

Шаг к квантовым компьютерам

«Еще переть и переть до реального открытия термоядерного синтеза, а уже мы имеем трех молодых академиков, из них один, кажется, вполне толковый», — так писал член-корреспондент АН СССР И.С.Шкловский в разделе своих мемуаров, посвященном выборам в Академию наук. Ситуация та же, что и с Нобелевской премией по физике 2012 года: из официальной формулировки — «за разработку прорывных экспериментальных методов, обеспечивших измерения и манипуляции отдельными квантовыми системами» сразу же становится ясно, что ее дали за очередной подход к квантовому компьютеру, который еще не создан. И более того, Питер Шор в 2010 году говорил, что ожидает появления такого компьютера спустя десятилетия. Питер Шор знаменит тем, что в 1994 году предложил алгоритм разложения на сомножители больших чисел с помощью квантового компьютера, что и стало поводом для нынешнегно всплеска интереса к этому устройству.

Считается, что квантовые компьютеры позволят резко увеличить скорость вычислений за счет параллельного выполнения многих операций на одном и том же процессоре. Например, если на классическом компьютере взлом ключа к современному шифру требует необозримого количества вре-

мени, то на квантовом он при использовании алгоритма Шора займет столько же, сколько и само шифрование, которое состоит в перемножении двух очень больших чисел. Правда, подобное ускорение будет наблюдаться отнюдь не для всех вычислений, поэтому, видимо, такой компьютер, даже когда будет создан, не заменит привычные нам кремниевые, но займет какую-нибудь особую нишу, где нужна параллельная обработка информация. Поскольку именно так работает мозг человека, не исключено, что «позитронные» мозги, которые Айзек Азимов вставил придуманным им роботам, будут созданы именно на этом, квантовом принципе.

Особенность квантового компьютера, которая и позволяет надеяться на проведение параллельных вычислений, состоит в том, что в квантовой механике появляются принципиально отсутствующие в макромире понятия суперпозиции состояний и их запутывания. Квантовая система, в отличие от классической, может принимать не любой набор состояний, а дискретный, в котором отдельные состояния различаются значениями энергии. Переход между ними возможен при получении или излучении кванта энергии, равного разности между их уровнями. В промежутке же система находится не может, однако она способна с некоей вероятностью одновременно пребывать во всех возможных состояниях. Это

называется суперпозицией состояний. Лишь при измерении классическим прибором система выбирает определенное состояние. Понять это, как в известном анекдоте, невозможно — требуется запомнить: знаменитый спор между Бором и Эйнштейном к согласию не привел.

Более того, в определенных условиях состояния нескольких квантовых объектов могут запутаться (соответствующий английский термин — entanglement) и оказаться взаимозависимыми. Такая зависимость сохраняется даже при разнесении объектов на большие расстояния, однако разрушается с течением времени: это явление лежит в основе квантовой телепортации (мгновенной передачи информации об изменении состояния с одной частицы на другую), однако может быть использовано и в квантовых вычислениях. Проверить эту идею удастся после создания достаточно больших квантовых компьютеров и разработки соответствующих алгоритмов.

Создать квантовый компьютер в принципе можно из любой системы, подчиняющейся законам квантовой механики, такие попытки предпринимались. Компьютеры собирали и на квантовых точках, и на спинах электронов или атомов, и на сверхпроводниках. Однако дальше разложения числа 15 на два сомножителя дело, насколько известно автору, не продвинулось.

Игры с ловушками

Одна из идей квантового компьютера связана со сверххолодными ионами в электромагнитных ловушках. Ее в 1995 году предложили доктор Петер Цоллер из Инсбрукского университета и работавший тогда у него Хуан Игнасио Сирак («Physical Review Letters», 1995, 74 (20), 4091—4094). Согласно этой идее, воздействуя лазерами на состояния электронов в ионах, а также на само движение в ловушке, можно обеспечить управление базовым элементом квантового компьютера — квантовым битом, кубитом.

Этой идее предшествовала многолетняя работа по созданию таких ловушек — трудоемкая, но весьма успешная, за нее Ганс Демельт и Вольфганг Пауль в 1989 году получили свои Нобелевские премии.

В начале 50-х годов Пауль научился фокусировать пучки атомов с помощью электромагнита с шестью полюсами: созданные им переменные электромагнитные поля взаимодействовали с атомами и изменяли их движение. Такая ловушка получила название ловушки Пауля, на ее основе было создано сердце современных масс-спектрометров — анализатор масс.

Демельт сначала работал не с нейтральными атомами, а с обладающими зарядом электронами — это проще, поскольку на них гораздо легче воздействовать электрическими и магнитными полями, причем можно применять постоянные поля. Вот как описывает свои эксперименты Демельт («Scripta Physica», 1995, T59, 87—92): «Как только я получил в 1956 году место на кафедре в Вашингтонском университете, я смог заняться экспериментами с электронами. У меня появилась мысль, что вакуумная трубка Пеннинга (предложенная голландцем Францем Пеннингом вакуумная лампа с холодным катодом. — *Примеч. ред.*), если к ее электродам прикладывать разность потенциалов, существенно меньшую, чем обычно, может послужить неплохой ловушкой, в которой медленные электроны будут пребывать в течение секунд. Подтвердив это простым опытом, я в 1959 году с помощью мастера-стекольщика нашего факультета Джейка Джонсона сделал первую работоспособную ловушку Пеннинга. Во время эксперимента трубка была окружена большой катушкой, которая создавала магнитное поле вдоль ее оси. В такой вакуумной ловушке электроны ведут себя, как стеклянные шарики, катающиеся туда-сюда по дну чаши. Каждый раз, когда электрон, двигаясь вдоль силовой линии магнитного поля, подходил к одному из

отрицательно заряженных электродов, расположенных на концах трубки, он поворачивал назад, совершая в результате колебательное движение. Характерная частота этого возвратно-поступательного движения электрона в ловушке попадала в диапазон сверхкоротких радиоволн. Поэтому, выпросив у флотских коллег чувствительный радиоприемник, я получил возможность следить за движением электрона — ведь движение заряда с ускорением-замедлением порождает электромагнитное излучение. Постепенно электрон замедлял свое движение, передавая энергию антенне приемника, и приходил в состояние покоя. Этой работой мы с коллегами из Сиэтла занимались до 1973 года».

В своих опытах Демельт впускал в ловушку много электронов, охлаждал их, выбивал с помощью радиоволн наиболее горячие и в конце концов получал единственный электрон, звук от колебаний которого в ловушке с наслаждением слушал по своему радиоприемнику. В принципе электрон в такой ловушке может пребывать вечно — рекордом было семь месяцев, после чего опыт прекратили.

В подобной ловушке можно содержать и другие заряженные частицы — ионы. Опыты с ними Демельт начал в 1973 году при участии немецких коллег из Гейдельберга. Заключив ион бария в ловушку, его стали освещать лучом лазера. «Мы увидели маленькую синюю звездочку, характерное изображение объекта, который слишком мал, чтобы можно было разглядеть подробности. Впрочем, ничего особенного для наблюдения не понадобилось — дешевая японская фотокамера, не более. Однако, представьте себе, экспозиция составила несколько минут, и все это время ион оставался неподвижным. Можно подумать, что бомбардировка иона потоком лазерных фотонов должна быстро сдвинуть его с места. Действительно, это случилось бы, не придумай мы элегантную схему, которая превратила лазерный луч в самый эффективный охладитель, когда-либо оказывавшийся в руках человека».

Суть этого метода, названного «охлаждением боковой полосы», в следующем. Ион может поглотить фотон строго определенной частоты, энергия которого равна разнице между двумя энергетическими уровнями электрона в ионе. После поглощения фотона, электрон возбуждается, попадает на вышележащий уровень, а спустя какое-то время возвращается назад, испустив фотон. Демельт применил следующую хитрость: он слегка уменьшил частоту фотона по сравнению с резонансной, ровно настолько, чтобы дополнительную энергию придали сами колебания иона. При последующем снятии возбуждения эта дополнительная энергия улетит вместе с излучаемым фотоном — ион охладится. Так можно охладить его до минимально возможной частоты колебаний, которая задана параметрами ловушки.

Эксперименты Пауля и Демельта не только обеспечили им Нобелевскую премию (третьим ее лауреатом в том году стал создатель водородного лазера Норман Рамзей), но и послужили основой новых методов исследований, в частности, спектрометрии одиночного иона. И это еще не все. На-

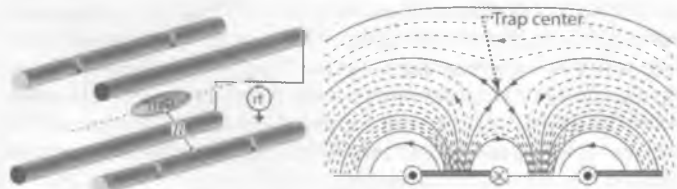
пример, поймав одинокий электрон в ловушку и охладив его тем же методом, но с использованием микроволн, Демельт сумел измерить гиромагнитное отношение — характеристику магнитного момента элементарной частицы. В соответствии с уравнением, предложенным Паули, и идеей, что электрон — точечная частица, не имеющая размера, этот момент должен быть равен 2. Измерения дают 2,002, однако это различие связывают с действием законов квантовой электродинамики, а не с проявлением внутренней сущности электрона. Демельт, измеривший момент очень точно, обнаружил после удаления всех возможных добавок, что тот равен 2,000000000098. Но даже столь малое различие позволяет усомниться в основах всей физики элементарных частиц.

В самом деле, если это измерение верно, электрон — не точечная частица, а шар с радиусом 10^{-20} см. В 1995 году опыты на ускорителях давали оценку размера электрона — не более 10^{-17} см, то есть проверить Демельта было нельзя. Не исключено, что опыты на Большом адронном коллайдере помогут решить этот вопрос. И если размер у электрона действительно есть, то он и в самом деле окажется, согласно афоризму Ленина, «столь же неисчерпаемым, как атом» — состоящим из мелких частиц наподобие кварков с массой примерно 10 миллиардов масс электрона. Сейчас считается, что электрон един и неделим. По мнению Демельта, обнаружение делимости электрона породит мысль о полностью иерархическом строении всего сущего: оно будет состоять из все более мелких и более тяжелых частиц вплоть до самого нижнего уровня. На этом уровне расположен так называемый космон весом со Вселенную. Есть мнение, что космон и антикосмон, совершив однажды спонтанный квантовый перескок, и породили ее. Впрочем, это уже совсем другая история, а мы вернемся к созданию квантового компьютера.

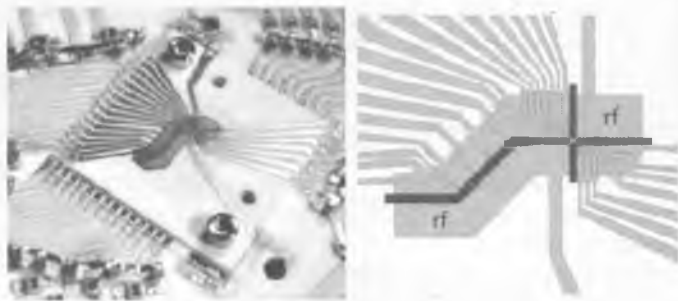
Кубиты в цепочке ионов

Одно время в работах Демельта принимал участие нобелиат 2012 года Дэвид Вайнлэнд. К концу XX века техника лазерного охлаждения ионов и нейтральных атомов достигла совершенства. Была придумана оптическая патока: лазерные лучи, освещая облако атомов с трех сторон, замедляют их движение. Было обнаружено доплеровское охлаждение: атом поглощает охлаждающий фотон, частота которого сдвинута так, чтобы двигающийся навстречу атом из-за эффекта Доплера воспринял ее резонансной. Была отлажена техника охлаждения боковой полосы, метод испарительного охлаждения, при котором понижают стенки ловушки, и оттуда улетают самые энергичные атомы облака, унося с собой излишнюю энергию. В конце концов, были созданы конденсаты Бозе — Эйнштейна и моря Ферми. Некоторые участники этих исследований получили Нобелевские премии (1997 и 2001 года), другие почему-то не были замечены шведскими академиками...

Вайнлэнд с коллегами из Национального института стандартов и технологии занимался глубокими исследованиями свойств пойманных в ловушки ионов, а также совершенствовал сами



Объемная ловушка Пауля состоит из четырех электродов (слева). В пространстве между ними расположена область, из которой ион может выбраться, только затратив немало энергии. В плоской ловушке эта область расположена на некотором расстоянии от поверхности микросхемы (справа)



Плоская ловушка Пауля с золотыми электродами на алюминиевой подложке. Справа показана ее центральная часть размером 6 мкм с двумя пересекающимися каналами для манипуляций с ионами

ловушки. В значительной степени их стараниями из довольно массивных радиоламп ловушки стали вполне компактными микросхемами, пригодными для массового применения.

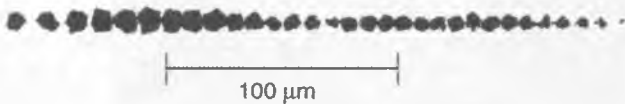
Ловушки, первоначально использовавшиеся в опытах Пауля и Демельта, имели серьезные недостатки. В частности, в них было трудно работать с несколькими ионами — из-за кулоновского отталкивания они все время пытались изменить свое положение в центре между электродами. Для этого подошла линейная ловушка Пауля. Она состоит из двух пар электродов, которые создают в пространстве между собой волну микроволнового излучения. Минимум энергии располагается вдоль оси этой ловушки, параллельно электродам. А с торцов ловушку закрывают электростатические поля, созданные управляющими электродами. В результате минимум электрического потенциала внутри ловушки принимает форму веретена, вытянутого вдоль ее оси; в этом веретене и сосредотачиваются ионы, а тепловое движение вызывает их колебания как в поперечном, так и в продольном направлении. По мере движения потенциал нарастает и в конце концов отбрасывает ион назад. Разрезание электродов на сегменты позволяет разделить ловушку на несколько зон, чтобы работать с ионами в каждой зоне отдельно и затем перемещать их из зоны в зону.

Конструкцию ловушки можно упростить и сделать ее плоской, гораздо более пригодной для микроэлектронного производства: все помещается на одной подложке. В этом случае над подложкой в пространстве между электродами возникает своего рода купол из электромагнитного поля, внутри которого и расположен минимум электрического потенциала. Сейчас придуманы ловушки различных конфигураций, в том числе такие, где ионы могут перемещаться не только вдоль одной линии, но и по пересекающимся траекториям. Это уже прямая подготовка к созданию неких вычислительных конвейеров.

Охлаждение с вычислением

Чтобы удержать ионы в ловушке, нужно их охладить. Доплеровское охлаждение снижает температуру до сотых долей кельвина. Дойти до тысячных долей дает возможность субдоплеровское охлаждение: лазерный луч создает стоячую волну, последовательность энергетических холмов и ям. Поднимаясь по склону холма, атом или ион теряет энергию, а взобравшись на его вершину, может испустить фотон, с тем, чтобы снова ее не набрать при последующем спуске в яму. До десятков нанокельвинов помогает охладить систему испарение наиболее энергичных ионов. Свой вклад в понижение температуры вносит и охлаждение боковой полосы. Весь процесс занимает считанные доли секунды. Примерно так группе Вайнлэнда в 1991 году удалось создать в линейной ловушке Пауля цепочку из холодных ионов ртуть.

Охлажденный ион оказывается на самом нижнем уровне энергии — колеблется с частотой, которая определяется геометрией ловушки. Если ионов несколько, между ними возникает взаимодействие за счет действия кулоновской



Линейный кристалл из 33 ионов ртути, построенный в объемной ловушке Пауля («Physical Review», 1992, 45 (9), 6493–6501)

силы, и тогда движение одного иона сказывается на движении всех: возникает несколько мод колебаний, каждая из которых имеет свой собственный энергетический уровень. Так сверххолодный ион в ловушке становится квантованной колебательной системой.

Чтобы увидеть сверххолодную цепочку, нужно применить тот же самый прием, которым воспользовался Демельт, когда освещал пойманный им в ловушку ион — обеспечить его флюоресценцию вкуче с охлаждением боковой полосы. Однако тут возможны варианты.

У оставшихся электронов иона могут быть несколько разных более-менее стабильных уровней энергии. Если сначала лазерным светом одной частоты перевести электрон на такой промежуточный уровень, он будет находиться там достаточно долго, но поглощать налетающие на него новые фотоны, с подстроенной под другой уровень энергией, уже не сможет, зато станет нагреваться — из-за столкновений с фотонами увеличится амплитуда колебаний. Во время опытов с цепочками из атомов ртути Вайнлэнду приходилось применять специальные хитрости, чтобы побороть эту особенность и обеспечить эффективное охлаждение.

Однако с ней можно не бороться, а употребить во благо. В самом деле, получается, что с помощью такого свечения удастся различить, в каком из двух внутренних квантовых состояний находится ион. Это удивительно, ведь измерение квантового состояния классическим прибором должно такое состояние разрушать. С другой стороны, если фотон не поглотится, он толкнет ион и может перевести его на более высокий энергетический уровень колебательного движения. Иначе говоря, ион способен переходить из одного внешнего квантового состояния в другое. А объект с такими способностями и есть квантовая единица информации — кубит, которая принимает значения 0 либо 1 в зависимости от состояния. Одинокий холодный ион в ловушке содержит два кубита: первый связан с внешними, колебательными, второй — с внутренними, электронными состояниями.

Бериллиевый регистр

Процессор будущего квантового компьютера представляет собой регистр (цепочку) кубитов, то есть двухуровневых квантово-механических систем. Любую вычислительную процедуру на этом регистре можно разложить на серию двухкубитовых операций. Примером такой операции служит логическая операция control-NOT, CNOT. Суть ее состоит в том, что если первый кубит равен 1, то второй кубит нужно перевести в другое состояние. Вот как выглядит эта операция в простейшем регистре, впервые созданном Вайнлэндом с коллегами на основе заключенного в ловушке иона бериллия («Physical Review Letters», 1995, 75 (25), 4714–4717).

Атом бериллия, четвертого элемента периодической системы, устроен просто — он содержит всего четыре электрона: два на первом s-уровне и два на втором. Первый уровень неинтересен — достать до него фотоном практически невозможно,

а на втором разыгрывались основные события, связанные с квантовым вычислением. При ионизации один из внешних электронов покидает свое место, освобождая соответствующий энергетический подуровень. Теперь, при добавке энергии, оставшийся s-электрон может занять этот подуровень и жить на нем весьма долго. В то же время при большей энергии он может возбудиться сильнее и перепрыгнуть на высокий p-уровень. Возбуждение длится недолго, и вскоре, испустив фотон, электрон вернется назад — при многократном повторении операции получится флюоресценция. Если же электрон уже занял свободный подуровень, такого не произойдет — это как раз и есть основа упомянутого выше метода распознавания электронных состояний. Назовем эти состояния $|g\rangle$ (ground, базовый) и $|e\rangle$ (excited, возбужденный). Есть у иона и гармонические колебания, определяемые геометрией решетки, энергии которых также квантуются. Назовем два самых нижних состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Эти состояния в некотором смысле связаны друг с другом. Так, если освещать ион фотоном, энергия которого примерно равна разнице энергии уровней электронов, он изменит внутреннее электронное состояние, но не изменит внешнее колебательное. Если же осветить его фотоном, энергия которого меньше резонансной электронной на величину разницы энергий между колебательными уровнями (красное смещение), тогда изменятся оба состояния — состояние $|1\rangle|g\rangle$ станет $|0\rangle|e\rangle$ — недостающую энергию для переброса электрона заберут у энергии колебания. В противном случае (синее смещение) будет переход $|0\rangle|g\rangle$ в $|1\rangle|e\rangle$ — лишняя энергия потратится на усиление колебаний.

Казалось бы, вот простое решение: действуй на ион фотоном с красным смещением, и электронное состояние изменится на противоположное только в одном случае. Но нет, все оказывается не так просто.

В 40-х годах Исидор Раби (Нобелевская премия 1944 года за метод магнитного резонансного детектирования на молекулярных пучках) заметил, что резонансное излучение связано с дипольным моментом атома соотношением, которое называли частотой Раби. В применении к пойманным в ловушку ионам частота Раби оказалась очень важным параметром: она определяет, какой должна быть продолжительность лазерного импульса, чтобы достигнуть определенного результата. А интересные результатов может быть несколько. Например, переход в суперпозицию квантовых состояний $|0\rangle \rightarrow |0\rangle + |1\rangle$ (этот импульс обозначается $\pi/2$), обратное состояние, $|1\rangle \rightarrow -|1\rangle$ (обозначение 2π), а может быть, и переход во второе состояние, но с изменением и фазы, и знака: $|0\rangle \rightarrow -i|1\rangle$. Чтобы избежать трудностей, Вайнлэнд использовал три лазерных импульса. Есть мнение, что правильно подобрав соотношение частот и длительности излучения, можно обойтись и одним импульсом, тем более что подобная тройная схема не подходит для многих других ионов, у которых структура электронных уровней не такая, как у бериллия. Но в первом опыте была применена именно эта схема. Напомним, что исходное состояние иона неизвестно, поэтому операция должна правильно сработать для всех возможных четырех состояний одиночного иона.

Первым импульсом $\pi/2$ с резонансной частотой создается суперпозиция двух электронных состояний. Вторым 2π -импульсом с синим смещением переворачивают электронные состояния, но только в случае, если ион находится в колебательном состоянии $|1\rangle$. Третьим импульсом, $-\pi/2$, все возвращают на круги своя (см. таблицу)

Возможные превращения состояний при операции CNOT на холодном бериллиевом ионе

Исходное состояние	После импульса $\pi/2$	После импульса 2π	После импульса $-\pi/2$	Конечное состояние
$ 0\rangle e\rangle$	$ 0\rangle(e\rangle + g\rangle)/\sqrt{2}$	Не меняется	$ 0\rangle(e\rangle - g\rangle + e\rangle + g\rangle)/2$	$ 0\rangle e\rangle$
$ 0\rangle g\rangle$	$ 0\rangle(g\rangle - e\rangle)/\sqrt{2}$	Не меняется	$ 0\rangle(g\rangle + e\rangle - e\rangle + g\rangle)/2$	$ 0\rangle g\rangle$
$ 1\rangle e\rangle$	$ 1\rangle(e\rangle + g\rangle)/\sqrt{2}$	$ 1\rangle(g\rangle - e\rangle)/\sqrt{2}$	$ 1\rangle(e\rangle + g\rangle - e\rangle + g\rangle)/2$	$ 1\rangle g\rangle$
$ 1\rangle g\rangle$	$ 1\rangle(g\rangle - e\rangle)/\sqrt{2}$	$ 1\rangle(e\rangle + g\rangle)/\sqrt{2}$	$ 1\rangle(e\rangle + g\rangle + e\rangle - g\rangle)/2$	$ 1\rangle e\rangle$

После этого преобразования нужно было убедиться, что все сработало как надо, для чего вызывали флюоресценцию иона. Удача свидетельствовала: он находится в состоянии $|g\rangle$. Далее требовалось определить, каково колебательное состояние. Тут применяли импульс с красным смещением: если флюоресценция исчезала, значит это было состояние $|1\rangle|g\rangle$, превратившееся после облучения в $|0\rangle|e\rangle$. В противном случае, такого превращения не случилось бы. Фотоны при флюоресценции ловит фотодетектор и передает дальнейшую обработку данных компьютеру.

Аналогичным способом можно манипулировать состояниями любого количества ионов, только методика операции и результат будут выглядеть гораздо сложнее, в чем легко убедиться, прочитав подробное описание всего цикла работ по квантовым состояниям пойманных в ловушки ионов («Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology», 1998, 103 (3), 259—328).

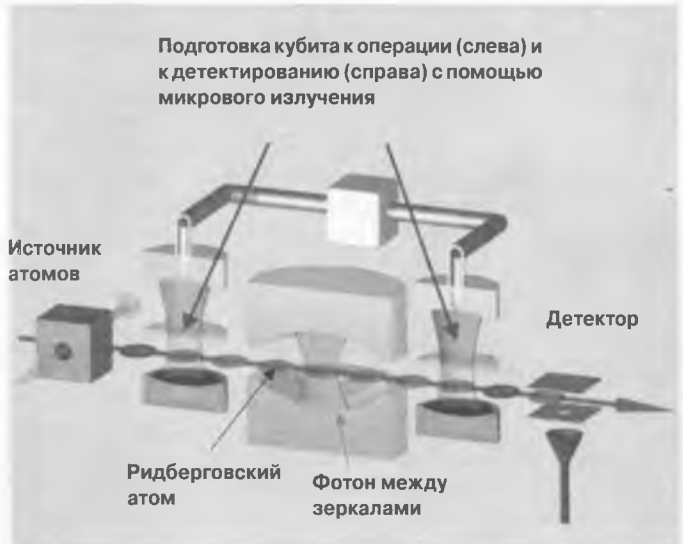
Ловушка для фотона

Манипулировать удастся не только пойманным в ловушку веществом, но и полем, точнее, отдельными его квантами — фотонами. Такие частицы, казалось бы, способные жить лишь в полете, теперь не только ловят, но и узнают о том, что ловушка наполнилась, причем никак не повреждая добычу. Это тем удивительнее, что согласно основам физики, узнать о существовании фотона можно только один раз — поглотив его датчиком. Даже если энергия фотона не будет потрачена на совершение работы, не обратится в тепло, даже если этим датчиком окажется возбужденный атом, который затем излучит всю поглощенную энергию, все равно это будет уже другой фотон.

Серж Арош, второй нобелиат 2012 года, сумел решить эту задачу, работая с фотоном микроволнового излучения. Для его «поимки» была создана ловушка с металлическими зеркалами из меди, покрытыми шестимикронным слоем ниобия. Их поверхность была тщательно отполирована, чтобы фотон, отражаясь, летел строго обратно — к противоположному



Установка Ароша в полуразобранном состоянии (вверху) и схема ее работы (внизу). Взято из материала лекции С.Ароша



Подготовка кубита к операции (слева) и к детектированию (справа) с помощью микрового излучения

Источник атомов

Детектор

Ридберговский атом Фотон между зеркалами

зеркалу. Зеркало охлаждали ниже 2 К: ниобий при этом переходил в сверхпроводящее состояние, исключая поглощение фотона зеркалом.

Спутывание атомов

Когда возникают спутанные квантовые состояния, обладающие ими объекты оказываются частями единого целого: изменения, произведенные с одним из них, мгновенно приводят к изменению состояния другого независимо от того, какое расстояние их разделяет. Это удивительное свойство лежит в основе квантовой телепортации. Главные успехи сейчас достигнуты в телепортации квантовых состояний безмассовых частиц — фотонов. Сохранить спутанность их состояний удается, даже когда связанную пару разделяют километры, но рано или поздно частицы все-таки освобождаются от излишних знаний друг о друге. Причина — взаимодействие с окружающей средой.

Фотонная телепортация недаром привлекает пристальное внимание: на ее основе вполне реально разработать технологию защиты данных. Для этого надо создать два потока спутанных фотонов, один из которых несет информацию, а второй служит в качестве сигнала: если злоумышленник прочитает информацию, он неизбежно изменит состояние обоих фотонов пары. Глядя на сигнальный поток, служба охраны моментально обнаружит утечку.

С массивными частицами прогресс не столь велик — работать с ними сложнее, чем с фотонами. В тех же ионных ловушках спутывания состояний удалось добиться у ионов, разделенных расстоянием лишь в несколько микрон. Это слишком близко, чтобы можно было как-то манипулировать каждым из участников состояния по отдельности. Однако группа Ароша нашла способ спутывать квантовые состояния атомов («Science», 2000, 288, 2024—2028). Использовали они при этом, естественно, придуманный ими метод оптической ловушки.

Для троекратного спутывания в ловушку запускают первый атом рубидия, у которого электрон пребывает на 51-м уровне. В это время никаких фотонов в ловушке нет. С вероятностью 50% этот атом испустит фотон, и его электрон перейдет на 50-й уровень. Фотон же будет пойман и станет метаться между зеркалами. Второй атом рубидия, с электроном на 50-м уровне входит в ловушку в тот момент, когда первый из нее еще не вышел. Если в ней остался фотон, он меняет свое состояние. Третий атом, изначально с электроном на 50-м уровне, поглощает фотон (если он есть), и его электрон переходит на 51-й уровень.

Можно рассчитать, какие два набора спутанных состояний будут получаться после такой процедуры в зависимости от того, возник ли в ловушке фотон. Эксперимент показал, что, действительно, эти два набора состояний образуются гораздо чаще, чем какие-то иные — одно в 23 случаях из ста, другое — в 35. Какие-то иные состояния возникали не чаще, чем в 10 случаях из 100. Нельзя сказать, что очень хороший результат: в идеале, ничего кроме правильных наборов состояний быть не должно. Видимо, в дело вмешались какие-то неучтенные факторы, связанные с несовершенством аппаратуры.

Возможность создания спутанных состояний атомов весьма привлекательна: это большие долгоживущие объекты, способные, в отличие от фотонов, пребывать в состоянии покоя. К тому же их можно развести на большое расстояние (в опытах Ароша оно было сопоставимо с диаметром ловушки — несколько сантиметров) и впоследствии работать с каждым индивидуально. Тут, однако, надо иметь в виду не столь уж большое время жизни используемых ридберговских атомов.

В качестве зонда для проверки наличия фотона в ловушке использовали так называемые ридберговские атомы, названные в честь шведского исследователя спектров атомов Йоханнеса Ридберга. У таких атомов по крайней мере один электрон забрасывают на очень высокий уровень — от 30-го до 1000-го. В результате потенциал ионизации падает в десятки тысячи раз, а размер атома, если считать его по диаметру орбиты самого внешнего электрона, возрастает в сотни тысяч раз. Такой электрон уже ведет себя как достаточно самостоятельная волна заряда.

В своих опытах Арош с коллегами использовал (см., например, «Nature», 2007, 446, 297, arXiv:quant-ph/0612031) атомы рубидия, которые живут в ридберговском состоянии десятки миллисекунд. За это время они успевали пролететь через установку и совершить все необходимые действия. В начале, с помощью радиоизлучения их переводили в суперпозицию двух состояний: основного, $|g\rangle$, соответствовавшее 50-му электронному уровню, и возбужденного, $|e\rangle$, на 51-м уровне. Получался, как отмечает Арош, локализованный волновой пакет, который вращается вокруг атома и колеблется между двумя этими орбитами. Попадая в пространство между зеркалами, атом сталкивался с фотоном (если он там был). Параметры фотонной ловушки были подобраны так, чтобы энергия заключенного между ними фотона равнялась энергии перехода электрона между 50-м и 51-м уровнями, однако с помощью внешнего электрического поля ее слегка смещали в сторону от этого значения. В результате атом не мог поглотить фотон, зато возникала поляризация электронного облака. Она смещала равновесие между двумя состояниями в суперпозиции, делая состояние $|e\rangle$ более вероятным. В противном случае, когда фотона не было, более вероятным оказывалось состояние $|g\rangle$. Увеличение числа фотонов закономерно изменяло это соотношение вероятностей. После такого преобразования к атому применяли обратную процедуру, снимающую суперпозицию. Затем, измеряя потенциал ионизации, можно было определить, в каком из двух состояний атом вышел из установки и, соответственно, узнать, есть ли в ней фотоны

и если да, то сколько. То есть, опять получилось два кубита, способных воздействовать на состояния друг друга — число фотонов в ловушке и состояние электронов в атоме.

Работать с такими кубитами ненамного сложнее, чем с запетыми в ловушку ионами. Так, электронные состояния определяют, как уже было сказано, измеряя потенциал ионизации, а пересчитывать фотоны в ловушке можно с помощью третьего атома, не участвующего в квантовой операции. С оптико-атомными кубитами исследователи из лаборатории Ароша научились проводить те же операции, что и Вайнланд с пойманными ионами, например, операцию CNOT. В оптической ловушке пока больше ошибок при определении ее фотонного состояния; организовать цепочку и одновременно работать со всеми входящими в нее кубитами здесь нельзя, зато легче организовать быстрый вычислительный конвейер — атомы подаются в ловушку с промежутком в две миллисекунды, а летят со скоростью в 500 метров в секунду. Поэтому не очевидно, какая из отмеченных шведскими академиками схем превратится в реальное устройство. Не исключено, что в квантовых компьютерах будущего найдут применение и обе, и какие-то другие, пока что малоизвестные. Главное, чтобы сама потребность в такого рода устройствах не пропала.

Квантовый эффект Зенона

«Летающая стрела неподвижна, так как в каждый момент времени она занимает равное себе положение, то есть покоится; поскольку она покоится в каждый момент времени, то она покоится во все моменты времени, таким образом, не существует момента времени, в котором стрела совершает движение», — говорил Зенон Элейский. В XX веке эта апория нашла свое применение в квантовом мире. Современная формулировка звучит так: «Нестабильная частица, если постоянно проводить измерения ее состояния, никогда не сможет распасться». Есть и более широкая формулировка: любая квантово-механическая система, взаимодействующая с внешней классической силой, уменьшает скорость изменения своего состояния. Долгое время исследователи не обращали на эту идею особого внимания, однако в начале XXI века произошел взрыв интереса к квантовому парадоксу Зенона, отразившийся в быстром росте числа публикаций. Не исключено, что причина связана с экспериментальным доказательством его справедливости, полученным в 1990 году группой Вайнланда («Physical Review A», 1990, 41, 2295).

Американские исследователи заключили 5000 ионов бериллия в ловушку Пеннинга. Каждый ион обладал тремя участвующими в эксперименте уровнями электронов — двумя стабильными s-подуровнями и одним нестабильным p-уровнем. Сначала все ионы перевели на нижний энергетический уровень. Затем стали облучать радиоволнами для переброски электронов на более высокий стабильный подуровень. (Почему не лазером, как в опытах с кубитами? Потому, что там было удобнее перебрасывать электроны не напрямую, а через промежуточный p-уровень.) При этом светили сериями из нескольких лазерных импульсов малой продолжительности. По окончании пытались вызвать флуоресценцию тех ионов, где электроны остались на нижнем уровне.

Когда ионы ничто не отвлекало от перехода из состояния в состояние, флуоресценции не было. Однако уже четыре импульса, произведенные за время радиооблучения, снизили вероятность перехода на 75%, а 64 вообще прекратили переходы. Иначе говоря, квантово-механическая система, которую постоянно подталкивали, действительно не смогла изменить своего состояния.

Статья вызвала немало критических откликов, однако от всех замечаний удалось отбиться, пишет участник работы Уэйн Итано (arXiv:quant-ph/0612187v1, 2006 год). Впоследствии были поставлены новые эксперименты. Некоторые из них и на других объектах подтвердили существование уже не парадокса, а квантового эффекта Зенона. Было установлено, например, что если сила, прилагаемая для измерения, слишком мала, эффект наблюдается лишь частично. В одном случае получился антиэффект: частые измерения ускоряли эволюцию системы.

Не исключено, что квантовый эффект Зенон пригодится для решения таких важных задач квантовых вычислений, как недопущение ошибок и предотвращение потери системой кубитов когерентности, из-за которой входящие в систему ионы забывают о том, что вместе они сила, и начинают уделять слишком много внимания своей индивидуальности.