НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ФИЗИКЕ — 2012

17.10.2012

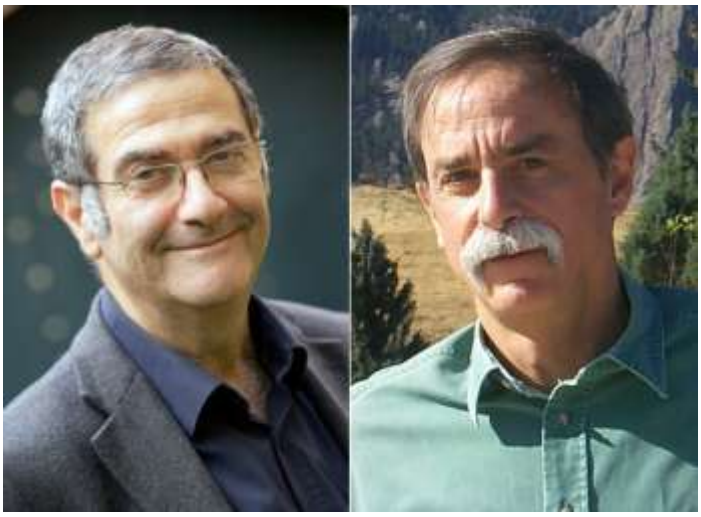

Рис. 1. Серж Арош и Дэвид Вайнленд — лауреаты Нобелевской премии по физике за 2012 год. Изображение с сайта nobelprize.org

9 октября 2012 года Нобелевский комитет объявил о присуждении Нобелевской премии по физике Сержу Арошу и Дэвиду Вайнленду за «прорывные экспериментальные методы, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими».

Иногда бывает так, что Нобелевскую премию присуждают за одно-единственное, одномоментно сделанное открытие, которое было удачной догадкой или гениальным прозрением. Однако далеко не всегда революция в физике происходит так «легко»; чаще оказывается, что трудности встают на пути к цели одна за другой, и каждый раз приходится совершать новый прорыв. Именно такое описание в полной мере относится к работам лауреатов Нобелевской премии по физике за 2012 год — француза Сержа Ароша (Serge Haroche) и американца Дэвида Вайнленда (David Wineland). Они сыграли ключевую роль в грандиозном достижении экспериментальной физики последних десятилетий — контроле над квантовым состоянием отдельных элементарных частиц. Однако сделано это было не сразу, а в несколько ключевых этапов, растянувшихся на треть века и завершившихся громкими результатами (включая и практические приложения) обоих лауреатов буквально в последние годы.

Прежде чем приступать к подробному рассказу, любопытно подчеркнуть несколько интересных моментов, объединяющих исследования Ароша и Вайнленда. Арош работает с квантовыми состояниями одиночных фотонов, пойманных в резонатор и надолго «отцепленных» от внешнего мира. Вайнленд работает с квантовыми состояниями одиночных ионов, пойманных в ловушку и тоже изолированных от хаотического внешнего воздействия. Но при этом Арош использует атомы, чтобы наблюдать за состоянием фотона, а Вайнленд использует фотоны, чтобы манипулировать с остояниями ионов. Оба метода позволяют осуществить экспериментально то, что еще полвека назад могло считаться лишь «мысленным экспериментом», а также изучить то, как соотносятся друг с другом квантовый и классический мир. И наконец, Арош и Вайнленд — давние и хорошие друзья.

1. Чудеса с фотонами: работы Сержа Ароша

Сверхдобротные резонаторы

Исследования Сержа Ароша относятся к квантовой оптике — разделу физики, изучающему квантовые свойства отдельных фотонов, «элементарных кусочков» света. Обычно фотоны используются лишь как одноразовые «посыльные» — они излучаются в источнике, летят к фотодетектору и там поглощаются. Если с ними что-то произошло в пути, то мы об этом узнаем лишь после их «смерти». Жизнь такого фотона быстротечна, его нельзя долго держать и изучать. А Серж Арош задался именно этой целью — научиться удерживать единичный фотон достаточно долго внутри экспериментальной установки и в течение этого времени его аккуратно исследовать.

Удержать фотон в принципе можно, заставив его метаться туда-сюда между двумя вогнутыми зеркалами сверхвысокого качества (вогнутость зеркал не позволяет фотону уйти в сторону).

Правда, фраза «метаться туда-сюда» не совсем точно отражает ситуацию. Когда длина световой волны сравнима с расстоянием между зеркалами, фотон уже не перемещается между зеркалами, а, как бы дрожа, замирает между ними — получается стоячая световая волна, опирающаяся на зеркала. Такая система зеркал называется *резонатором* (в англоязычной литературе используется термин *cavity* «полость»).

Качество удержания фотона характеризуется *добротностью* резонатора, Q. Это число показывает, грубо говоря, сколько раз фотон отразится от зеркал, прежде чем как-то пролезет наружу (или, более аккуратно, во сколько раз время удержания фотона больше периода колебания световой волны). Ясно, что добротность критически зависит от отражательной способности зеркал: чем ближе коэффициент отражения к единице, тем выше добротность.

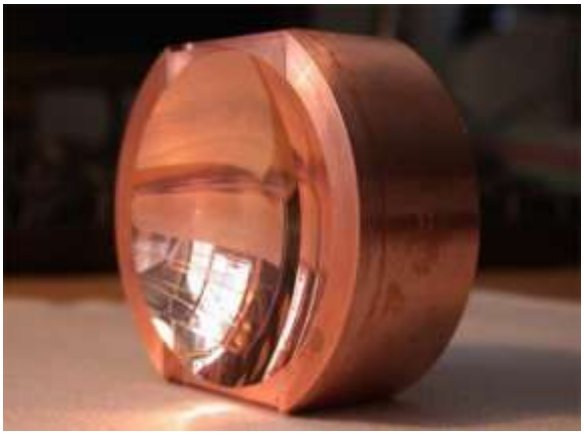

Рис. 2. Одно из зеркал для медного микроволнового резонатора со сверхпроводящим ниобиевым покрытием, обладающего рекордно высокой добротностью $Q = 4{,}2 \cdot 10^{10}$. Резонатор был изготовлен в лаборатории Сержа Ароша (S. Kuhr et al. Appl. Phys. Lett. 90, 164101 (2007)); время жизни микроволнового фотона в нём составляло 0,13 секунды

В микроволновом диапазоне (длины волн порядка миллиметров или сантиметров) благодаря применению сверхпроводников удается добиться исключительно хорошего отражения. Уже в 70-80-х годах в распоряжении физиков были резонаторы с добротностью в миллионы, а сейчас она уже достигает десятков миллиардов (рис. 2). В таком резонаторе микроволновой фотон будет «жить» десятые доли секунды — огромный промежуток времени для современной экспериментальной физики. За это время можно, не торопясь, и породить фотон, и в оздействовать на него, и «просканировать» его состояние (как это сделать, будет рассказано ниже). Главное, фотоны перешли в категорию «частиц», долго живущих внутри экспериментальной установки, «частиц», над которыми уже можно проводить разнообразные опыты.

Квантовая электродинамике в резонаторе

И вот тут в этой истории появляется «вираж», очень характерный для современной физики. Создание высокодобротных резонаторов — такое, казалось бы, совершенно техническое достижение — открыло перед физиками новый раздел фундаментальной физики — *квантовую электродинамику резонатора* (по-английски*cavity quantum electrodynamics*, *CQED*). Это позволило поставить такие опыты с фотонами, которые буквально «прощупывали» самые основы квантовой физики и позволяли по-новому изучать загадочный переход между квантовым и классическим поведением частиц (см. обзорную статью: Г. Вальтер. Одноатомный мазер и другие эксперименты квантовой электродинамики резонатора // *УФН* 166, 777 (1996)).

Один из ярких примеров таких экспериментов, выполненный в группе Сержа Ароша, — экспериментальная демонстрация того, что время жизни единичного возбужденного атома можно сильно изменить, поместив его в такой резонатор.

Постановка опыта проста, а результат, на неискушенный взгляд, просто удивительный. Между двумя зеркалами *пустого* резонатора (то есть без фотонов внутри) пролетает атом, находящийся в возбужденном состоянии. Вообще, возбужденные атомы нестабильны, и через небольшое время электрон в нём прыгает на более низкий уровень, излучая при этом фотон. Казалось бы, это спонтанное излучение — сугубо внутриатомный процесс, и время жизни возбужденного состояния — собственная характеристика атома. Однако оказывается, что пролета я сквозь пустой резонатор, атом может ускорить или, наоборот, замедлить процесс «высвечивания» фотона!

Я предлагаю еще раз вдуматься в эту ситуацию. Возбужденный атом находится в пустоте, его никто не «трогает» (стенки резонатора удалены от атома на сантиметр!), мы на него не воздействуем никакими внешними электромагнитными полями. Мы всего лишь *ограничиваем вакуум* вокруг него — и этого уже достаточно, чтобы помешать или, наоборот, поспособствовать излучению фотона.

С точки зрения житейской интуиции — ситуация совершенно необыкновенная. Мы привыкли, что результат может вызвать только прямое воздействие на объект: либо через непосредственное соприкосновение с ним, либо через силовые поля. А тут

получается так, словно мы запрещаем или «поощряем» распад, вообще не воздействуя на атом!

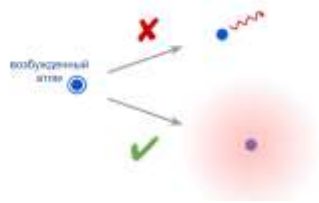

Рис.3. Схематичное изображение того, как возбужденный атом излучает фотон. Стандартное изображение вылетающего фотона как объекта, локализованного на атомном масштабе (*вверху*), дает очень неправильное представление о «начальных размерах» фотона. Гораздо более предпочтительней будет картинка, на которой фотон изображен в виде облака с размерами намного больше атомных (*внизу*)

Разгадка этого кажущегося парадокса состоит в том, что квантовые объекты *нелокальны*, неточечны. Конкретно, когда атом излучает фотон, то этот фотон вовсе не вылетает *прямо* из атома (рис. 3). Оптический фотон вообще невозможно локализовать с атомной точностью. Именно поэтому атомы и молекулы не видны в оптический микроскоп, а также именно поэтому бессмысленно спрашивать, например, из какой части сложной молекулы (скажем, молекулы красителя) вылетает фотон при излучении. Фундаментальная причина этого состоит в том, что электромагнитное взаимодействие довольно слабо, так что постоянная тонкой структуры — маленькая величина.

Правильнее процесс излучения представлять себе так, словно фотон появляется сразу в некотором объеме вокруг атома и затем расширяется во все стороны (рис. 3). Этот объем на порядки больше, чем объем самого атома, и он увеличивается еще больше при увеличении длины волны фотона, то есть при уменьшении разницы между энергетическими уровнями, между которыми произошел переход. Поэтому если какие-то посторонние предметы находятся в этом объеме, за которые может «зацепиться» будущий фотон, то они могут изменять скорость его излучения.

В опытах Ароша использовались особые, сильно возбужденные атомы (это так называмые ридберговские состояния атома). В них разница между энергетическими уровнями, между которыми идет переход, так мала, что длина волны излученного фотона составляет вполне макроскопическое значение — миллиметры и сантиметры. Хотя атом сам по себе и крошечный, но когда он «пытается» излучить фотон, он «прощупывает обстановку» в сантиметровом объеме.

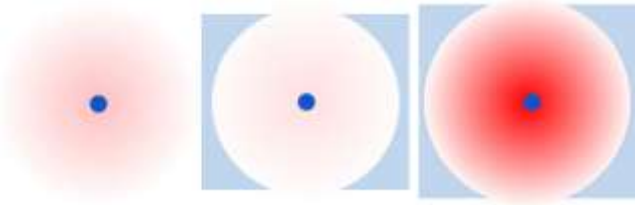

Рис. 4. Темп излучения фотона возбужденным атомом в неограниченном пространстве определяется лишь внут-ренними атомными процессами (*слева*). Однако если атом находится в резонаторе, то излучение можно либо сильно подавить (*в центре*), либо резко усилить (*справа*)

Резонатор, использованный Арошем, был сопоставимого размера, и это позволяло ему влиять на скорость распада. Например, в совсем маленьком резонаторе излученный фотон просто не поместился бы — и уже один этот факт предотвращает его излучение, стабилизирует возбужденное состояние. Если же размер резонатора подобрать так, чтоб фотон ровненько в него вписывался, то атому будет даже удобнее излучить такой фотон, вероятность излучения резко возрастает (рис. 4).

Справедливости ради надо сказать, что этот эффект вовсе не был для физиков сюрпризом. Такое поведение было теоретически предсказано Эдвардом Пёрселлом еще в 1946 году, а первые экспериментальные намеки на такое поведение появились в начале 70-х годов. Правда, тогда речь шла об излучении молекул, расположенных между двумя плоскими зеркалами, и эффект был довольно «грязным». Серж Арош и его сотрудники добились гораздо более сильного и чистого эффекта: в их статье 1983 года сообщается о примерно пятисоткратном (!) ускорении излучения фотона. Еще раз почувствуйте изюминку: свечение усилилось только за счет того, что мы правильным способом ограничили пространство в вакууме вокруг излучателя!

Спустя четыре года эффект был продемонстрирован сразу несколькими исследовательскими группами и в оптическом диапазоне, причем как в сторону усиления, так и ослабления излучения в десятки раз. Без преувеличения можно сказать, что началась эпоха манипулирования темпами внутриатомных процессов. Описание ситуации по состоянию на 1989 год можно найти в популярной статье Ароша и Клеппнера в журнале *Physics Today*. А группа Сержа Ароша тем временем двинулась дальше...

Подсчет фотонов и фейерверк результатов

Когда речь идет об экспериментах с одной или несколькими частицами, возникает естественный вопрос: как можно измерить количество частиц? Для электронов, скажем, ответ простой: надо

измерить электрический заряд объекта и поделить на заряд одного электрона. А как измерить, сколько фотонов «застряло» между зеркалами резонатора?

Проблема с фотонами в том, что они легко поглощаются. Если фотонов огромное число, то это несущественно — именно так измеряют напряженность классического электрического или магнитного поля пробными зарядами. Но когда фотонов мало, поглощать их нехорошо — это полностью меняет состояние измеряемого объекта. Может быть, можно без этого как-то обойтись? Оказывается, да. В квантовой механике вовсе не все измерения меняют состояние системы; существуют так называемые квантовые неразрушающие измерения (по-английски *quantum non-demolition measurements*), которые умудряются без этого обойтись (этот тип измерений, кстати, предложил советский физик Владимир Брагинский).

В 1990 году вышла статья Ароша и соавторов, в которой была предложена конкретная схема для неразрушающего измерения количества фотонов в резонаторе. Для этого авторы снова предлагают использовать специальным образом приготовленные атомы, пролетающие сквозь резонатор. Только в этот раз резонатор играет иную роль: он не приводит ни к излучению, ни к поглощению фотонов, а слегка сдвигает уровни энергии атома на величину, зависящую от количества фотонов. Сдвиг уровней энергии (который присутствует только во время пролета сквозь резонатор) слегка изменяет состояние атома на выходе, измерив которое, можно «сосчитать фотоны».

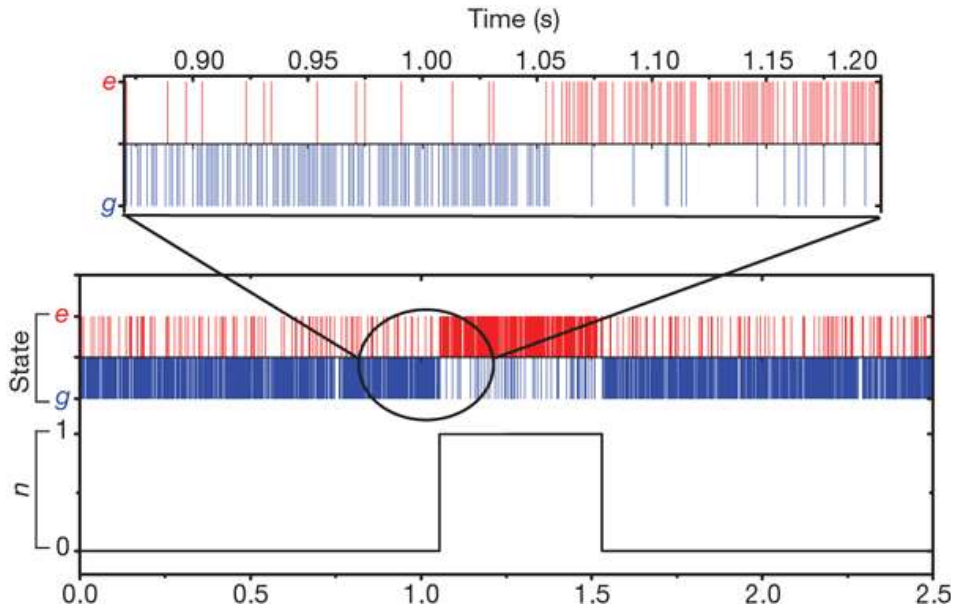

Рис. 5. Прямое наблюдение рождения, жизни и исчезновения одиночного микроволнового фотона, который примерно на полсекунды возник в резонаторе. *Красные и синие черточки* отвечают результатам повторяющегося эксперимента по пропусканию атома через резонатор и измерению его состояния на выходе; *красным* показаны случаи, когда атом на выходе был в состоянии, условно обозначаемом *e* и отвечающем одному фотону в резонаторе, *синим* — в состоянии *g* (ноль фотонов в резонаторе). И? ?ображение из статьи Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity // *Nature* 446, 297 (2007)

Реализация этой идеи, однако, натолкнулась на серьезные технические трудности, которые были преодолены лишь в 2007 году. Зато потом, в считанные месяцы, группа Ароша выполнила несколько блестящих исследований, позволивших по-новому взглянуть на основополагающие квантовые явления.

- Март 2007 года: удается проследить появление и исчезновение отдельного фотона в резонаторе (рис. 5).
- Август 2007 года: постепенный «коллапс» семифотонного начального состояния, в котором видно, как на протяжении полусекунды фотоны один за другим исчезают из резонатора.
- Сентябрь 2008 года: наблюдение состояний типа «кота Шрёдингера», когда в резонаторе находится не какое-то определенное количество фотонов, а суперпозиция трехфотонного и четырехфотонного состояния.

- Октябрь 2008 года: наблюдение квантового эффекта Зенона в резонаторе (квантовый эффект Зенона состоит в том поразительном свойстве квантовой механики, что непрерывное наблюдение за распадающейся системой «замораживает» ее распад).

Настоящий фейерверк результатов! Группа Ароша, разумеется, и на этом не собирается останавливаться, а открывает всё новые и новые приложения разработанных экспериментальных методов. К примеру, месяц назад вышла еще одна их статья, в которой квантовый эффект Зенона не просто наблюдается, а уже используется для ручного управления квантовой эволюцией фотонного поля в резонаторе и получения экзотических квантовых состояний электромагнитного поля.

Подводя итог под этой частью рассказа, можно вспомнить, что знаменитая дискуссия между Нильсом Бором и Альбертом Эйнштейном о физической сущности квантовой механики крутилась, среди прочего, и вокруг мысленного эксперимента с «однофотонным ящиком». Практическая реализация такого ящика, равно как и множество более тонких квантовых манипуляций с фотонами, была в те времена попросту невозможна с технической точки зрения. Серж Арош стал ключевой фигурой, благодаря которой подобные мысленные квантовомеханические эксперименты были реализованы.

2. Одноатомная квантовая «хирургия»: работы Дэвида Вайнленда

Манипуляция квантовым состоянием отдельного иона — не менее трудная с технической точки зрения задача. Конечно, атомы, в отличие от фотонов, никуда не исчезают, и в этом смысле с ними работать проще. Но с другой стороны, длина волны атома (напомним, что в квантовом мире каждой частице соответствует некий волновой процесс) при его движении с обычными скоростями очень мала. Поэтому квантовые эффекты, связанные с поступательным движением (то есть перемещением атома как целого), при обычных температурах незамет ны. Для того чтобы заметить квантование поступательного движения, отдельный атом или ион требуется не просто поймать, но и охладить до очень низких температур, порядка милликельвинов и ниже.

Пленение и охлаждение одиночных ионов

В принципе, технология ионных ловушек, в которых заряженные частицы удерживаются в центре переменным электромагнитным полем определенной формы, была разработана полвека назад. Она даже принесла своим создателям, Вольфгангу Паулю и Хансу Демельту, половину Нобелевской премии по физике за 1989 год(подробности см. в нобелевских лекциях: В. Пауль. Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц // *УФН* 160, 109–127 (1990) и ? ?. Демельт. Эксперименты с покоящейся изолированной субатомной частицей // *УФН* 160, 129–139 (1990)). В 1973 году Вайнленд, Экстром и Демельт сообщили о первых экспериментах с одиночным электроном, плененным в такой ловушке. Демельт придумал для этой системы красивое название «геоний» — этакий искусственный аналог атома, в котором электрон находится в связанном состоянии с Землей (с помощью ловушки, конечно). Целью этих экспериментов было изучение внутренних характеристик электрона, в частности его аномального магнитного момента, и его сравнение с теоретическими предсказаниями (сейчас такого типа измерения составляют целый отдельный раздел метрологии и квантовой электродинамики).

В той же статье 1973 года была упомянута и возможность поимки отдельных ионов. В отличие от одиночных электронов, ионы интересны тем, что у них есть многочисленные внутренние степени свободы, и, поймав такой ион в ловушке, можно его изучить вдоль и поперек. На пути к этой цели в 1975 году была разработана (в том числе и Вайнлендом) методика доплеровского охлаждения ионов. В этом методе на ионы или атомы светят лазерным лучом с частотой, очень близкой к резонансному рассеянию, но только те из них, которые движутся с большой скоростью навстречу световому лучу, рассеивают свет, теряют энергию и тем самым охлаждаются. Эта методика была реализована в 1978 году в экспериментах группы Вайнленда с ионами Mg^+ и в опытах группы Тошекас ионами Ba^+. В обоих случаях, правда, это были облачка с несколькими десятками ионов, но спустя пару лет были пойманы отдельные ионы и начато изучение их спектроскопии (работы группы Тошека 1980 года и Вайнленда—Итано 1981 года). В этих статьях было отмечено, кстати, что флуоресцентное свечение одного-единственного иона отлично видно в микроскоп.

В обеих статьях 1980–1981 годов температура иона в ловушке оценивалась в несколько десятков милликельвинов, а это было всё еще многовато для того, чтобы остановить ион (точнее, перевести его в состояние с минимально возможным поступательным движением). Дальнейший прогресс в этой области был связан с новой методикой охлаждения, также разработанной и реа-

лизованной Вайнлендом, которая носит название *охлаждение по боковой полосе частот* (по-английски *sideband cooling*). На ней стоит остановиться подробнее.

Электронное облако в атоме или ионе имеет большой набор возможных вариантов, как ему «упаковаться» вокруг ядра и как ему организовать спины электронов. Тот вариант, который обладает наименьшей энергией, называется основным состоянием, он стабилен, а варианты с более высокой энергией (возбужденные состояния) спустя некоторое время превращаются в основное состояние с излучением фотона. Кроме того, если атом находится внутри ловушки, то его поступательное движение тоже квантуется, то есть оно тоже может иметь строго определенный вид. У этого движения есть основное состояние, при котором ион практически замирает в центре ловушки (у него остается лишь неустранимое квантовое дрожание, называемое «нулевыми колебаниями»), и целая лестница возбужденных состояний, которые отвечают перемещению туда-сюда со всё большей амплитудой. Энергия возбуждения электронной оболочки на несколько порядков больше энергии возбуждения поступательного движения, и поэтому энергетический спектр иона (в этом грубом приближении) имеет вид, показанный на рис. 6.

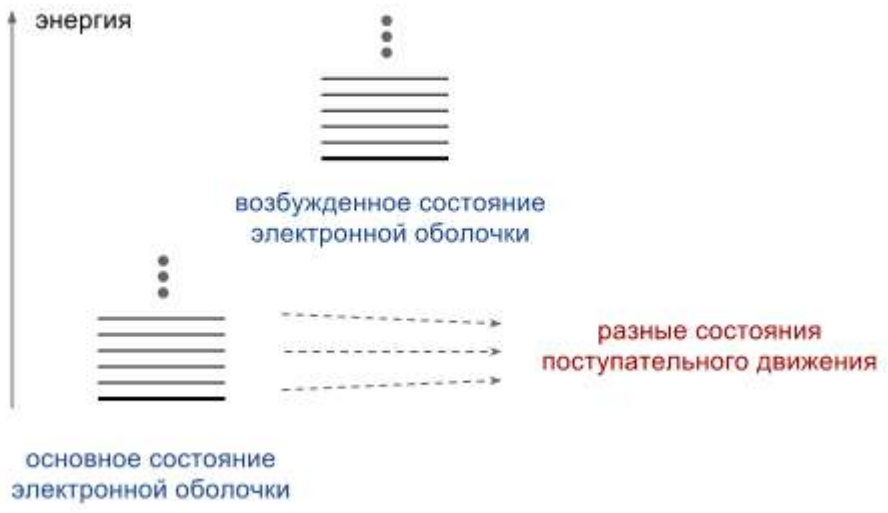

Рис. 6. Упрощенная схема энергетического спектра иона: показаны основное и одно возбужденное состояние электронной оболочки, и в обоих случаях отмечены несколько возбужденных состояний поступательного движения

Теперь самое интересное. Физики умеют перебрасывать основное состояние электронной оболочки в возбужденное, причем перебрасывать «прицельно», именно в то возбужденное состояние, которое мы хотим, — для этого надо просто посветить на атом светом с нужной длиной волны. Оказывается, эта комбинация — мы возбуждаем атом так, как нам нужно, а он выходит из этого состояния так, как «он привык», — позволяет охлаждать поступательное движение атомов (рис. 7).

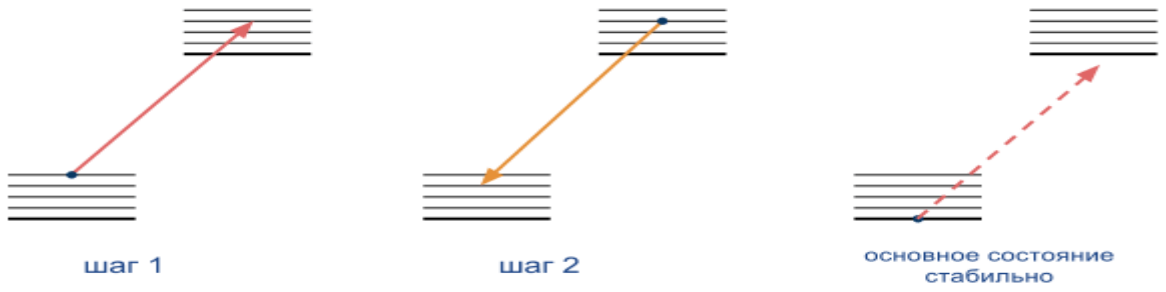

Рис. 7. Идея метода охлаждения по боковой полосе частот. На шаге 1 мы возбуждаем электронную оболочку и слегка уменьшаем поступательное движение. На шаге 2 атом «падает» в основное состояние электронной оболочки, не меняя при этом поступательного движения. Когда мы достигаем низа «лестницы», то ион, находящийся в основном состоянии и электронной оболочки, и поступательного движения, уже никуда не может перейти

Для этого мы берем атом или ион в основном электронном состоянии и с большим поступательным движением и перекидываем его в состояние с возбужденной электронной оболочкой (обыч-

но это просто переворот спина внешнего электрона), но с *чуть меньшим поступательным движением*. Атом через некоторое время высвечивает фотон и «падает» в основное состояние электронной оболочки, а поступательное движение при этом не меняется. Чистый результат этого двухшагового процесса — поступательное движение слегка уменьшилось. Повторяя эту процедуру раз за разом, мы можем совсем погасить поступательное движение, «посадив» атом в основное состояние (так что останутся только нулевые колебания). И «сев» в это состояние, атом уже не будет возбуждаться, поскольку ему просто некуда перескакивать.

В практической реализации этой идеи было, конечно, немало технических тонкостей — в частности, возбужденному атому приходилось «помогать» побыстрее снимать возбуждение, чтобы достичь нужной скорости охлаждения. Напряженная работа в течение нескольких лет позволила Вайнленду с сотрудниками их преодолеть, и в 1989 году вышла статья, рапортующая о достижении основного квантового состояния поступательного движения иона ртути. Правда, в этой статье локализация была достигнут? ? только в поперечной плоскости, а квантованное движение вдоль оси установки было еще недоступно. Однако несколько лет спустя, в 1995 году, группа Вайнленда достигла и настоящей трехмерной локализации отдельного иона в основном квантовом состоянии.

Итак, в 1995 году завершилась — во многом благодаря достижениям группы Вайнленда — длившаяся десятилетия эпопея по полной квантовой локализации отдельного иона.

Квантовая информатика как экспериментальная наука

Как только поступательное движение иона в ловушке полностью подчинилось исследователям, сразу были реализованы необычные квантовомеханические ситуации, остававшиеся до этого чисто гипотетическими. В том же 1995 году группа Вайнленда поместила ион в состояние квантовой суперпозиции поступательного движения — когда ион не стоит на месте и не движется, а одновременно и стоит, и движется (этакая одноатомная версия «кота Шрёдингера»). Для достижения этого использовалась та же методика по перекидыванию состояний между основной и возбужденной энергетическими полосами. Вначале электронная оболочка атома переводилась из чисто основного состояния в состояние суперпозиции основного и возбужденного состояний. «Возбужденная часть» затем «падала» на основное электронное состояние, но с иным поступательным движением. В результате получалось состояние атома с электронной оболочкой в основном состоянии, но с суперпозицией поступательного движения.

Эта работа была важнейшим шагом на пути превращения физики квантовой информации из чисто теоретической в экспериментальную науку. Физики к тому времени уже давно мечтали не просто научиться манипулировать квантовым состоянием внутри отдельного атома, но и передавать эту квантовую информацию от одного атома к другому — это один из первых шагов на пути к созданию квантового компьютера. Работа группы Вайнленда 1995 года (которая, кстати, называлась «Демонстрация фундаментального квантового логического вентиля») показала, как это можно сделать. Квантовую суперпозицию, которая до сих пор «жила» внутри иона, теперь можно было превратить в нечто «внешнее», в суперпозицию поступательного движения. А это значит, что если неподалеку находится второй такой ион, который неизбежно связан с первым за счет электростатического взаимодействия, то он сможет воспринять ее и превратить ее в свою внутреннюю суперпозицию без потери когерентности (что и было достигнуто в 2003 году). Линейная цепочка таких атомов, зависшая в поле периодической ловушки, тогда сможет выполнять все функции квантового компьютера (рис. 8).

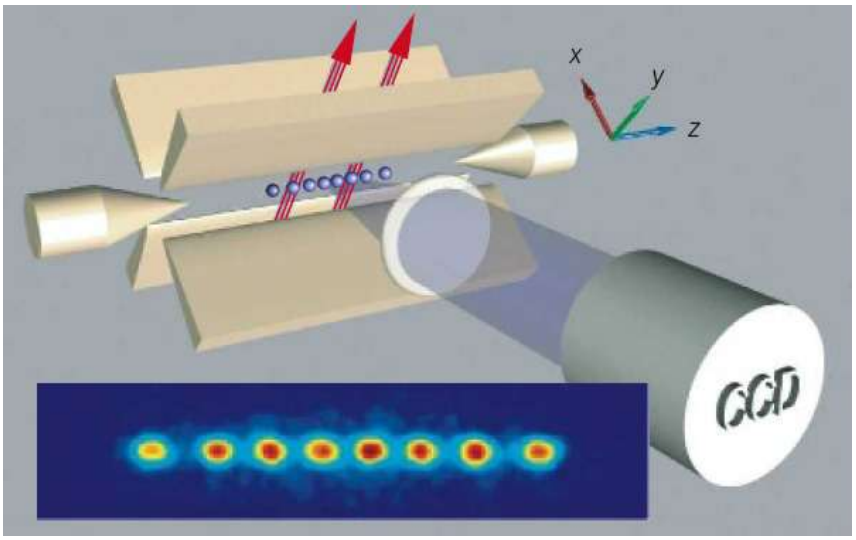

Рис. 8. Принципиальная схема квантового компьютера на цепочке холодных ионов, плененных в периодической ловушке. Специально подготовленные световые импульсы управляют логическими операциями между ионами, а чувствительная фотокамера детектирует свечение отдельных ионов и тем самым считывает результат операций. Изображение из статьи Blatt, Wineland, Nature 453, 1008 (19 June 2008)

После этого достижения экспериментальные методы в физике квантовой информации (а точнее, в ее ионной реализации) начали развиваться лавинообразно. В 1998 году Вайнленд добился квантового запутывания двух пространственно разнесенных ионов — опять же через суперпозицию поступательного движения. В 2000-х годах несколько исследовательских групп добились контролируемого квантового запутывания уже нескольких ионов. На сегодня уже реализовано квантовое запутывание 14 ионо в, а также многие из логических операций, необходимых для работы квантового вычислителя (см. обзорную статью Блатта и Вайнленда за 2008 год).

Сверхточные часы

Еще на заре развития описанных выше методов было ясно, что пленение и квантовый контроль отдельных ионов может иметь и далеко идущие практические применения. С одной стороны, глубоко охлажденные одиночные квантовые частицы могут стать сверхчувствительным сенсором внешних возмущений. С другой стороны, использование тех атомных переходов, которые малочувствительны к внешним возмущениям, позволит создать новый сверхстабильный стандарт частоты. Группа Вайнленда сейчас работает, среди прочего, и над этой задачей, используя всё те же плененные ионы. Два года назад, например, они сообщили о создании оптических часов, темп хода которых был измерен с относительной точностью 10^{-17}. Сейчас в литературе уже обсуждается точность хода на уровне 10^{-18} и лучше (см. обзор 2011 года).

Практическая польза от сверхточного стандарта частоты в том, что он позволяет замечать и использовать для практических целей исключительно слабые физические эффекты. Ярким примером тут является еще одна статья группы Вайнленда двухлетней давности, благодаря которой эффект общей теории относительности (!) может найти применение в геодезии и гидрологии (!) благодаря использованию сверхточных атомных часов. Дело тут в том, что, согласно общей теории относительности, время течет по-разному в гравитационном поле разной напряженности. При удалении от поверхности Земли гравитационное поле начинает ослабевать, и поэтому скорость хода часов, расположенных на разной высоте, будет отличаться. Группа Вайнленда сообщает, что ей удалось заметить это расхождение при разнице высот меньше 1 метра!

Такая тесная связь между разными разделами физики и их неожиданный выход на практические приложения — характерная черта современной науки. И если уж говорить о практической пользе фундаментальной физики, то работы нынешних нобелевских лауреатов лишний раз подтверждают справедливость тезиса: **с помощью фундаментальной науки мы находим и используем на практике новые природные явления**, до которых мы бы просто не смогли догадаться сами, застряв в рамках «инновационных» или «рационализаторских» предложений, основанных на старой физике.

Литература и ссылки:

Ключевые статьи Сержа Ароша:

- P. Goy, J. M. Raimond, M. Gross, and S. Haroche. Observation of Cavity-Enhanced Single-Atom Spontaneous Emission // *Phys. Rev. Lett.* 50, 1903 (1983).
- W. Jhe, ..., S. Haroche. Suppression of spontaneous decay at optical frequencies: Test of vacuum-field anisotropy in confined space // *Phys. Rev. Lett.* 58, 666 (1987).
- M. Brune, ..., S. Haroche. Realization of a two-photon maser oscillator // *Phys. Rev. Lett.* 59, 1899 (1987).
- M. Brune, ..., S. Haroche. Observing the Progressive Decoherence of the «Meter» in a Quantum Measurement //*Phys. Rev. Lett.* 77, 4887 (1996).
- S. Gleyzes, ..., S. Haroche. Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity // *Nature*446, 297 (15 March 2007).
- S. Deleglise, ..., S. Haroche. Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence //*Nature* 455, 510 (25 September 2008).

Ключевые статьи Дэвида Вайнленда:

- D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls. Radiation-Pressure Cooling of Bound Resonant Absorbers // *Phys. Rev. Lett.* 40, 1639 (1978).
- D. J. Wineland and Wayne M. Itano. Spectroscopy of a Single Mg^+ Ion // *Phys. Lett. A* 82, 75 (1981).
- F. Diedrich, J. C. Bergquist, W. M. Itano, and D. J. Wineland. Laser Cooling to the Zero-Point Energy of Motion //*Phys. Rev. Lett.* 62, 403 (1989).
- C. Monroe, ..., D. J. Wineland. Resolved-Sideband Raman Cooling of a Bound Atom to the 3D Zero-Point Energy //*Phys. Rev. Lett.* 75, 4011 (1995).
- C. Monroe, ..., D. J. Wineland. Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate // *Phys. Rev. Lett.* 75, 4714 (1995).
- Q. A. Turchette, ... D. J. Wineland. Deterministic Entanglement of Two Trapped Ions // *Phys. Rev. Lett.* 81, 3631 (1998).
- C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland. Optical Clocks and Relativity // *Science* 329, 1630 (24 September 2010).

Полезные ссылки:

- Информация на сайте Нобелевского комитета.
- M. Schirber. Nobel Prize — Tools for Quantum Tinkering // *Physics* 5, 114 (2012).
- Ion Storage Group, возглавляемая Вайнлендом. Содержит, среди прочего, и PDF-файлы большинства статей группы.
- 2012 Physics Nobel Prize Resources — подборка публикаций С. Ароша и Д. Вайнленда в журналах Американского института физики.
- Cavity quantum electrodynamics — страница группы, изучающей квантовую электродинамику в резонаторе под руководством Сержа Ароша. Там же размещены материалы конференции Atoms, Cavities and Photons, посвященной 65-летию Сержа Ароша, которые содержат интересные обзоры истории развития этой области физики.