являются точно зафиксированным наблюдательным фактом. Весьма парадоксальным фактом.

Возвращаясь к полученным результатам, заметим, что все эти серьезные последствия, противоречия с известными представлениями о характере расширения Вселенной, конечно же, могут вызвать у кого-то сомнения в правильности представленных расчетов. Но, с другой стороны, если выкладки верны, что более вероятно, то они довольно неплохо вписываются в альтернативную гипотезу Большого взрыва – гипотезу о возникновении вещества в процессе фазового превращения Материи, первоосновы и первопричины всего сущего. Вечная и бесконечная Материя претерпела фазовый переход, схожий с процессом в камере Вильсона, в результате чего она как бы сконденсировалась, веществолизировалась, образовав огромную область вещественного мира, нашу Вселенную. Наличие вещества одновременно запустило и процессы его движения, преобразования, взаимодействий, которые мы воспринимаем как течение времени. Никакого точечного Большого Взрыва в этом случае не требуется. Конечно, веществолизация могла происходить и из точки в виде сферической волны, наподобие горения тополиного пуха от брошенной в него спички. В первый момент времени образовалась основная субстанция вещества, которую вполне можно отождествить с первичным бульоном гипотезы Большого взрыва. Очевидно, что при таком подходе уже нет принципиальной необходимости в инфляции, как расширения именно вещества, первичного бульона. Сам факт фазового перехода выглядит как раз так, будто возникшее пространство-время стремительно расширилось. Но это лишь на первом этапе. В дальнейшем процессы перехода Материи в вещество не пре-

кратились, но существенно замедлились. Теперь уже не образуется горячий кварковый бульон, теперь уже в пространство вещества добавляются лишь мельчайшие "атомы пространства" – области физического вакуума, области квантовой пены и тому подобного. Выглядит это как раз как расширение самого пространства. Процесс преобразования не может длиться вечно, поэтому и добавление атомов пространства со временем замедляется, замедляя и видимость расширения Вселенной. Кроме того, наилучшим местом для появления таких атомов является пустое пространство. В областях гравитационной связанности плотность таких атомов и без этого велика, поэтому там им возникнуть сложнее. Очевидно, все эти рассуждения не имеют статуса строгого доказательства.

Стационарная Вселенная

Обнаруженные противоречивые, парадоксальные трактовки предсказаний, решений общей теории относительности естественным образом требуют продолжить поиск противоречивых трактовок в других её решениях. Вывод о расширении Вселенной, расширении пространства-времени и, как следствие, появление знаменитых лямбда-члена в уравнении Эйнштейна и тёмной энергии является, пожалуй, даже более популярным, чем предсказание Черной дыры. Их введение в формализм теории признано логически неизбежным. И, хотя среди трактовок расширения Вселенной уже присутствует специфическое экспоненциально (на бесконечном времени) стационарное решение, возможно и другое, буквальное (здесь и сейчас) стационарное решение, в реальном виде. Другими словами, в настоящий момент даже при наличии красных смещений мы имеем все основания рассматривать Вселенную как стационарную. Рассмотрим следующую модель.

Предположим, что ровно 1000 лет назад вся наша видимая Вселенная прекратила своё расширение. Либо мгновенно, либо на протяжении очень короткого времени – годы, десятилетия, столетия. Что в этом случае будут наблюдать астроно-

мы? Поскольку изначально расширение было, значит, масштабный фактор привёл к "вытягиванию" волновых пакетов излучения всех звёзд и галактик. Для большей наглядности представим, что в момент остановки расширения все эти звёзды и галактики мгновенно погасли и больше ничего не излучают. Тем не менее, уже излученные потоки света по-прежнему видны нам и будут видны, по меньшей мере, несколько тысяч лет, по времени их движения от самых близких к нам звёзд к Земле, времени их существования. На протяжении последующих 1000 лет мы по-прежнему будем видеть эти волновые потоки "удлиненными", с красным смещением. При этом величина этого смещения будет точно такой же, как и согласно стандартной модели расширения Вселенной.

Но почему? Мы же приняли, что расширение прекратилось 1000 лет назад. Следовательно, скажем, через 500 лет к нам должен начать поступать свет, который уже не попал в период прошлого расширения Вселенной. То есть, весь свет от одного и того же источника, начиная с некоторого момента будет иметь одно и то же красное смещение. Тем более что стационарность могла начаться и раньше. И эту неизменность красного смещения мы, очевидно, должны сразу же заметить. В том числе, отсутствие уменьшения температуры реликтового излучения. Вернее, на протяжении некоторого разумного срока наблюдений. Но увидим ли мы это изменение? Самым очевидным наблюдением следует считать поведение реликтового излучения. Как и любое излучение от звезд и галактик оно испытывает красное смещение, имеет температуру, величина которой, измерена приемлемо точно. Поэтому реликтовое излучение ведет себя подобно излучению звёзд, галактик.

Это смещение, с одной стороны, означает увеличение длины волны света, а с другой – его охлаждение. Известно, что температура наблюдаемого ныне реликтового излучения равна примерно $2,725^{\circ}$ по Кельвину.

Из логических соображений очевидно, что каждая новая «порция» реликтового излучения поступает к нам из всё более и более удалённых областей Вселенной. Следовательно, его

красное смещение также должно возрасть. Расстояние, с которого мы сегодня его принимаем, не может быть больше, чем 5,4 млрд. световых лет. Это предельное расстояние, свет от галактик, которые находились дальше, мы ещё не получаем.

Действительно, за время, равное возрасту Вселенной, до Земли дошли все без исключения фотоны реликтового излучения, находившиеся 14 млрд. лет назад ближе некоторого расстояния r_{\max} . Уравнение движения этой области излучения имеет вид:

$$r_{14} = r_{\max} e^{Ht}$$

Здесь r_{14} – расстояние, которое за время жизни Вселенной свет должен пройти от звезды, находившейся изначально на расстоянии r_{\max} . Это расстояние, очевидно равно:

$$r_{14} = r_{\max} e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9}$$

Этот путь до Земли за это же время фотоны прошли со скоростью света $c=1$, следовательно, пройденный светом путь равен

$$13,7 \times 10^9 \times c = r_{\max} e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9}$$

Отсюда находим $r_{\max} = 5,4 \times 10^9$ млрд. световых лет и получаем ожидаемый и очевидный результат для уравнения движения горизонта видимости Вселенной:

$$r_{14} = 5,4 \times 10^9 \times e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Вследствие расширения Вселенной температура реликтового излучения снижается. Очевидно, что всё реликтовое излучение, которое мы сейчас получаем, имеет "место рождения" – горизонт Вселенной. Изначально, он был равен r_{\max} , а ныне составляет 13,7 млрд. св. лет.

Как мы приняли, расширение Вселенной прекратилось 1000 лет назад. Следовательно, мы уже давно получаем реликтовое излучение без космологического красного смещения. А если Вселенная не прекратила расширение? Тогда реликтовое излучение должно ежедневно уменьшать свою температуру и увеличивать длину волны. Насколько бы в этом

случае за 1000 лет они изменились? Вычислим это. Согласно уравнению движения соответствующей области r_{\max} – самого дальнего источника реликтового излучения, путь, пройденный им за это время, будет равен:

$$r_{1000} = 5,4 \times 10^9 \times e^{68 \times 10^{-12} \times (13,7 \times 10^9 + 10^3)}$$

Уравнение движения отражает изменение масштабного фактора в общей теории относительности. То есть, параметра, соответствующего изменению масштабов во Вселенной в процессе её расширения. А конкретнее, насколько изменились размеры пространства за время расширения. Поэтому уравнение позволяет вычислить, во сколько раз увеличится пространство горизонта Вселенной за каждые 1000 лет:

$$\begin{aligned} M_{1000} &= \frac{r_{1000}}{r_{14}} = \frac{5,4 \times 10^9 \times e^{68 \times 10^{-12} (t+0,5 \times 10^9)}}{5,4 \times 10^9 \times e^{68 \times 10^{-12} t}} = \\ &= e^{68 \times 10^{-12} \times 10^3} = 1 + 6,8 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Очевидно, во столько же раз растянутся световые волны, увеличится длина волны. Период 1000 лет – достаточно длительный период. Но из него можно определить, как будут увеличиваться длины волн, например, каждые 100 лет. Максимум спектра реликтового излучения приходится на длину волны 1,9 мм. Через 1000 лет эта волна будет иметь длину:

$$\lambda_{\max} = 1,9 \times (1 + 6,8 \times 10^{-8}) = 1,9 + 1,3 \times 10^{-7}$$

Следовательно, каждые 100 лет она удлинится на

$$\Delta\lambda = \frac{(1,9 + 1,3 \times 10^{-7}) - 1,9}{10} = 1,3 \times 10^{-8} \text{ мм}$$

Соответственно, уменьшается и температура излучения. Можно ли современными средствами зафиксировать такое незначительное уменьшение температуры реликтового излучения вследствие расширения Вселенной? Например, за год эта длина изменится ещё в 100 раз меньше. В равной мере это относится и к изменению длин волн излучений галактик и звезд в этих галактиках.

Получается, что определить наблюдениями расширяется Вселенная или она стационарна крайне сложно или в настоящее время даже невозможно. Все измерения показывают скорость её расширения в последний момент до его прекращения. Иначе говоря, красное смещение свидетельствует, что расширение было, но оно ничего не говорит о том, продолжается ли оно сейчас.

2016 – май 2018

Литература

1. Aspect A. "Bell's theorem: the naive view of an experimentalist", 2001. URL:
http://quantum3000.narod.ru/papers/edu/aspect_bell.zip
2. Bell J.S., "On the Einstein Podolsky Rosen paradox", Physics Vol.1, No.3, pp.198-200, 1964.
3. Вейник А.И., "Теория движения", Мн.: "Наука и техника", 1969. 448 с. URL:
<http://move-m.nxt.ru/Process/Articles/1969teordv.htm>
<http://www.veinik.ru/veinik/articles/9a/269/attach.zip>
4. Википедия, статья "Информация". URL:
<http://ru.wikipedia.org/wiki/Информация>
5. Вопросайка, "Что такое информация". URL:
<http://www.voproshaika.narod.ru/75.html>
6. Гончаренко Е.А., Знаменский В.С., Феномен информации, <http://school.bakai.ru/?id=infpb0101>
7. Демин А.И., Информация, как всеобщее свойство материи, <http://prvinform.narod.ru/INFORM.HTM>
8. Каку М., Гиперпространство: научная одиссея через параллельные миры, дыры во времени и десятое измерение / Митио Каку; пер. с англ.: [У.Сапцина]. – М.: АНФ, 2014. - 501 с.
9. Карпенко "Вселенная разумная", "Электронная библиотека ModernLib.Ru". URL:
http://www.modernlib.ru/books/karpenko_maksim/vselennaya_razumnaya/
10. Коллендер Б., "Информация об информации", Электронный научный семинар. URL:
http://elektron2000.msk.ru/kollender_0225.html

11. Мазур М., "Качественная теория информации". URL: http://sbiblio.com/biblio/archive/masur_kach/00.aspx
12. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж., Гравитация, т.1-3. – М.: "Мир", 1977
13. Могилёв А.В., Пак Н.И., Хённер Е.К., "Информатика", - М.: Academia, 2004.
14. Огурцов А.Н. Физика для студентов. Квантовая физика. Лекции по физике. . URL: <http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/ogurtsov/lect7quant.pdf>
15. Сасскинд Леонард, Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. — СПб.: Питер, 2013. — 448 с.
16. Спецкурс на весенний семестр 2013/2014, URL: http://www.mi.ras.ru/noc/13_14/2/lectures.22.04.14.pdf
17. Хокинг С., Пенроуз Р., Природа пространства и времени. — Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2000
18. Эйнштейн А. "К электродинамике движущихся тел", Собрание научных трудов в четырех томах. Том 1. Статьи, рецензии, письма. Эволюция физики. М.: Наука, 1965. http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Einstein_t1_1965ru.djvu
19. Эйнштейн А. Собрание научных трудов в четырех томах. Том 4. Статьи, рецензии, письма. Эволюция физики. М.: Наука, 1967. URL: http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Einstein_t4_1967ru.djvu

Оглавление

<i>Квантовые проблемы теории относительности</i>	3
Квантово-релятивистский эксперимент	3
Измерения	6
Анализ результатов	8
Парадокс коллапса волновой функции	10
<i>Что такое информация</i>	14
Сущность квантовой информации	23
Носитель квантовой информации	27
<i>Нелокальная передача информации</i>	30
Создание запутанных состояний	30
Взаимные превращения запутанных состояний Белла	34
Исследование не-белловских состояний	37
Логика и философия нелокальности	49
<i>Квантовая телепортация</i>	56
Телепортация состояния	56
Телепортация запутанности	64
Квантовый семафор	69
<i>Передача сигнала нуля</i>	75
<i>Передача сигнала единицы</i>	78
<i>Противоречия в описании Черной дыры</i>	86
Можно ли уйти из-под горизонта событий?	87
Информация Черной дыры	91
Вращающиеся и заряженные Черные дыры	94
Скорость расширения Вселенной	96
Стационарная Вселенная	108
<i>Литература</i>	113

Путенихин П.В.

Границы теории относительности

ISBN 978-5-907035-65-2



Подписано в печать 22.05.2018
Формат 60x84/16 Гарнитура «Times New Roman».
Объем 7,25 п.л. Бумага офсетная 80 г/м². Тираж 25 экз.

Заказ № 14/22058.
Отпечатано в соответствии с предоставленными
материалами в ООО «Амирит»,
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.