

Телепортация: с Земли в космос и обратно

Кандидат
физико-математических наук
С.М. Комаров

Все запутано

Эффект квантовой телепортации впервые был экспериментально подтвержден в конце прошлого-начале нынешнего века. Кстати, автором одной из этих пионерских работ были исследователи,



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

ныне занимающиеся этой тематикой в МГУ им. М.В.Ломоносова. Впоследствии такие эксперименты многократно повторялись с целью улучшить качество телепортируемого состояния. В том числе были проведены эксперименты с массивными объектами -- ионами. Что же касается использования этого эффекта для систем связи, то одну из первых работ с обсуждением этой идеи Ричард Беннет из компании IBM, Жиль Брассар, Клод Крепо из Монреальского университета и их коллеги из других организаций опубликовали в «Physical Review Letters» в 1993 году. Примерно тогда же появились участники этой связи — Алиса с Бобом, то есть передатчик

и приемник информации, Чарли — посредник в передаче, Анна — злоумышленник, желающий вскрыть систему связи, и другие; с тех пор эти условные имена кочуют из одной научной статьи в другую. Задача же была поставлена так. Предположим, у Алисы есть квантовый объект в неизвестном состоянии. Может ли Боб получить от нее достаточно информации, чтобы воспроизвести это квантовое состояние? Сложность тут такая: любое измерение уничтожает квантовое состояние и оставляет одно лишь классическое. Пользуясь известной аналогией с котом Шрёдингера, который ни жив ни мертв, пока его не наблюдают, — после измерения квантовый объект окажется либо тем, либо этим. Соответственно и Боб, будучи классическим объектом, может иметь дело либо с живым котом, либо с мертвым, а вот так, чтобы ни то ни другое, да еще с теми же вероятностями каждого из этих состояний, что и у кота, принадлежащего Алисе, — у него не получится. На языке математической физики это означает, что до измерения объект был с какими-то вероятностями сразу во всех возможных классических состояниях, а после измерения все вероятности, кроме одной, обнулились.

Казалось бы, коль скоро измерение уничтожает квантовое состояние, положение Боба безнадежно. Однако Беннет с коллегами нашли выход. Пусть у Боба имеется на руках квантовый объект, который неразрывно связан с квантовым объектом Алисы. Такое возможно — если две частицы родились одновременно в одном месте, то их квантовые свойства оказываются запутанными, и удивительным образом они никогда не могут забыть о своем происхождении: если измерить состояние одной частицы, то сразу станет известно и состояние другой. Это явление квантовой запутанности, по мнению Эрвина Шрёдингера, составляет самую суть квантовой механики.

Проявляется запутанность, например, так. Представим себе, что частица со спином 0 распадается и порождает две частицы со спинами $\frac{1}{2}$. Согласно законам сохранения, их спины должны лежать в противоположных направлениях, чтобы в сумме дать исходный ноль. Теперь измерим проекцию спина одной из частиц на любое направление в пространстве. У второй частицы в результате спин окажется повернутым в противоположном направлении, и никак иначе: сделать их направленными в одну сторону невозможно. И такая запутанность существует на всех масштабах Вселенной, как во времени, так и в пространстве. По сути, в ней нет ни одной частицы в незапутанном состоянии. Более того, нужно очень поста-

раться, чтобы создать пару квантовых частиц, которые бы не были спутаны друг с другом.

Как же мы можем считать частицы Вселенной независимыми, если каждая частица запутана с бесчисленным множеством других частиц? Возможно, дело в том, что такая запутанность всех частиц со всеми усредняется, и этим средним фоном, коль скоро он для всех частиц Вселенной одинаков, можно пренебречь при рассмотрении какого-то единичного явления, когда новая запутанность создана руками экспериментатора. Есть мнение, что запутанность время от времени исчезает, потому что происходит классическое «измерение» свойств частицы, что заставляет ее выбрать одно-единственное из всего множества классических состояний, присутствующих в квантовом состоянии, причем запутанность успешно разрушается.

Связь по двум каналам

Используя свойство квантовой запутанности, проблему Боба удастся решить так. Предположим, у Алисы оказались два запутанных фотона. Поляризации этих фотонов должны быть взаимно ортогональны, но в каком именно направлении они поляризованы — неизвестно. Один из этих фотонов Алиса отправляет Бобу, и у них оказывается по одной частице, состояния которых запутаны между собой. Алиса берет третью частицу — ее-то состояние Боб должен воспроизвести — и создает общее состояние из этой частицы и своей. Например, это можно сделать одновременным измерением их поляризаций. Соответственно, с учетом частицы Боба, у них получилось состояние из трех частиц — двух, находящихся в прямом взаимодействии, и третьей, запутанной с исходной. Теперь Алиса измеряет совместное направление поляризации своих двух частиц. Тем самым она разрушает и квантовое состояние той частицы, что нужно телепортировать, но частица Боба сохраняет то состояние, которое она приобрела в результате предыдущих манипуляций Алисы. То есть Алиса уничтожила частицы в результате измерения, но из-за свойства запутанности измеренное квантовое состояние оказывается телепортировано Бобу. Алисе остается только по другому каналу связи передать Бобу информацию о том, какова совместная поляризация ее частиц. После этого Боб узнает, каким образом ему нужно повернуть поляризацию своего фотона, чтобы получить полную копию состояния той третьей частицы, с которой манипулировала Алиса. Очень важно, что исходное квантовое состояние уже



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

разрушено измерениями — ведь, согласно законам квантовой механики, клонировать квантовое состояние, то есть создать точно такую же частицу, невозможно. Невозможно и вмешательство Анны — перехватив частицу, предназначенную Бобу, она проведет ее измерение, и у Боба окажется объект с разрушенным квантовым состоянием — такой объект работать не будет. А если Анна измерений не проведет, то она и не узнает нужную ей информацию.

Наличие двух каналов передачи информации, квантового и классического, снимает многие теоретические ограничения. Например, квантовое состояние фотона Боба меняется сразу же, как только Алиса привела во взаимодействие имеющиеся у нее два фотона. Но узнать об этом он может, лишь получив от Алисы классические инструкции. Значит, не нарушается закон, запрещающий взаимодействие со сверхсветовыми скоростями, ведь Боб узнает об этом, лишь получив классический сигнал по другому каналу. Решается и проблема машины времени. Дело в том, что Боб, действуя в будущем, неизбежно изменяет состояние фотона у Алисы в настоящем. Этот парадоксальный вывод разбирали многие исследователи, например Роджер Пенроуз — знаменитый изобретатель мозаики Пенроуза, автор многих открытий в математике, физике черных дыр и прочем («Philosophical Transactions A», 1998, 356, 1927-1939; doi: 10.1098/rsta.1998.0256). Кстати, предыдущие рассуждения о всеобщей запутанности взяты из этой статьи.

Чтобы выпутаться из петли времени, приходится опять прибегать к оговорке: Алиса-то узнает про действия Боба уже после того, как Боб ей об этом сообщит, и, стало быть, причинно-следственная связь классического мира нарушена не будет.

Интересно, что это обращение квантовой телепортации во времени уже было использовано на практике, например когда канадские специалисты попробовали создать линию квантовой связи на базе Университета Калгари (arXiv:1605.08814v1 [quant-ph] 27 May 2016). В 2016 году они поставили сле-

дующий опыт. В центре Калгари, в зале Городского совета, находился Чарли. Он получал от Алисы, расположившейся в 2,2 км от него в пригороде, фотоны в неизвестном состоянии, а от Боба, находившегося в университете на расстоянии 11,1 км, — один из спутанных фотонов. Второй же оставался у Боба. Боб знал, в каком состоянии фотоны, которые делает Алиса, и проводил со своим фотоном известные преобразования, чтобы выяснить его состояние, причем раньше, нежели Чарли проводил измерения смешанного состояния фотонов, доставшихся ему от Боба и Алисы. Свои результаты Боб сообщал Чарли, и тот восстанавливал квантовое состояние фотонов Алисы.

Вся эта процедура была направлена на то, чтобы создать усилитель квантового сигнала. Ведь фотон не может долго путешествовать по оптическому волокну — в конце концов произойдет классическая процедура «измерения» и запутанность разрушится. Канадские физики придумали хитрость: один из запутанных фотонов Боба имел частоту в два раза больше, чем второй. Именно его и отправляли Чарли, потому что такая частота попадает в окно прозрачности оптического кабеля. Собственно, именно за счет этой хитрости и удалось осуществить телепортацию на 11 с лишним км, а если бы частота была меньше, то все пропало бы уже на восьмом километре.

Телепортация телескопом

Для расстояний в сотни километров оптическое волокно не подходит. Дело в том, что, согласно теории, квантовый сигнал, в отличие от классического, невозможно усилить, не внося в него никаких ошибок; ошибки накапливаются, и в результате нет никакой возможности передать квантовую информацию по оптическому кабелю далее, чем на несколько сотен километров. Да и роль Чарли в канадском опыте очень уж похожа на роль Анны — злоумышленницы, которая читает квантовое состояние, а потом передает его Бобу. Чтобы не использовать усилители, надо пытаться применить для передачи фотона среду, которая меньше рассеивает свет, чем оптическое волокно. Такой средой может быть воздух, желательнее чистый, без пыли и тумана. Мощный лазер способен отправить сигнал на сотни километров при условии, что приемник находится в прямой видимости. Вот как это сделали китайцы из шанхайского Университета науки и технологии в 2013 году (arXiv:1205.2024v2 [quant-ph] 28 Jan 2013). Алиса и Чарли находились на одном берегу высокогорного озера Кукунор (3200 м над уровнем моря), а

на другом, на расстоянии 97 км, расположился Боб. Чарли готовил фотоны в запутанном состоянии и рассылал их Алисе и Бобу. Алиса создавала общее состояние полученного фотона с тем, который генерировала сама. В этот же момент фотон Боба проецировался на четыре квантовых состояния, которые определялись манипуляциями Алисы. После измерения поляризации Алиса посылала сообщение Бобу о своих результатах, а тот вращал соответствующим образом поляризацию своего фотона, чтобы восстановить состояние фотона, созданного Алисой. Чтобы поймать фотон от Чарли, Бобу пришлось обзавестись телескопом с зеркалом диаметром 400 мм.

Дело техники

В упомянутой статье исследователей из Шанхая приведены подробности действий всех трех участников квантовой связи, что нечасто бывает в статьях такого рода. Воспользуемся случаем, чтобы показать, как именно осуществляются все эти манипуляции.

Чарли с помощью лазера получает инфракрасный фотон с частотой 788 нм и отправляет его в кристалл литий-бариевого оксида. Тот увеличивает частоту и получает ультрафиолетовый фотон: его пропускают сквозь две линзы и направляют в кристалл брата бария. Брат бария — очень интересное вещество. Большинство фотонов проходит сквозь него, не претерпев никаких изменений, но

часть их может распасться на два фотона уменьшенной частоты; соответствующий эффект, получивший название «спонтанное параметрическое рассеяние света» (spontaneous parametric down-conversion) в 1967 году открыл Д.Н.Клышко, сотрудник МГУ им. М.В.Ломоносова. Это и будут запутанные фотоны, поскольку их поляризация взаимно ортогональна. В кристалле борида бария фотоны с горизонтальной поляризацией идут с другой скоростью, нежели фотоны с вертикальной. Поэтому, распавшись, они не смогут воссоединиться в исходный высокочастотный фотон. Далее стоит интерферометр. Он, оставляя разницу в поляризациях, убирает разницу во времени — она появилась между фотонами из-за того, что они шли по кристаллу с разной скоростью. Теперь фотон номер два отправляется Алисе, а фотон номер три по оптическому волокну идет на телескоп Чарли для отправки Бобу.

А где же фотон номер один? Это тот самый фотон, состояние которого нужно телепортировать. Вот как его создает Алиса. Она формирует ультрафиолетовый фотон, отправляет его в свой кристалл борида бария и получает два спутанных фотона низкой частоты. Эти фотоны разделяет так называемый расщепитель поляризованных пучков — две призмы, сквозь которые фотоны одной поляризации проходят прямо, а другой — поворачивают в перпендикулярном направлении. Один из фотонов, названный фотоном 1, с помощью другого разделителя пучков смешивается с фотоном 2, полученным от Чарли. Другой же фотон созданной Алисой пары отправляется на измерение поляризации. В это время Боб получает

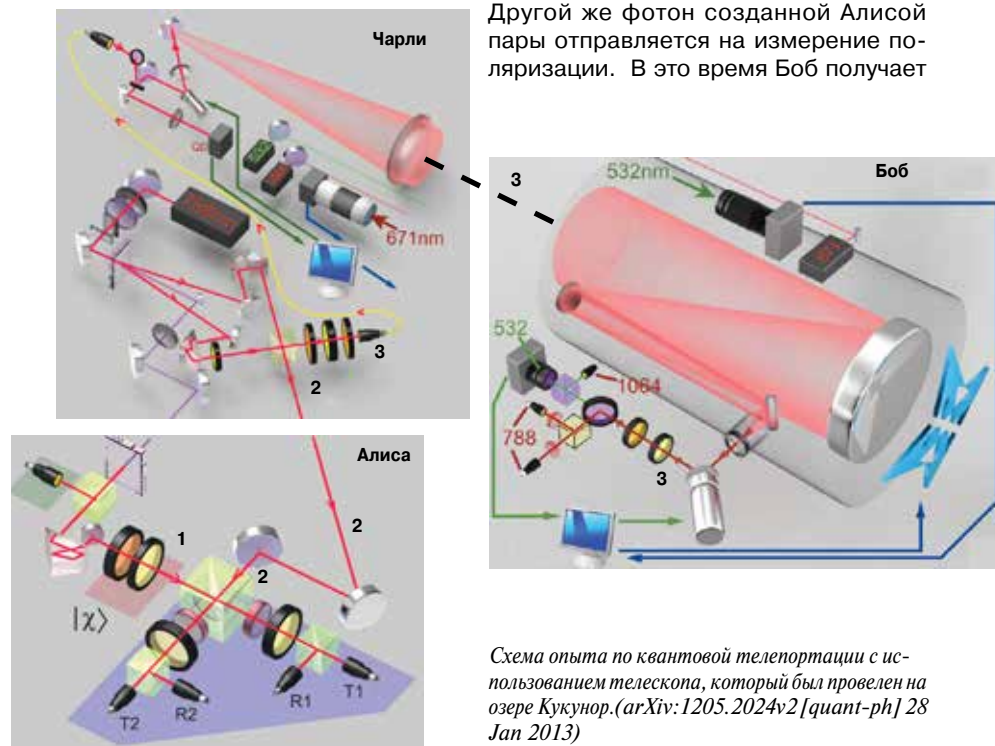


Схема опыта по квантовой телепортации с использованием телескопа, который был проведен на озере Кукунор. (arXiv:1205.2024v2 [quant-ph] 28 Jan 2013)

от Чарли в свой телескоп-рефлектор фотон номер три и анализирует его поляризацию, базируясь на переданных Алисой результатах измерений.

К системе прилагается еще несколько лазеров — они помогают синхронизировать манипуляции участников и поддерживают взаимную ориентацию телескопов Чарли и Боба для уменьшения потерь квантовых фотонов.

Выход в космос

В операциях шанхайских физиков не случайно появились телескопы: опыт на озере Кукунор был подготовительным этапом к проведенному весной 2017 года эксперименту по организации квантовой связи через космос. Сто километров — это как раз толщина более-менее плотных слоев атмосферы, далее уже начинается настолько разреженная среда, что ее можно считать безвоздушным пространством. В нем световой сигнал может лететь на бесчисленные миллионы световых лет, хоть до дальних звезд Вселенной. Для практического же использования световой сигнал нужно переправить на спутник, который затем отправит его на другой спутник, осуществив квантовую связь вокруг земного шара. Для этого нужно передать фотон от наземного телескопа космическому телескопу-приемнику и обратно. С обеими задачами физики из Шанхая с коллегами из Урумчи и Пекина успешно справились, о чем и поведали миру летом 2017 года в двух статьях, посвященных передаче квантовых состояний со спутника на Землю (arXiv:1707.00542v1 [quant-ph], 3 Jul 2017) и с Земли на спутник (arXiv:1707.00934v1 [quant-ph], 4 Jul 2017).

Для проведения опыта построили спутник, названный «Мо-цзы» в честь древнекитайского философа, учение которого долго соперничало с конфуцианством. Его успешно вывели на орбиту 16 августа 2016 года с удалением от поверхности Земли на 500 км. Главная проблема квантовой связи состоит в том, что нет возможности усиливать сигнал, как в обычных системах спутниковой связи: улучшать ее качество можно лишь подавлением шумов и совершенствованием настроек. В частности, большое значение имеет качество зеркал телескопов. На спутнике использовали телескоп с диаметром зеркала 300 мм; посланный им на Землю световой пучок расходился по диаметру на 10 м, что было признано приемлемым. На Земле сигнал ловили в обсерватории Синлун, расположенной недалеко от Пекина, где был задействован телескоп с зеркалом метрового диаметра и фокусным

расстоянием 10 м. Поскольку спутник движется с огромной скоростью — 7,6 км/с, была создана многоуровневая система определения взаимных координат обоих телескопов. Прежде всего наземный телескоп ориентировался исходя из расчетной траектории спутника, а при точной настройке использовали обмен лазерными лучами (фотография на заставке к статье как раз и построена наложением изображений лучей от спутника и обсерватории при проведении сеанса связи). Для их приема сделали легкие зеркала с быстро движущимися приводами. Движение спутника вносило коррективы и в расшифровку квантовой информации, поскольку в зависимости от взаимного положения спутника и наземной станции направление поляризации фотона относительно системы координат спутника менялось с точностью до перпендикулярного. Это нужно было учитывать при расчетах.

В опыте «спутник — Земля» квантовой телепортации не было. Вместо этого лучи восьми лазеров поляризовали определенным образом и проверяли, удастся ли поймать эти фотоны на Земле и определить их поляризацию. Ожидается, при увеличении расстояния между обсерваторией и спутником качество связи падало — причиной были расхождение светового луча и ошибки в определении ориентации. На кратчайшем расстоянии 508 км, когда спутник находился в зените, удавалось правильно передать 40 кбит в секунду, а при увеличении расстояния до 1034 км — только 1,4 кбита. Так или иначе, это несравнимо больше, чем передача поляризованных фотонов по оптическому кабелю длиной 1200 км: опыт показал, что там без использования усилителей удастся передать лишь один бит в несколько миллионов лет.

В следующем опыте проводили квантовую телепортацию с Земли на спутник. Главная проблема состоит в том, что турбулентность в приземном слое атмосферы толщиной около 10 км способствует сильной расходимости пучка света, которому нужно потом преодолеть около 1000 км до спутника, то есть он станет еще шире. При обратной задаче этой проблемы нет, ведь лучу, идущему со спутника через эту часть атмосферы, остается совсем небольшой путь до зеркала наземного телескопа. Для уменьшения связанных с прозрачностью атмосферы ошибок была выбрана тибетская высокогорная обсерватория Нгари с 130-миллиметровым телескопом. А дальше все было как обычно: Алиса готовила спутанные фотоны, отправляла один из них Бобу на спутник, а с помощью второго выясняла квантовое состояние того фото-



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

на, информацию о котором надо было передать партнеру. Боб на спутнике получал фотон и изучал его поляризацию. Этот опыт подтвердил, что человек умеет справляться с такими задачами: космическая квантовая телепортация проходила ничуть не с худшим качеством, чем наземная.

По мнению китайских физиков, создаваемая ими система дальней квантовой связи будет работать примерно так. Получив квантовый ключ из обсерватории под Пекином, спутник сохранит его в своей квантовой памяти на два часа, за которые войдет в поле зрения обсерватории в Урумчи, куда и отправит ключ, установив квантовую связь Пекин — Урумчи, расстояние между которыми 2500 км. Пролетая дальше, он позволит продлить обмен ключами до территории Австрии, Италии, ФРГ.

Но это полумеры. На самом деле нужно создавать специальную спутниковую группировку на высоких орбитах, оснащать спутники и наземные пункты прецизионными зеркалами и системами ориентации. Эта спутниковая группировка составит единое целое с городскими системами квантовой связи, которые обеспечат обмен квантовой информацией по оптическим кабелям на расстояния порядка сотни километров. Так будет создан планетарный квантовый Интернет; он послужит не только для организации неуязвимых для взломщиков каналов связи, но и для синхронизации различных измерений в планетарном масштабе. Кроме того, по мере развития долговременной квантовой памяти (а прогресс в этой области стремительный) и отладки методики для телепортации логических операций — основы компьютерных вычислений — такая система может стать распределенным планетарным квантовым мозгом, который будет способен проводить беспрецедентные по масштабу работы.