

В этом выпуске:

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Реализм + локальность или квантовая механика

Исследования в области квантовых компьютеров и квантовой коммуникации оживили интерес к основам квантовой механики. Действительно, квантовая механика в том виде, в котором она сейчас используется, противоречит здравому (классическому) смыслу. В частности, она не удовлетворяет двум естественным требованиям - локальности и реальности, которым удовлетворяли раньше все классические физические теории. Под локальностью понимается требование того, чтобы достаточно удаленные объекты никак не влияли друг на друга. Реализм заключается в том, чтобы состояние системы никак не зависело от наблюдения, т.е. реальность существовала независимо от наблюдателя.

Несмотря на то, что расчеты, выполненные на основе современной квантовой теории, прекрасно согласуются с экспериментом, не прекращаются попытки переформулировать теорию, чтобы она лучше согласовывалась с классическим подходом.

Ранее была проведена экспериментальная проверка неравенств Белла на запутанных (entangled) парах фотонов. Изучались корреляции между измерениями поляризации фотонов в паре. Оказалось, что требование локальности противоречит эксперименту, в то время как квантовая теория дает прекрасное согласие. Таким образом, пришлось отказаться от локальности. После этого, пожертвовав локальностью, нобелевский лауреат Леггетт сформулировал теорию, сохраняющую реализм.

Однако результаты недавнего эксперимента, выполненного австрийскими и польскими учеными также на парах фотонов, показывают, что жертвы в виде локальности еще не достаточно для согласия с опытом. Опять-таки квантовая теория дала согласие с экспериментом, а теория Леггетта – противоречие. Возможно, скоро придется вообще отказаться от требования реальности и смириться с тем видом квантовой теории, в котором она сейчас пребывает.

В.Вьюрков

1. S.Gröblacher et al, Nature 446, 871(2007)

Как рождается сверхтекучая жидкость

В нашей повседневной жизни мы часто сталкиваемся с различными фазовыми переходами. Яркий пример – конденсация водяного пара, в результате которой на холодной поверхности образуются маленькие капельки воды. Более экзотичный фазовый переход происходит при бозе-эйнштейновской конденсации охлажденного до чрезвычайно низких температур $T < 1$ мК атомного газа. При таком переходе тоже образуется жидкость, только не обычная, а сверхтекучая. В ней макроскопическое количество частиц находится в одном квантовом состоянии, то есть волновая функция всех этих частиц имеет одинаковую фазу. Равновесные свойства сверхтекучей жидкости детально исследованы как теоретически,

2 «Долинный» транзистор на графене

СВЕРХПРОВОДНИКИ

3 Сверхпроводимость лития при атмосферном давлении

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

4 Получение однослойных углеродных нанотрубок из углеродного порошка в плазме

Сенсоры на основе углеродных нанотрубок способны определять pH раствора

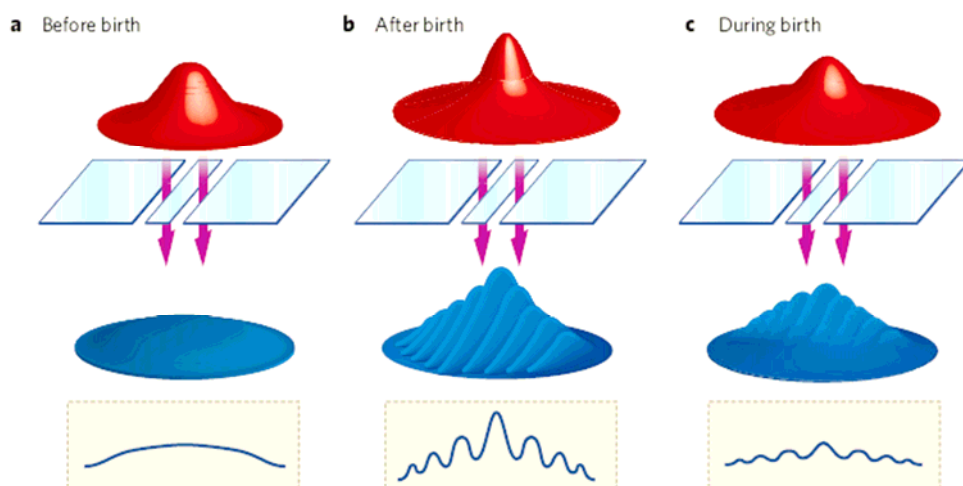
ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

5 В поисках абсолютной секретности

так и экспериментально. Хорошо изучен и механизм роста сверхтекучей капли из окружающего ее атомного газа (после столкновения двух атомов один из них присоединяется к конденсату, подобно тому, как в лазере возбужденная частица испускает фотон с определенной частотой и фазой). А вот кинетика зарождения такой капли (то есть кинетика установления макроскопической когерентности конденсата) пока остается не вполне понятной.

Чтобы изучить особенности начальной стадии процесса формирования недиагонального, дальнего порядка в бозе-газе атомов ^{87}Rb , швейцарские физики из ETH Zürich проанализировали "в режиме реального времени" интерференционные картинки, возникающие при прохождении атомного "облака" через две параллельные щели, сформированные микроволнами [1]. После резкого охлаждения атомного газа до температуры ниже точки бозе-конденсации, он сначала находится в сильно неравновесном состоянии, а затем за время $t \sim 500$ мс переходит в термодинамически равновесное

(сверхтекучее) состояние. Характер изменения интерферограмм (см. рис.), в том числе их невоспроизводимость на стадии формирования конденсата, свидетельствует о сильных флуктуациях недиагонального порядка в зарождающейся капле. Сходные результаты получены в работе [2] ученых из Франции (Université Paris-Sud) и Австралии (University of Queensland), которые для мониторинга конденсации использовали брэгговскую спектроскопию. Они обнаружили квадрупольные осцилляции формы сверхтекучей капли в момент ее рождения. По-видимому [3], "квантовый шум" в окружающем каплю атомном газе возбуждает ее низкоэнергетические коллективные моды, тем самым поначалу препятствуя росту капли. И лишь после затухания этих колебаний капля начинает быстро расти за счет обычного "столкновительного" механизма. Для количественной интерпретации экспериментальных данных [1,2] требуется теория, способная описать поведение бозе-конденсата вдали от термодинамического равновесия.



Интерферограммы, полученные в [1] при изучении эволюции бозе-газа холодных атомов ^{87}Rb к термодинамическому равновесию:

а) до зарождения сверхтекучей капли (спустя время $t = 0 \div 50$ мс после резкого охлаждения); б) после образования бозе-эйнштейновского конденсата ($t = 500 \div 550$ мс); в) в процессе конденсации ($t = 250 \div 300$ мс); эта картинка изменялась (например, смещалась) от эксперимента к эксперименту.

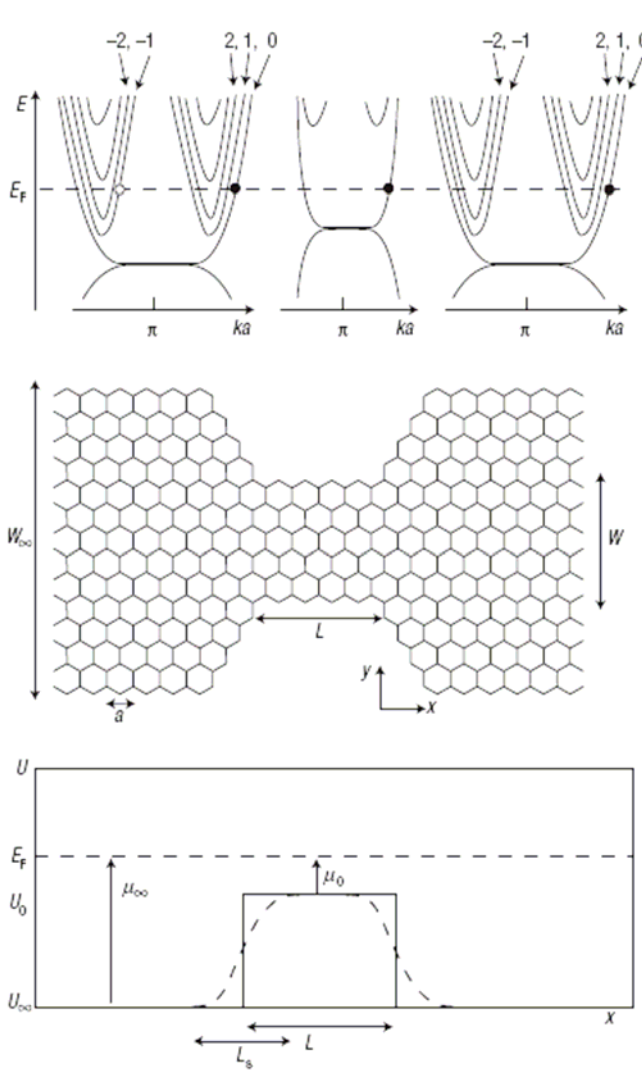
1. S.Ritter et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 090402 (2007).
2. M.Hugbart et al., *Phys. Rev. A*, **75**, 011602 (2007).
3. H.T.C.Stoof, *Nature* **447**, 390 (2007).

«Долинный» транзистор на графене

Группа Beenakker'a из Universiteit Leiden (Нидерланды), известная своими работами в области нанoeлектроники, выступила с предложением использовать своеобразие зонной структуры графена (монослой графита) для формирования полевых транзисторов с особым принципом работы. Каналом транзистора служит сужение в пленке графена (рис. 1, средняя часть рисунка). Потенциал на затворе (рис. 1, нижняя часть рисунка) смещает положение зонной структуры в канале транзистора по отношению к контактам истока и стока (рис. 1, верхняя часть рисунка). В показанном на рисунке

состоянии ток через канал переносят только электроны 0-вой долины (черные кружки), протекание тока по другим долинам заблокировано. Их можно «включить», подав соответствующее напряжение на затвор.

Авторы усматривают аналогию со спиновым фильтром. В данном случае вместо направления ориентации спина выступает принадлежность носителя к определенной долине. Нам представляется более очевидной аналогия с включением и выключением проводящих мод в сужении в двумерном электронном газе. Именно подобными структурами эта группа всю жизнь и занимается. Заметим, что «включение» и «выключение» долин происходит и в канале обычного кремниевого полевого транзистора на подложке «кремний на изоляторе» с тонким слоем кремния.



Потенциал на затворе (нижняя часть) смещает положение зонной структуры в канале транзистора по отношению к контактам истока и стока (верхняя часть). Каналом транзистора служит сужение в пленке графена (средняя часть). Горизонтальная штриховая линия показывает положение уровня Ферми.

В.Вьюрков

1. A. Rycerz et al, *Nature physics* **3**, 172, (2007).

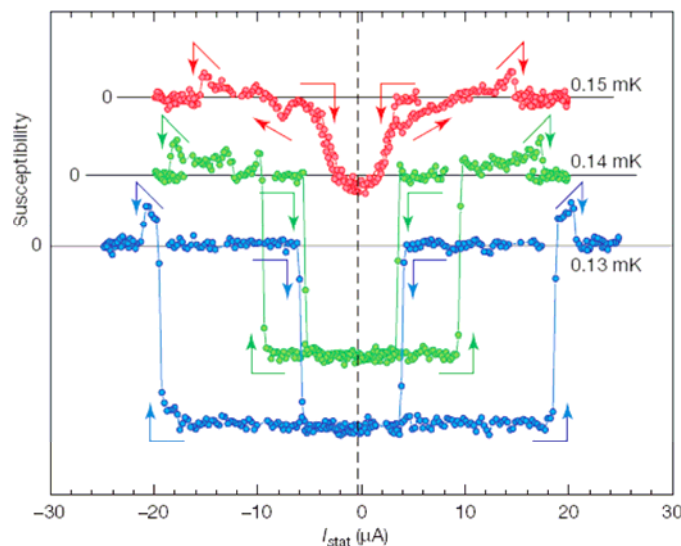
СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость лития при атмосферном давлении

Ни в одном щелочном металле объемная сверхпроводимость ни разу не наблюдалась при нормальном давлении. Между тем существует фундаментальный вопрос: может ли электронная подсистема этих простейших одновалентных соединений оставаться вырожденной вплоть до нулевой температуры, не переходя ни в магнитное, ни в сверхпроводящее состояние? И если нет, то при какой температуре тот или иной фазовый переход все же происходит? Из всех щелочных металлов наиболее вероятным кандидатом в сверхпроводники считается самый легкий – литий. Но сверхпроводящий переход в литии был зафиксирован лишь при очень высоких давлениях [1,2], приводящих к перестройке электронной зонной структуры. А при атмо-

сферном давлении признаков сверхпроводимости не было обнаружено даже при $T = 4$ мК [3].

Первыми здесь преуспели финские ученые из Helsinki University of Technology [4]. Особое внимание они уделили чистоте образцов, поскольку даже мизерного количества магнитных примесей достаточно, чтобы разрушить сверхпроводимость с низкой T_c . Кроме того, малым T_c соответствуют очень слабые критические поля, поэтому внешнее поле в [4] экранировалось до 20 нТл специальным экраном. Было исследовано несколько образцов, и в каждом из них зарегистрирован сверхпроводящий переход (см. рис.), хотя и при существенно различающихся T_c , от 0.16 мК до 0.43 мК. Такой разброс T_c авторы объясняют различной концентрацией магнитных примесей. Любопытно, что в одном из образцов имели место два перехода при разных T_c . Это обусловлено опять же либо неоднородным распределением примесей, либо неоднородностью кристаллической структуры. Дабы убедиться, что полученные ими результаты не являются артефактом (связанным, например, с использованной для охлаждения медной фольгой), авторы [4] на той же самой установке и в тех же самых условиях измерили при $T = 0.1$ мК магнитную восприимчивость образца, не содержащего лития. Эффект оказался отрицательным (что, кстати, накладывает ограничение на T_c меди).



Магнитная восприимчивость образца лития с $T_c = 0.18$ мК при различных температурах как функция силы тока, создающего постоянное магнитное поле (~ 10 мТл/А). Для наглядности кривые смещены относительно друг друга по вертикали. Стрелки указывают направление изменения поля (уменьшение или увеличение). Гистерезис обусловлен эффектом переохлаждения.

Л.Опенков

1. K.Shimizu et al., *Nature* **419**, 597 (2002).

2. V.V.Struzhkin et al., *Science* **298**, 1213 (2002).

3. K.M.Lang et al., *J. Low Temp. Phys.* **114**, 445 (1999).

4. J.Tuoriniemi et al., *Nature* **447**, 187 (2007).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Получение однослойных углеродных нанотрубок из углеродного порошка в плазме

Как известно, углеродные нанотрубки (УНТ) благодаря своим необычным физико-химическим свойствам весьма перспективны для различных приложений. Этот новый материал доказал свою эффективность как источник холодной электронной эмиссии, как основа новых материалов с повышенными механическими характеристиками, как сорбент для газообразных и жидких веществ и т.п. Однако до сих пор новые материалы и устройства на основе УНТ не получили широкого распространения, что связано с высокой стоимостью и низкой производительностью существующих методов получения УНТ в макроскопических количествах. Эти методы, основанные на поверхностных процедурах термического испарения графита либо осаждения паров углеродосодержащих соединений на поверхность металлического катализатора, характеризуются ограниченной производительностью, которая пропорциональна площади активной поверхности. Существенное повышение производительности синтеза УНТ может быть достигнуто благодаря переходу к синтезу в объеме. В этом случае производительность процесса синтеза пропорциональна не поверхности, а объему реакционной камеры и может значительно превысить величину, характерную для традиционных методов синтеза УНТ. Такой переход был предпринят недавно группой сотрудников одного из канадских университетов (Université de Sherbrooke), которые использовали для получения УНТ в макроскопическом количестве из мелкодисперсного углерода термическую плазму высокочастотного плазмотрона.

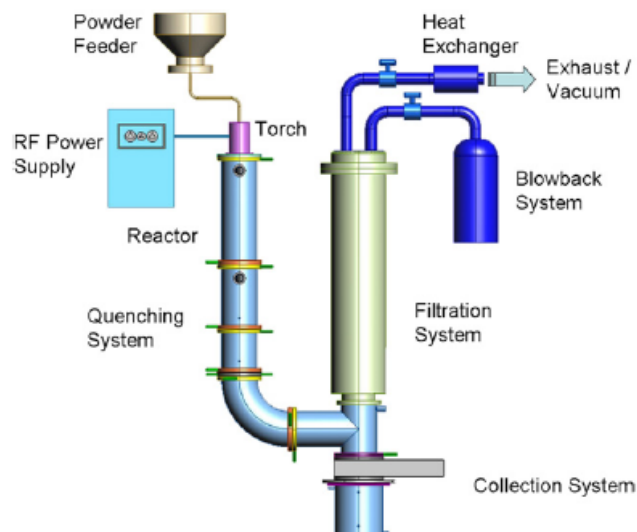


Схема установки по получению УНТ из мелкодисперсного углерода в плазме

Установка представляет собой серийно выпускаемый плазмотрон индукционного типа, питаемый источником переменного тока мощностью 60 кВт, работающим на частоте 3 МГц. Плазмотрон вклю-

чает в себя: плазменную камеру с внутренним диаметром 5 см, реактор длиной 50 см и внутренним диаметром 15 см, камеру быстрого охлаждения, составленную из двух двустенных цилиндрических сегментов длиной 20 и 30 см и внутренним диаметром 15 см. В область плазменного факела подается три независимых газовых потока - осевой, периферийный и несущий порошок. Первому потоку придается вращательное движение, обеспечивающее стабилизацию плазменного факела, а второй, ламинарный, служит для защиты стенок реактора от горячего газа. Фильтрационная система, которая служит для отделения материала, содержащего УНТ, от летучих компонентов, имеет три фильтровальных элемента диаметром 6 см и длиной 85 см на основе пористой керамики с диаметром пор 2,8 мкм. В качестве катализатора использовали частицы Ni размером < 1 мкм, Co размером < 2 мкм, CeO₂ и Y₂O₃, подмешиваемые в различных пропорциях при суммарной концентрации на уровне порядка 1 ат % к мелкодисперсному графиту. В качестве буферного газа использовали смесь He-Ar различного состава при полном давлении около 500 Торр. Порошок подавали в плазму со скоростями 1,2 - 2 г/мин. Каждый эксперимент продолжался 20 мин., хотя система допускала непрерывную эксплуатацию в течение 9 часов. В экспериментах использовали 3 типа углеродного порошка различной степени измельченности с размером частиц 75, 45 и 16 нм. Исследования, выполненные методами термогравиметрии и спектроскопии комбинационного рассеяния, показали, что в оптимальных условиях производительность синтеза порошка, содержащего до 40% однослойных УНТ, достигает 100 г/час. При этом оптимальные условия соответствуют чистому гелию, частицам углерода размером 75 нм и скорости их подачи 1,5-2 г/мин. Приведенные показатели заметно превышают результаты, достигнутые при использовании электродугового и лазерного методов синтеза УНТ, при этом нанотрубки по своему качеству лишь немного уступают синтезируемым лазерным методом. Следует отметить, что мелкодисперсный углерод значительно дешевле кристаллического графита, поэтому нанотрубки, полученные в плазме из порошка гораздо дешевле.

А.В.Елецкий

1. K. S. Kim et al. J. Phys. D: **40**, 2375 (2007)

Сенсоры на основе углеродных нанотрубок способны определять pH раствора

Углеродные нанотрубки имеют богатые перспективы использования в качестве основы сенсоров – приборов, определяющих характеристики той среды, где они находятся. Это связано с зависимостью электронных характеристик УНТ, таких как ширина запрещенной зоны, концентрация носителей и т. п., от химического состава окружающей среды. В силу такой зависимости вид вольт-амперной харак-

Перст, 2007, том 14, выпуск 11

теристики (ВАХ) нанотрубки определяется тем, какого сорта молекулы находятся в контакте с ее поверхностью. Сенсоры на основе УНТ благодаря удачному сочетанию таких качеств, как миниатюрные размеры, хорошая электропроводность, а также химическая и термическая стабильность являются предметом интенсивных разработок во многих лабораториях. Так, недавно в Korea University (Сеул, Ю.Корея) было обнаружено, что ВАХ УНТ обладает чувствительностью к величине pH раствора, омывающего нанотрубку. Это открывает возможность создания сверхминиатюрного сенсора для определения основной электрохимической характеристики водных растворов.

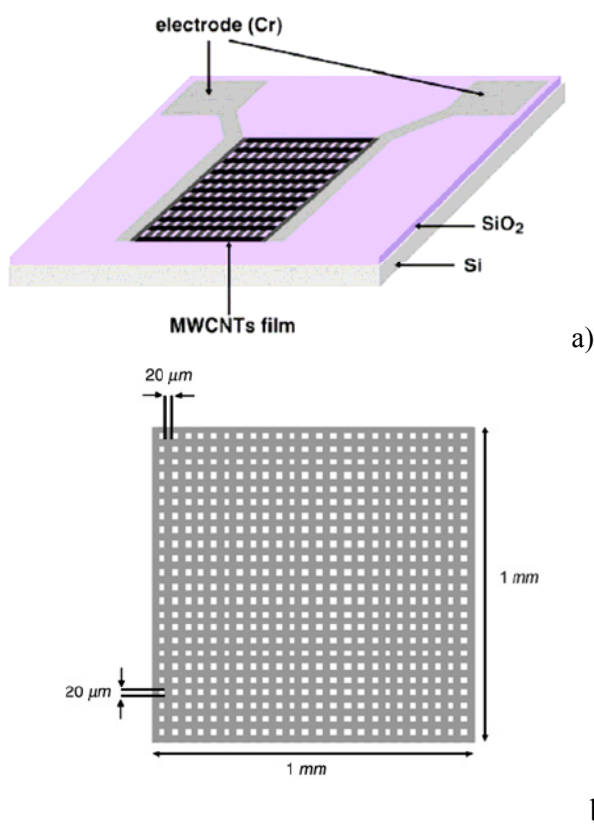


Рис. 1. Схема сенсора (а); структура пленки из многослойных УНТ (b)

Схема прибора представлена на рис. 1(а). На кремниевую подложку площадью $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ и толщиной 450 мкм нанесен изолирующий слой диоксида кремния толщиной 150 нм. Подготовленный литографическим методом участок поверхности подложки площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ покрывали частицами Со катализатора размером 8 нм, на которых методом химического осаждения паров выращивали пленку многослойных УНТ. По завершении процедуры роста УНТ измеряли ВАХ пленки с использованием конфигурации, показанной на рис. 1. При этом на поверхность пленки наносили каплю водного раствора, величина pH которого изменялась от 4 (кислота) до 10 (основание).

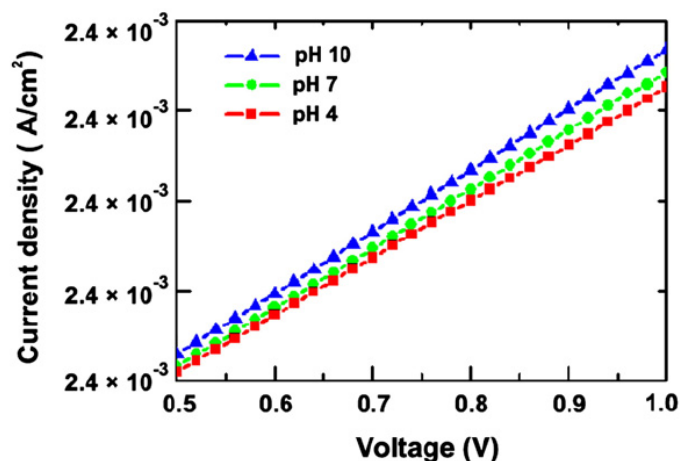


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики пленки многослойных УНТ, измеренные для различных величин pH раствора, нанесенного на пленку.

Результаты измерений, представленные на рис. 2, демонстрируют заметную чувствительность ВАХ образца к величине pH раствора. Рост pH раствора сопровождается увеличением проводимости образца, которая находится по наклону ВАХ. В качестве физического механизма, определяющего наблюдаемую зависимость проводимости от pH, авторы выдвигают предположение, согласно которому адсорбция гидроксильных групп нанотрубками, создает акцепторный уровень на их поверхности и увеличивает проводимость УНТ.

А.В.Елецкий

1. K. Lee et al. *Materials Letters* **61**, 3201 (2007)

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

В поисках абсолютной секретности

В один из тихих субботних вечеров 1946 года Frederic de Hoffman, физик из Los Alamos National Laboratory, хранивший документацию с описанием конструкции атомной бомбы в девяти сейфах, обнаружил в одном из них оставленную кем-то записку: "Если все комбинации на замках одинаковые, то отомкнуть один из них не труднее, чем другой". De Hoffman был в шоке: ядерные секреты похищены... В памяти сразу всплыла случившаяся минувшим летом история с попыткой проникновения неизвестного в секретные лаборатории. Но все оказалось гораздо проще: рядом стоял улыбающийся Ричард Фейнман – известный шутник, который умудрился каким-то образом открыть сейфовый замок, хотя код из шести цифр ему известен не был. Сделал он это не ради забавы, а просто для того, чтобы взять какие-то бумаги, срочно понадобившиеся ему для работы. С тех пор прошло немало лет, но вопрос о защите информации от посягательства извне ничуть не утратил своей актуальности. В частности, большое внимание уделяется разработке новых способов шифровки сообщений, как государственными, так и частными структурами. И хотя с годами эти способы становятся все

изошреннее, абсолютной секретности криптографических схем пока достичь не удалось.



Рис.1. Залезть в сейф? Легко!

В конце второго тысячелетия возникла новая наука – квантовая криптография, основанная на кодировании информации в квантовые состояния отдельных частиц, как правило, фотонов. Для генерации секретного квантового ключа обычно используется так называемый "протокол BB84" (Bennett & Brassard, 1984). Его суть заключается в следующем. Для поляризации каждого фотона отправитель выбирает по своему усмотрению либо "горизонтально-вертикальный", либо "повернутый" на угол 45° фильтр, см. рис.2. Каждое направление поляризации соответствует (по предварительной взаимной договоренности) логическим 0 или 1. Фотон по оптоволоконному кабелю приходит к получателю, который для определения его поляризации использует (случайным образом) один из упомянутых типов фильтров. При этом, если выбранная им ориентация фильтра окажется такой же, как у отправителя, то он сможет "прочитать" один бит отправленной ему информации, а если нет – то (согласно

законам квантовой механики) с вероятностью $1/2$ получит либо правильное, либо неправильное значение этого бита. После передачи определенного количества фотонов отправитель и получатель сравнивают (по открытому каналу, например, по обычному телефону) типы фильтров, использованных тем и другим для каждого фотона, и оставляют только такие биты, которые были отправлены и "прочитаны" с помощью одинаковых фильтров. Этот набор битов и формирует секретный ключ, который в дальнейшем можно использовать для обмена сообщениями (рис.2). На первый взгляд протокол BB84 кажется довольно сложным и не очень эффективным. Но его отличительной особенностью является то, что ни один посторонний наблюдатель не в состоянии "подсмотреть" процесс генерации ключа так, чтобы остаться при этом незамеченным. Дело в том, что подсматривающий, определив поляризацию фотона, не может с достоверностью судить о том, каким именно фильтром пользовался отправитель. Поэтому при перехвате фотонов получателю он (по теории вероятности) примерно в половине случаев будет использовать другой тип фильтра, нежели отправитель, и измеренная получателем поляризация будет не всегда совпадать с исходной даже при выборе им такого же как у отправителя фильтра. Это несанкционированное вмешательство легко обнаружить: достаточно лишь сравнить (опять же по открытому каналу) какую-то часть отправленного и полученного ключа и, если число расхождений превысит "уровень шума" (определяемый погрешностью измерений поляризации), сказать: "Нас подслушали. Попробуем еще раз".

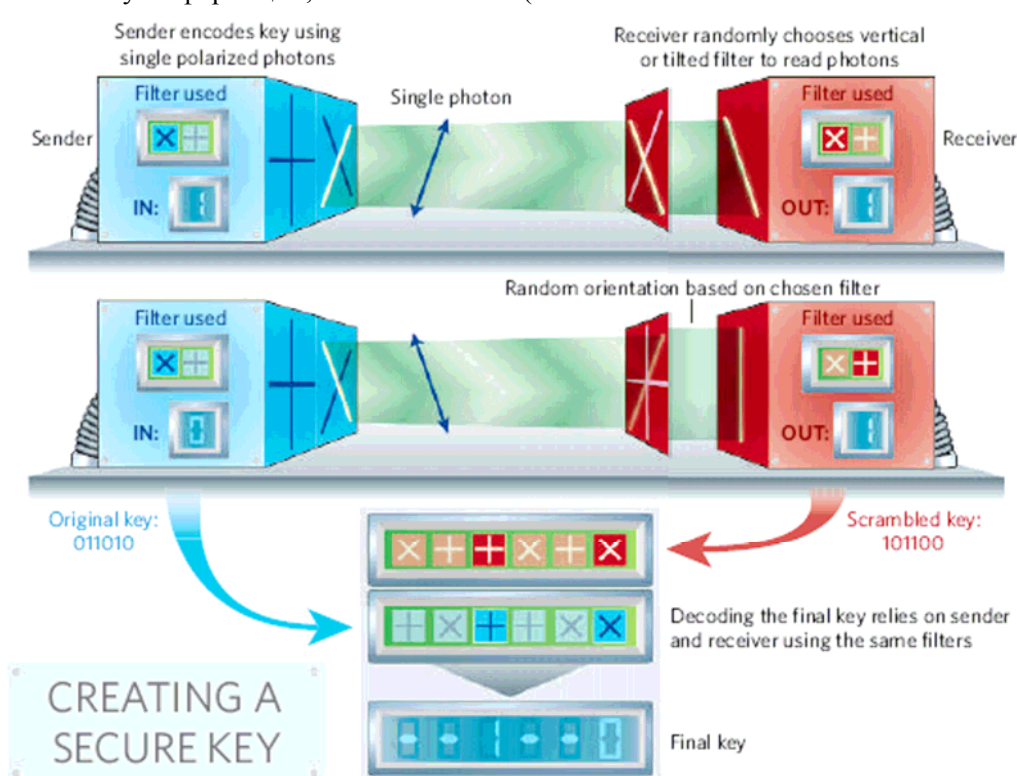


Рис.2. Схематическая иллюстрация протокола BB84 для генерации секретного квантового ключа с использованием одиночных фотонов.

Но может ли квантовая криптография претендовать на абсолютную секретность? Теоретически – да. А вот практически... Charles Bennett вспоминает, что в первой экспериментальной квантовой криптосистеме (1989 год) для переключения поляризации фотонов с "горизонтально-вертикальной" на "повернутую" использовался высоковольтный источник, который "жужжал" по-разному в зависимости от того, подавалось напряжение или нет. Подслушав такое жужжание, можно было, используя при перехвате фотонов надлежащие фильтры, в конечном счете разгадать ключ. Позже от этого недостатка избавились, но ведь есть и другие, причем не только субъективные. Например, "квантовым хакерам" из Massachusetts Institute of Technology удалось определить около 40% ключа, "запутывая" поляризацию каждого фотона с его импульсом, но при этом, не изменяя ее [1]. У квантовой криптографии постоянно находят все новые и новые слабые места. Так, согласно теории, отправитель и получатель полностью контролируют свое

оборудование. Между тем, можно использовать "грязный прием": посылать фотоны одновременно и тому, и другому [2]. Незначительные дефекты фотодетекторов тоже делают квантовую криптографию уязвимой [3]. А существует еще и пресловутый "человеческий фактор". Ведь Фейнман в 1946 году просто угадал секретную комбинацию из шести цифр. Он понимал, что его друг-физик выбрал в качестве кода такое число, которое знал наизубок. И Фейнман угадал со второго раза: "271828" – первые шесть значащих цифр математической константы e . История умалчивает о том, какую комбинацию Фейнман использовал в своей первой попытке. Но не трудно догадаться, что это было "314159".

1. T.Kim et al, *Phys. Rev. A* **75**, 042327 (2007).
2. N.Gisin et al, *Phys. Rev. A* **73**, 022320 (2006).
3. <http://lanl.arxiv.org/abs/0704.3253> (2007).
4. G.Brumfiel, *Nature* **447**, 372 (2007).

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и РНЦ «Курчатовский институт»

Научный редактор К.Кугель

Ответственный редактор: И.Чугуева e-mail: Irina@issp.ras.ru

В подготовке выпуска принимали участие В.Вьюрков, А.Елецкий, Ю.Метлин, Л.Опенов,

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а