

## Управление фотонами в ящике и изучение границы между квантовым и классическим

С. Арош

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2012 г.)

PACS numbers: 03.67. – a, 42.50.Dv, 42.50.Pq

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201410e.1068

### Содержание

1. Введение (1068).
  2. Управление одиночными частицами в квантовом мире (1068).
  3. Мой взгляд на раннее развитие квантовой электродинамики резонаторов (1070).
  4. Счёт фотонов без их уничтожения: новый фотонный ящик и циркулярные ридберговские атомы (1074).
  5. Квантовая обратная связь (1078).
  6. Восстановление состояния поля (1079).
  7. Состояния света типа "кот Шрёдингера" и исследование декогеренции (1080).
  8. Квантовая информация в КЭД резонаторов (1082).
  9. Дальнейшие перспективы работы ENS (1084).
  10. Связь с другими областями квантовой информатики (1084).
- Список литературы (1087).

### 1. Введение

Фотоны микроволнового излучения, находящиеся в сверхпроводящем резонаторе, представляют собой идеальную систему для реализации различных мысленных экспериментов, которые были предложены отцами-основателями квантовой физики. Взаимодействие этих фотонов с ридберговскими атомами, пролетающими через резонатор, иллюстрирует фундаментальные аспекты теории измерения. Эксперименты с подобным "фотонным ящиком", которые были проведены в Высшей нормальной школе (ENS), относятся к области квантовой оптики, называемой "Квантовая электродинамика резонаторов". Мы реализовали невозмущающий счёт фотонов, провели наблюдение квантовых скачков полей, смогли осуществить приготовление и восстановление состояний излучения типа "кот Шрёдингера", а также изучили их декогеренцию, что стало поразительной демонстрацией перехода от квантового мира к классическому. Эти эксперименты привели также к первым шагам в квантовой обработке информации, включая контролируемое перепутывание состояний ато-

мов и реализацию квантовых преобразований с атомами и фотонами в качестве квантовых битов. В этой лекции вначале обсуждается связь между экспериментами с фотонным ящиком в ENS и экспериментами с ионами в ловушках Дэвида Вайнленда (David Wineland), в сопутствующей лекции которого рассказывается о его личном вкладе в область управления одиночными частицами. Затем я поделюсь своим взглядом на начальное развитие квантовой электродинамики резонаторов. Далее расскажу об основных экспериментах, проведённых в ENS за последние двадцать лет, и в заключение проведу сравнение нашей работы с другими исследованиями в области управления одиночными квантовыми частицами.

### 2. Управление одиночными частицами в квантовом мире

Уже почти сто лет назад квантовая теория показала, что материя и свет проявляют как свойства частиц, так и волновые свойства. Атомы и субатомные частицы, которые обычно описывают как дискретные объекты, могут вести себя как волны; при этом свет, в основном описываемый как электромагнитная волна, состоит из дискретных квантов — фотонов. Этот корпускулярно-волновой дуализм приводит к представлению о странном квантовом мире, где атомы и световые поля могут находиться в суперпозиции состояний, другими словами, могут быть растянуты между двумя различными классическими реальностями. Такую ситуацию невозможно представить интуитивно нашим классическим сознанием, которое развивалось для понимания окружающего нас макроскопического мира.

Основатели квантовой механики пришли к этому странному описанию мира в результате дедуктивных размышлений, основанных на открытии таких свойств материи и излучения, которые классическая физика не могла объяснить. Тем не менее прямое наблюдение странностей квантового мира было недоступно на протяжении долгого времени. Чтобы проиллюстрировать не подчиняющиеся интуиции законы природы на микроскопическом уровне, Бор, Эйнштейн и Шрёдингер предлагали *мысленные эксперименты*, в которых представ-

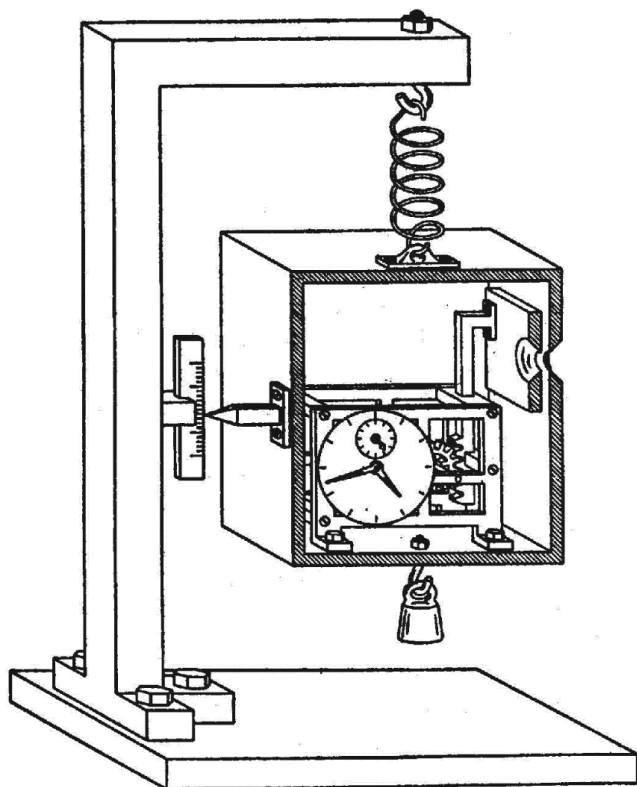


Рис. 1. Фотонный ящик Эйнштейна–Бора (с разрешения Архива Нильса Бора).

ляли, что могут наблюдать отдельные квантовые частицы и управлять ими. Для примера на рис. 1 показан известный фотонный ящик, который предназначен для временного хранения фотонов и их контролируемого испускания. Его придумали Эйнштейн и Бор как иллюстрацию к их обсуждениям [1]. Данная воображаемая экспериментальная установка имела много частей, среди которых были часы, соединённые с затвором, выпускающим фотон, которые Бор попросил изобразить наиболее реалистично.

Вообразая эти и другие подобные эксперименты, отцы теории не могли себе представить, что однажды такие эксперименты можно будет реализовать. Начиная с 1930-х гг. отдельные частицы, несомненно, можно было детектировать и изучать, например, в пузырьковой камере или камере Вильсона, или в экспериментах с ускорителями, но их наблюдение проводилось по оставленным следам или по осколкам, образовавшимся после сильных столкновений. В этих экспериментах существование частиц и их свойства обсуждались *"посмертно"* (*"post-mortem"*). В 1952 г. Шрёдингер писал об этих исследованиях: "Во-первых, для ясности следует сказать, что мы не экспериментируем с одиночными частицами. Возможностей экспериментировать с одной частицей у нас несколько не больше, чем надежд на водворение в зоопарк ихтиозавра. Нам не остаётся ничего иного, как тщательно изучать результаты регистрации событий, которые давным-давно свершились" [2]<sup>1</sup>.

Для того чтобы наблюдать квантовые эффекты в зоопарке, необходимо управлять частицами намного

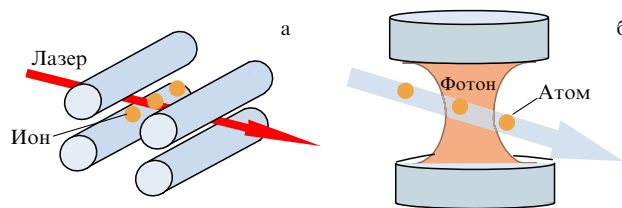


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Схема ионной ловушки в NIST (а) и фотонного ящика в ENS (б).

осторожнее, не разрушая их непосредственно актом измерения. Методы подобного тонкого управления появились только после создания узкополосных перестраиваемых лазеров, быстрых компьютеров и сверхпроводящих материалов, и все эти разработки в той или иной степени обязаны своим появлением квантовой теории. Применяя эти методы и работая в области квантовой оптики, многие группы по всему миру теперь могут детектировать одиночные частицы и управлять ими, одновременно сохраняя и даже используя их квантовые свойства. Исследования, проведённые Дэвидом Вайнлендом и его командой в Национальном институте стандартов и технологии (NIST) в Боулдере (США) и моей группой в Лаборатории Кастлера Бросселя в Высшей нормальной школе (ENS) в Париже, относятся непосредственно к этой популярной области исследования.

На самом деле, эксперименты в Боулдере и Париже показывают две стороны одной и той же медали: группа в NIST работает с одиночными заряженными атомами, называемыми ионами, в ловушках с распределением поля, создаваемым электродами, и использует лазерные пучки для управления и изучения поведения этих частиц материи. В команде ENS мы делаем обратное: заключаем фотоны в резонатор, образованный зеркалами с высоким коэффициентом отражения, и используем атомные пучки, чтобы детектировать эти частицы света, управлять ими и изучать их эволюцию. Схемы этих дополняющих друг друга экспериментов изображены на рис. 2. В обоих случаях исследования проводятся в естественных условиях (*"in vivo"*) для сохранения квантовых свойств изучаемых систем.

Простая теоретическая модель, предложенная Джейнсом (Jaynes) и Каммингсом (Cummings) [3] на заре лазерной физики, применима в обоих случаях и способствует объединению этих двух направлений исследования. В рамках такой модели атомы описываются как двухуровневые системы типа частицы со спином  $1/2$ , которые взаимодействуют с квантовым осциллятором. В экспериментах в Боулдере внутренние степени свободы ионов (отвечающие за "спин") обмениваются энергией с внешним движением частиц в ловушке, представляющим собой механические колебания, квантами которого являются фононы. Процесс обмена осуществляется в результате освещения ионов лазерными пучками с определёнными частотами, таким образом вызываются переходы между внутренними состояниями иона и одновременное испускание или поглощение фонона. В парижских экспериментах двухуровневые атомы взаимодействуют непосредственно с модой микроволнового поля в резонаторе, также представляющей собой квантовый осциллятор, квантами которого являются фотоны. В данном случае взаимодействие отвечает за процессы поглощения и испу-

<sup>1</sup> Э. Шрёдингер. *Избранные труды по квантовой механике* (М.: Наука, 1976). (Примеч. ред.)

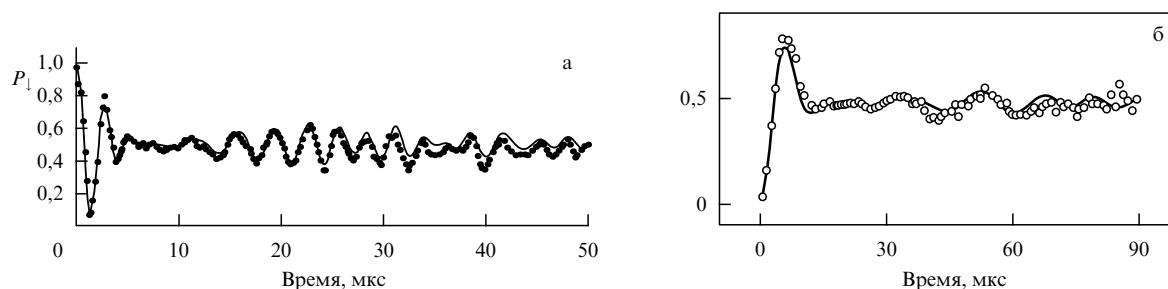


Рис. 3. Осцилляции Раби в экспериментах в NIST (а) и ENS (б) (Перепечатано с разрешения [5] и [6], ©Американское физическое общество; аннотации онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v76/i11/p1796.1> и <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v76/i11/p1800.1>).

скания фотонов атомами, пролетающими через резонатор. Простое описание модели Джейнса–Каммингса, а также её применение в экспериментах ENS и NIST можно найти в книге "Exploring the quantum: atoms, cavities and photons" [4].

На рисунке 3 видна близость подходов в NIST и ENS. На рисунке 3 представлены графики экспериментально зафиксированных сигналов, опубликованные в двух статьях из одного и того же выпуска журнала *Physical Review Letters* за 1996 г. Мы независимо работали в Париже и в Боулдере на достаточно разных установках, однако полученные результаты выглядят очень схоже. На рисунке 3а показано, как "расписывается" ("signature") ион, осциллирующий в боулдеровской ловушке в суперпозиции состояний с различным числом квантов движения [5], а на рис. 3б показана соответствующая "подпись" атомов после резонансного взаимодействия в парижском резонаторе со слабо осциллирующим электромагнитным полем, находящимся в суперпозиции состояний с разным числом фотонов [6]. Такие сигналы, представляющие собой вероятность перехода между двумя состояниями иона или атома в зависимости от времени, называются "осцилляциями Раби" ("Rabi oscillations"). Вид этих зависимостей соответствует биениям между двумя синусоидальными осцилляциями, отвечающими состояниям с разным числом квантов, и даёт информацию о разрежённости энергетического спектра механического или электромагнитного осциллятора, с которым связаны атомы или ионы. Как показано ниже, использование подобных осцилляций Раби играет важную роль в управлении состояниями атомов и полей для обработки квантовой информации.

### 3. Мой взгляд на раннее развитие квантовой электродинамики резонаторов

На самом деле история управления отдельными частицами и создания ловушек для них началась задолго до проведения упомянутых экспериментов по осцилляциям Раби. Дэвид Вайнленд в своей нобелевской лекции вспоминает первые этапы физики ионов в ловушках. Здесь я расскажу про мои эксперименты с "фотонным ящиком", которые начались в то время, когда связь между этими двумя развивающимися направлениями исследования ещё не была очевидной.

Прежде всего я должен упомянуть о моей кандидатской работе [7, 8], проведённой под руководством Клода Коэн-Таннуджи (Claude Cohen-Tannoudji) в лаборатории радиоспектроскопии в Высшей нормальной школе, которая позже стала лабораторией Кастлера–Бросселя. Именно

в этот период становления я понял, что материей можно управлять посредством света. Я познакомился с методом оптической накачки, изобретённым Кастлером (Kastler) и Бросселем (Brossel), в котором световые пучки используются для ориентирования магнитных моментов атомов и для детектирования их переключения в радиочастотных полях. В то время мы наблюдали и управляли большими ансамблями, состоящими из миллиардов атомов, находившихся в резонансной ячейке. Меня поражал тот факт, что все наши эксперименты объяснялись законами квантовой механики, которые я узнавал из познавательных лекций моего научного руководителя. Нам оставалось только верить в то, что в нашей ячейке находились атомы, коллективно подчиняющиеся этим законам, поскольку мы не могли наблюдать их по отдельности.

В то же время мы с Клодом разработали формализм "одетого атома" ("dressed atom"), который объясняет поведение атомов под влиянием радиочастотных полей, описываемых в фотонном представлении [8, 9]. Провести квантование поля в данном случае было смелым шагом, так как рассматриваемые поля состояли из огромного числа квантов света и могли быть хорошо описаны классическими непрерывными волнами. Квантовая картина, где атомы представлялись окружёнными или "одетыми" в облака фотонов, была вдохновлена квантовой электродинамикой, которая была чужда большинству атомных физиков. Тем не менее этот подход оказался очень продуктивным и позволил нам открыть множество интересных эффектов в области магнитного резонанса, которые были не так очевидны при классическом описании [10].

Именно в то время в моём сознании начали складываться мечты о проведении экспериментов с малым числом фотонов. Размышляя над вопросом Анатоля Абрагама (Anatole Abragam) — члена комиссии на защите моей кандидатской работы — я пытался понять, возможно ли провести эксперимент, в котором формализм одетого атома был бы не просто удобным физическим описанием, а представлением, необходимым для объяснения истинно квантовых эффектов. Я не представлял, как можно было осуществить подобную ситуацию, когда уезжал из Парижа в Стэнфорд в 1972 г. для визита в качестве постдока к Артуру Шавлоу (Arthur Schawlow).

В это захватывающее время я стал свидетелем разработки первых коммерческих перестраиваемых лазеров на красителях, которые должны были совершить революцию в атомной и молекулярной спектроскопии. Прототипы этих лазеров, производимых калифорнийскими стартап-компаниями, доставлялись в близлежащие уни-

верситеты, среди которых стэнфордский был, вероятно, первым. После выполнения кандидатской работы, где я использовал классические лампы, мне нужно было привыкнуть к этим новым источникам света. Работая с Джеффри Пайзнером (Jeffrey Paisner), аспирантом Артура Шавлоу, я использовал импульсный лазер на красителях для приведения атомов цезия в суперпозицию возбуждённых состояний и затем наблюдал квантовые биения в излучении флуоресценции, испускаемом возбуждёнными атомами [11]. Эти исследования квантовых биений снова привлекли моё внимание к важному понятию суперпозиции состояний, с которым я уже сталкивался в другом контексте во время моей кандидатской работы, когда изучал резонансы, относящиеся к пересечению уровней в энергетической диаграмме одетых атомов [12].

Несмотря на то что модуляции сигнала флуоресценции, характерные для квантовых биений, наблюдались для большого ансамбля атомов, основной эффект, отвечавший за них, состоял в интерференции для одного атома. Во время импульсного возбуждения и последующего процесса испускания фотона с каждым атомом одновременно происходят несколько событий, в процессе которых атом переходит из основного состояния в различные возбуждённые состояния и возвращается обратно в начальное состояние. Биения наблюдались из-за неразличимости этих событий. В то время, даже не имея возможности провести эксперимент, я знал, что биения останутся и в случае измерений с одиночным атомом, так же как и эксперимент Юнга с двумя щелями может проводиться, когда частицы проходят через интерферометр по одной. И снова я был заинтригован возможностью наблюдать квантовые эффекты для одиночной частицы.

В 1973 г. я привёз технологию импульсного перестраиваемого лазера на красителях в Париж, когда вернулся в ENS, чтобы занять постоянную должность в Национальном центре научных исследований (CNRS), прежде чем в 1975 г. меня назначили профессором в Университете Парижа 6 (Университет Пьера и Марии Кюри, Paris VI University). После моих первых исследований квантовых биений, проведённых на состояниях с малыми значениями главного квантового числа, было естественно попробовать перейти к более высоким атомным уровням, и я начал измерения квантовых биений в подобных состояниях натрия [13]. Вблизи атомного порога ионизации было очень много уровней, которые образовывали *Terra Incognita* так называемых *ридберговских состояний* с огромными электронными орбитами. Лазеры позволяли нам готовить и изучать эти состояния, и я, как и Даниэль Клеппнер (Daniel Kleppner) из Массачусетского технологического института (MIT) и многие другие коллеги в Европе и США, был поражён многообещающими свойствами этих гигантских атомов, о которых я подробнее расскажу ниже. В частности, меня заинтересовала их исключительная чувствительность к микроволновому излучению.

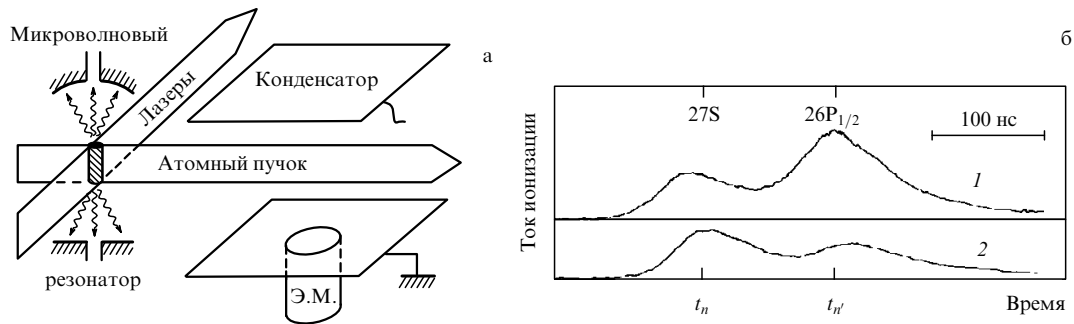
Я приступил к проведению экспериментов по микроволновой спектроскопии этих атомов [14, 15], работая с небольшой группой преданных своему делу и способных студентов-дипломников. К Мишелю Гроссу (Michel Gross) и Клоду Фабру (Claude Fabre), которые в дальнейшем продолжили свои независимые и успешные карьеры, вскоре присоединился Жан-Мишель Раймонд (Jean-Mi-

chel Raimond), он остался со мной и с тех пор сопровождал меня на этом долгом исследовательском пути. Нам также повезло работать с Филиппом Гойем (Philippe Goy), волшебником технологий миллиметровых волн в физике конденсированного состояния, который заинтересовался нашими экспериментами по микроволновой спектроскопии ридберговских атомов. Источники и детекторы миллиметровых волн, которые мы разработали для наших исследований, позволили ему основать компанию, которая и сейчас производит на заказ и продаёт лабораториям по всему миру устройства для миллиметровых волн.

Для наших экспериментов мы использовали простую установку, изображённую на рис. 4: атомы в пучке возбуждаются лазерами до ридберговских состояний и в той же области пространства облучаются микроволновым полем. Это поле заключено в открытом резонаторе, сделанном из медных зеркал, сведённых вместе, чтобы точно определять зону, где происходит облучение атомов. После прохождения резонатора атомы ионизируются между пластинами конденсатора, напряжение и поле которого возрастает со временем и в разные моменты времени достигает порога ионизации двух энергетических состояний  $e$  и  $g$ , разделённых микроволновым переходом. Таким образом, различные сигналы ионизации позволяют нам разделять два состояния. Этот очень эффективный и избирательный метод детектирования, впервые предложенный в физике ридберговских атомов Даниэлем Клеппнером и его студентами [16], до сих пор используется нами.

В 1979 г. я осознал, что если атомы изначально находятся в верхнем состоянии перехода, а резонатор настроен на точный резонанс, то нет необходимости в добавлении микроволн, чтобы наблюдать быстрый переход между двумя состояниями. Я сразу же понял, что ансамбль возбуждённых ридберговских атомов спонтанно излучал в резонатор, образуя импульсный мазер [17]. Удивительным и неожиданным свойством был низкий уровень порога возбуждения данного мазера, для работы которого нужно было лишь несколько сотен атомов по сравнению с миллиардами атомов, участвующих в работе обычных мазеров или лазеров. Этот необычный порядок величины был, очевидно, связан с очень сильным взаимодействием ридберговских атомов с микрорезонаторами. В выводах статьи, в которой описывался этот результат, мы отметили, что данный эксперимент открывает возможности для изучения образцов со значительно меньшими размерами при условии, если у нас будут более добротные резонаторы с большим временем затухания поля.

На самом деле мы только начали наш путь к детектированию и управлению отдельными атомами и фотонами. Область физики, в которой мы начали работать, включающая в себя взаимодействие атомов и фотонов в пространстве, замкнутом между зеркалами, называлась "квантовая электродинамика резонаторов" (сокращённо КЭД резонаторов), это название придумал Даниэль Клеппнер примерно в 1980 г. Мне сразу же понравилось такое название, поскольку в нём снова соединялись атомная физика и квантовая электродинамика в духе того, что я и Клод Коэн-Таннуджи уже пытались сделать на десять лет ранее, вводя формализм "одетого атома". Необходимо было ещё провести эксперименты, чтобы показать справедливость выбора тер-

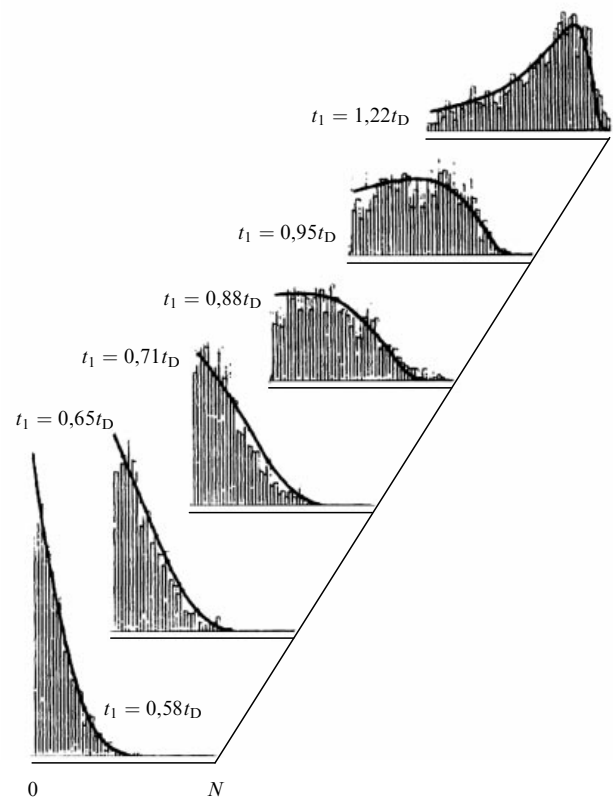


**Рис. 4.** Эксперимент с мазером на ридберговских атомах. (а) Схема установки. (б) Сигналы атомной ионизации в зависимости от времени, разделяющего верхнее (27S) и нижнее (26P) состояния атомного перехода. Нижняя и верхняя зависимости отвечают резонансному и нерезонансному случаю соответственно (перепечатано с разрешения [17], ©American Physical Society; аннотация онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v43/i5/p343.1>).

мина "квантовый", но теперь мы по крайней мере знали, в каком направлении нам надо было двигаться. Резонатор, содержащий поле, стал критическим элементом, наиболее нуждавшимся в улучшении, а ридберговские атомы стали рабочими лошадками, позволявшими нам исследовать квантовые свойства этого поля.

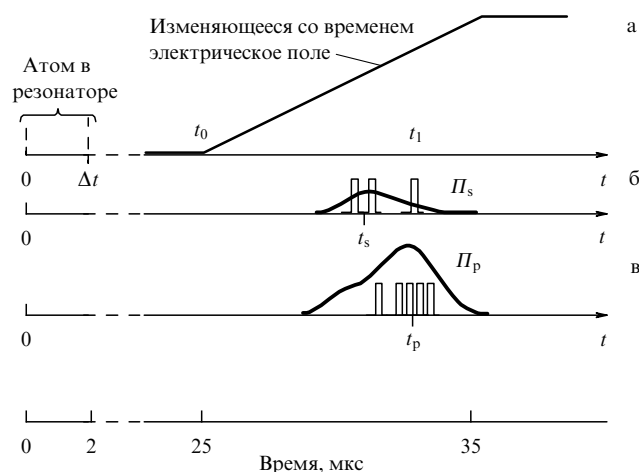
Мы провели несколько точных количественных исследований импульсных ридберговских мазеров, в особенности акцентируя внимание на эволюции атомного ансамбля в процессе излучения. Геометрия нашего эксперимента, где все атомы симметрично взаимодействовали с одним и тем же полем, позволила создать идеальный сверхизлучающий образец, систему, которую Р. Дике (R. Dicke) теоретически изучал ещё в 1950 г. [18]: атомы, находящиеся изначально в полностью возбуждённом симметричном состоянии, в результате обмена между атомами оставались в этом состоянии на протяжении процесса излучения, что приводило к конечному состоянию, в котором все атомы находились на нижнем уровне перехода. Данная симметрия вызвала сильное коллективное взаимодействие атомов и поля и время излучения стало гораздо короче времени спонтанного излучения одиночного атома. Наш эксперимент позволял измерять это уменьшенное время излучения и изучать полную динамику процесса излучения. Набирая статистику из большого числа экспериментов, проведённых с числом  $N$  изначально возбуждённых атомов, мы построили зависимость от времени вероятности того, что  $n$  из этих атомов перешло в нижнее состояние и, следовательно,  $n$  фотонов было излучено (рис. 5). Это стало первой количественной экспериментальной демонстрацией сверхизлучения Дике [19, 20].

Мы также показали, что если число распавшихся атомов превышало некоторый предел, то излучение приобретало периодический характер, часть атомного ансамбля заново возбуждалась и испытывала затухающие осцилляции, обмениваясь энергией с полем в резонаторе [21]. Этот осциллирующий режим сверхизлучения описывается уравнением, подобным тому, которое описывает затухающий маятник [22]. В другом наборе экспериментов мы также изучали обратный эффект, а именно, коллективное поглощение излучения чёрного тела ридберговскими атомами, которые были изначально приготовлены в нижнем состоянии атомного перехода, находящегося в резонансе с полем резонатора. В этом процессе атомы коллективно вели себя как ан-



**Рис. 5.** Экспериментальная демонстрация сверхизлучения Дике: гистограммы показывают вероятность того, что выборка из  $N = 3200$  изначально возбуждённых атомов излучила  $n$  фотонов в последовательные моменты времени, время увеличивается снизу вверх. Время выражено в единицах  $t_D$  (средняя задержка испускания). Кривые являются теоретическими (перепечатано с разрешения [19], ©American Physical Society; аннотация онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v49/i26/p1924.1>).

самбль бозонов, остававшийся в возбуждённом состоянии при обмене между частицами. Это приводило к тому, что теплоёмкость нашей атомной системы была гораздо меньше теплоёмкости классического газа [23]. Между прочим, симметричные состояния, в которых происходила эволюция атомного ансамбля, в данных экспериментах были сильно перепутаны, т.е. не описывались как произведение волновых функций отдельных атомов. Мы чётко осознавали эту особенность, несмотря на то что концепция перепутанности и всё, что к ней относилось, не вызывали тогда особого интереса.



**Рис. 6.** Усиление спонтанного излучения в резонаторе. Показаны экспериментальные временные зависимости: (а) изменения ионизирующего поля, (б) детектирования начального уровня 23S, (в) детектирования конечного уровня 22P (перепечатано с разрешения [25], ©American Physical Society; аннотация онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v50/i24/p1903.1>).

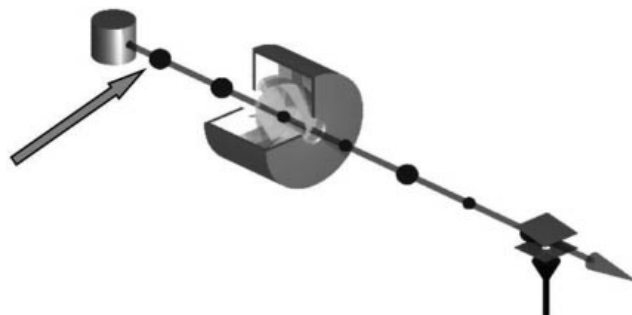
На протяжении этих исследований мы не забывали о нашей исходной цели, которая состояла в уменьшении порога возбуждения наших мазеров до одного атома. Чтобы увеличить коэффициенты отражения наших зеркал, мы заменили медь на сверхпроводящий ниобий, охлажденный до нескольких кельвинов. Сильно уменьшив таким образом потери на поглощение в зеркалах, мы смогли в 1983 г. добиться того, что вероятность спонтанного излучения одиночного атома при наличии резонатора увеличивалась (рис. 6). Этот эффект, предсказанный в 1946 г. Э. Пурселлом (E. Purcell) [24], соответствовал, как мы отметили, работе временного мазера на одиночном атоме [25]. Примерно в то же время Даниэль Клеппнер и его студенты провели схожий эксперимент, который он предложил несколькими годами ранее [26]. Они показали, что процесс спонтанного излучения ридберговских атомов тормозился, когда атомы находились между проводящими пластинами, подавлявшими радиационные моды, находившиеся в резонансе с атомным переходом, а это приводило к увеличению времени жизни возбужденного состояния [27]. Другая демонстрация замедления спонтанного излучения была представлена на несколько месяцев ранее Г. Габриельсом (G. Gabrielse) и Х. Демельтом (H. Dehmelt), которые показали затухание циклотронного излучения, когда электрон находился в микроволновом резонаторе, образованном электродами ловушки, в которой его удерживали [28].

Одна особенность в нашем эксперименте по усилению спонтанного излучения меня заинтриговала. Что произойдет, если добротность резонатора будет такой большой, что излученный фотон будет удерживаться в нём до тех пор, пока его не поглотят атомы? Как я отметил в тексте лекций по курсу, который я вёл в Лез Уш (Les Houches) в 1982 г. [29], это привело бы к режиму обратимого обмена энергией между материей и излучением на масштабах отдельных частиц. Если атом в начальный момент (в момент времени  $t = 0$ ) находился на уровне  $e$ , а резонатор — в вакуумном состоянии, мы

ожидали, в соответствии с моделью Джейнса–Каммингса, что система атом + поле к моменту времени  $t$  эволюционирует в состояние  $\cos(\Omega_0 t/2)|e, 0\rangle + \sin(\Omega_0 t/2)|g, 1\rangle$ , где  $\Omega_0$  — так называемая вакуумная частота Раби, а два символа в каждом кете обозначают состояние атома и количество фотонов в резонаторе соответственно. Если в резонаторе находилось  $n$  фотонов, ожидалось появление похожего эффекта с осцилляциями между состояниями  $|e, n\rangle$  и  $|g, n+1\rangle$  на большей частоте  $\Omega_n = \Omega_0 \sqrt{n+1}$ . Если поле в резонаторе находилось в суперпозиции состояний с разным числом фотонов, мы ожидали появления в этих Раби-осцилляциях биений между компонентами на различных частотах  $\Omega\sqrt{n+1}$ , этот эффект был предсказан теоретически Эберли (Eberly) и др. [30], и наблюдать его мы смогли только в 1996 г., о чём рассказано выше. В начале 1980-х гг. наблюдение данного эффекта, называемого сейчас режимом сильного взаимодействия в КЭД резонаторов, стало нашим святым Граалем.

Тем не менее мы были в замешательстве и не знали, как улучшить качество наших зеркал. Со сверхпроводящим материалом всё было в порядке, но механические свойства ниобия затрудняли получение достаточно гладких поверхностей, таких чтобы исключить рассеяние фотонов на малых неоднородностях. Пока мы боролись с этой технической проблемой, в 1984 г. до нас дошли новости из Мюнхена о том, что наш немецкий коллега Герберт Вальтер (Herbert Walther), работая со своим студентом-дипломником Дитером Мешедом (Dieter Meschede), а также с коллегой и экспертом по сверхпроводимости Г. Мюллером (G. Muller), нашли наш святой Грааль! Их блестящая идея состояла в том, чтобы заменить структуру открытых зеркал на закрытый цилиндр, это делало резонатор невосприимчивым к неоднородностям на внутренних стенках и приводило к тому, что время жизни фотонов увеличивалось на несколько порядков.

Посылая ридберговские атомы один за другим через этот ящик, они получили мазер, в котором поле формировалось в стационарном состоянии после последовательных взаимодействий с атомами, один за другим пролетающими через резонатор [31] (рис. 7). Система явно работала в режиме сильного взаимодействия. Вальтер назвал эту систему "микромазером". Многочисленные исследования этого прибора были проведены в 1980-х и 1990-х гг. — как теоретические, так и экспериментальные



**Рис. 7.** Схема мюнхенского микромазера: атомы, возбуждённые лазером в ридберговское состояние (стрелка слева), один за другим пролетают через цилиндрический сверхпроводящий резонатор перед детектированием ионизацией (справа).

[32–34]. Герберт Вальтер, который, к несчастью, умер в 2006 г., был выдающимся лидером в квантовой оптике, его микромазер стал существенным вкладом в КЭД резонаторов. Дитер Мешедер стал моим постдоком в 1980-х гг., когда я некоторое время работал по совместительству в Йельском университете (Yale University). Теперь он занимает должность профессора физики в Бонне (Германия), проводя красивые эксперименты в области физики холодных атомов и квантовой информации. Наши группы в ENS и Бонне обменивались идеями и приглашали друг к другу студентов и постдоков на протяжении многих лет.

Во время нашей работы в Йеле Дитер и я, вместе с Эдвардом Хиндсом (Edward Hinds), Луиджи Мои (Luigi Moi) и нашими студентами, провели эксперимент, демонстрирующий подавление спонтанного излучения атома при пролёте между двумя зеркалами, разнесёнными на расстояние меньше половины длины волны излучающего перехода [35]. Этот эксперимент, проведённый в 1986 г., был частью кандидатской работы Вон Же (Won Jhe), блестящего корейского студента, который теперь стал профессором в Сеуле. Это было переносом на оптический диапазон предшествовавшего эксперимента Клеппнера, проведённого в микроволновой области с ридберговскими атомами [27]. В то же время моя группа в ENS в Париже сделала вклад в изучение микромазеров, собрав в 1987 г. двухфотонный мазер на ридберговских атомах, работавший с закрытым цилиндрическим резонатором, в котором кванты света излучались парами [36] (аналогичные двухфотонные лазеры были созданы несколькими годами ранее [37]). Двухфотонный ридберговский мазер был темой кандидатской работы Мишеля Бруна (Michel Brune), выдающегося студента, который, к счастью, и сейчас остаётся нашим коллегой.

Во время этих экспериментов, наблюдая за успехом мюнхенской группы, мы были обеспокоены тем, что используемые нами резонаторы с открытыми зеркалами завели нас в тупик. Тем не менее мы не очень хотели окончательно переходить к использованию закрытых резонаторов, так как они усложняли эксперименты, которые мы планировали провести: атомы должны были влетать и вылетать через малые отверстия, пролетая вблизи металлических поверхностей, создававших паразитные электрические поля. Сближение с металлом сильно возмущало исключительно чувствительные ридберговские атомы, особенно когда они приготавливались в суперпозиции состояний. Паразитные поля сильно влияли на фазу суперпозиции, и становилось невозможным легко управлять квантовыми состояниями атомов и поля. Альтернативой было придерживаться системы с резонаторами с открытыми зеркалами, в которой атомы не пролетали вблизи металлических поверхностей, но тогда нам было необходимо сделать поверхность достаточно гладкой. Нам потребовалось около двадцати лет, чтобы постепенно решить эту проблему и осуществить эксперименты по управлению и манипулированию фотонами, результаты которых получили признание нобелевского комитета. Чтобы их описать, я откажусь от исторического подхода и буду использовать более дидактический метод. Описание ранних достижений в КЭД резонаторов можно найти в статье журнала *Physics Today*, написанной в соавторстве с Даниэлем Клеппнером в 1989 г. [38].

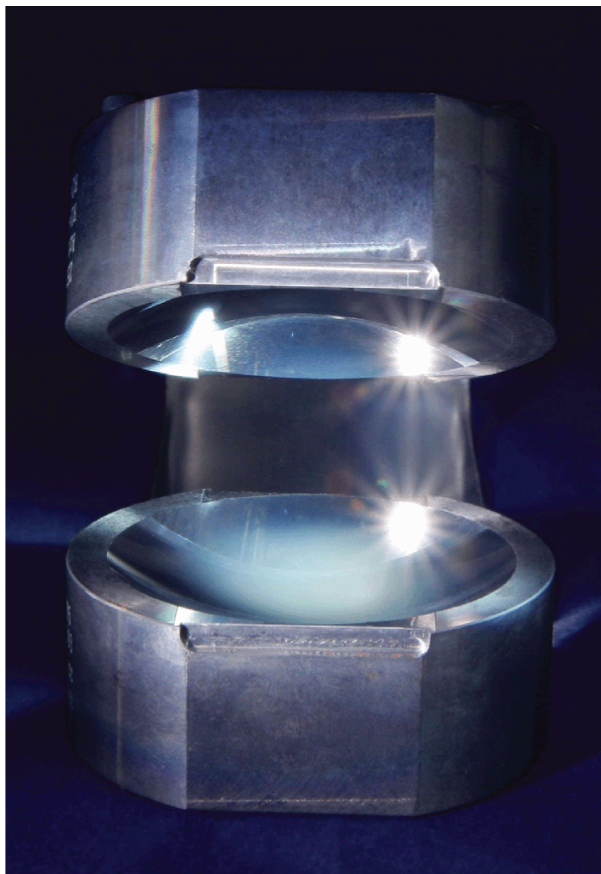
#### **4. Счёт фотонов без их уничтожения: новый фотонный ящик и циркулярные ридберговские атомы**

Нашей целью в конце 1980-х гг. стала генерация фотонов в высокодобротном резонаторе, а также наблюдение и управление этими фотонами без их уничтожения. Чтобы совершить этот прорыв, мы должны были преодолеть определённую сложность: как правило, детектирование света относится к "посмертному" ("postmortem") типу процедуры, о котором говорит Шрёдингер в цитате, приведённой в первой части лекции. Когда вы видите свет, фотоны, которые попадают в ваш глаз, вашу камеру или ваш фотодетектор, преобразуются в результате фотоэлектрического эффекта в электроны или в некое подобие электрического тока, и во время этого процесса фотон уничтожается. Эта ситуация не слишком отличается от сильных столкновений, происходящих в камере Вильсона или ускорителе частиц. Наблюдение света сводится к сбору осколков фотонов, столкнувшихся с фоточувствительной поверхностью. Если вы наблюдаете отсчёт в вашем счётчике фотонов, то фотона больше нет и его заменил вакуум, нуль фотонов вместо одного!

Мы искали процесс, при котором отсчёт в нашем невозмущающем детекторе оставлял бы фотон нетронутым, позволяя повторять измерение с тем же фотоном снова и снова. Идея подобного квантового невозмущающего измерения (QND) была предложена для механических резонаторов В. Брагинским и коллегами в 1970-х гг. [39] в контексте детектирования гравитационных волн. Мы должны были только адаптировать этот метод к случаю детектирования кванта света. Для этих целей был необходим особый тип атомного детектора, который был бы прозрачен для излучения, но в то же время достаточно чувствителен, чтобы регистрировать след одиночного фотона. И мы также нуждались в очень хорошем фотонном ящике, открытой структуре, очень долгое время хранящей фотоны, которая позволит нам повторять измерение снова и снова с последовательными атомами, пролетающими через ящик по очереди. Это привело нас обратно к фотонному ящику Эйнштейна – Бора, но в радикально новом контексте.

Ящик, который мы придумали, не похож на тот, который Бор нарисовал 85 лет назад, но, что достаточно интересно, он действительно связан с совершенно особенными часами, как будет показано ниже. Решение проблемы дефектов резонатора, которая беспокоила нас в 1980-х гг., было найдено путём последовательных улучшений. Сначала нам удалось увеличить время жизни фотона от нескольких сотен микросекунд до миллисекундного диапазона, окружив ниобиевые зеркала аллюминиевым кольцом, которое отражало свет, рассеянный на неоднородностях зеркал, обратно в резонатор. Но настоящим прорывом стал результат сотрудничества с исследовательским центром Французского комитета по атомной энергии (CEA) в Сакле (Saclay). Они разрабатывали сверхпроводящие резонаторы для экспериментов с ускорителями частиц и были экспертами в области производства высокодобротных микроволновых резонаторов, хотя они и работали на частотах (около 50 ГГц), меньших тех, которые использовали мы. С их помощью мы в итоге сделали зеркала из меди, которую можно обрабатывать на станке с высокой точностью, достигая

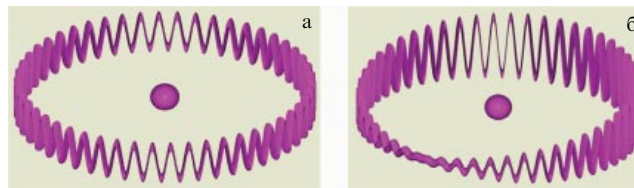




**Рис. 8.** (В цвете онлайн.) Фотонный ящик ENS (фотография Мишеля Бруне). Зеркала имеют диаметр 5 см и находятся на расстоянии 2,7 см (для наглядности на этой фотографии они разведены больше, чем в реальной экспериментальной установке).

шероховатости поверхности в несколько нанометров, и напылили тонкий слой ниобия на их поверхность. Сочетая таким образом точную геометрию и высокую электрическую проводимость, мы получили зеркала с квазисферическими поверхностями и, совершенствуя нашу технологию, последовательно повышали точность этих зеркал так, что мы больше не нуждались в алюминиевом кольце вокруг них. В 2006 г. мы достигли времени жизни 130 миллисекунд [40] с полностью открытой структурой резонатора (рис. 8). Фотоны пролетают по замкнутой траектории между зеркалами более 40000 км и живут достаточно долго, чтобы тысячи атомов, пролетающих через резонатор, могли один за другим с ними взаимодействовать.

Чтобы зондировать фотоны, мы посылали через резонатор особый вид ридберговских атомов, называемый "циркулярным". В атомах такого вида электрон находится на орбитали, представляющей собой окружность большого диаметра, примерно в 1000 раз большего, чем размер обычного атома в основном состоянии. Эти возбуждённые атомы рубидия готовятся с использованием лазеров и радиочастотного возбуждения с помощью модифицированного варианта [41] процедуры, изобретённой Даниэлем Клеппнером и Рэнди Хулетом (Randy Hulet) в MIT в 1983 г. [42]. Согласно квантовой теории, ридберговский электрон на орбитали является также волной, имеющей длину волны де Бройля, и для стабильной орбитали должно выполняться



**Рис. 9.** (В цвете онлайн.) Изображение электронных волн циркулярного ридберговского атома: (а) в энергетическом состоянии волна де Бройля электрона обладает одинаковой амплитудой вдоль круговой границы, приводя к нулевому электрическому дипольному моменту; (б) в суперпозиции соседних циркулярных ридберговских состояний волны де Бройля конструктивно интерферируют с одной стороны орбитали и деструктивно — с другой, представляя собой электрический диполь, вращающийся в плоскости орбитали.

условие, что на её длине укладывается целое число таких длин волн. Это число, называемое главным квантовым числом ридберговского атома, равняется 51 и 50 в наших экспериментах (эти ридберговские состояния мы дальше обозначим как  $e$  и  $g$  соответственно). Преимущество этих циркулярных ридберговских состояний с максимальным угловым моментом над состояниями с малым угловым моментом, которые мы использовали в предыдущих экспериментах, состояло в их очень большом времени жизни, порядка 30 миллисекунд для состояний с главным квантовым числом, равным 50 или 51. Такое время жизни с тем же порядком величины, что и время жизни фотонов в нашем резонаторе, позволяет нам пренебречь в первом приближении процессами атомного распада на протяжении времени взаимодействия между атомами и полем резонатора.

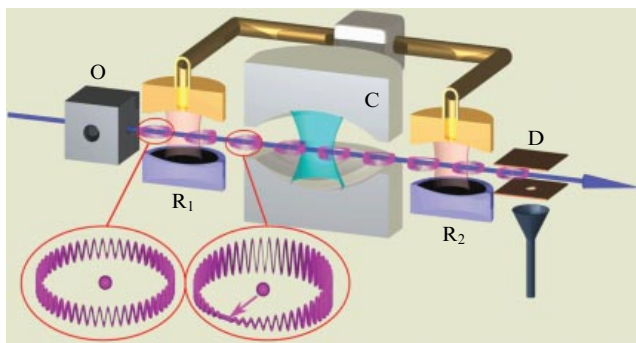
В ридберговских состояниях  $e$  и  $g$  циркулирующая волна де Бройля имеет постоянную амплитуду, и среднее распределение плотности электронного заряда симметрично относительно атомного ядра. В результате электрический дипольный момент атома равен нулю (рис. 9а). Чтобы навести электрический дипольный момент, можно подействовать на атом резонансным микроволновым импульсом, переводя его в суперпозицию соседних состояний  $e$  и  $g$ , имеющих соответственно 51 и 50 узлов в волновой функции. Такую суперпозицию состояний можно рассматривать как "кота Шрёдингера". Действительно, в этом случае атом одновременно находится на двух уровнях, напоминая нам об известном коте, которого Шрёдингер представлял растянутым между жизнью и смертью. Правильнее было назвать это состояние "котёнком Шрёдингера", так как оно образовано одиночным атомом и поэтому очень мало. Две волны де Бройля, формирующие этого "котёнка", интерферируют конструктивно с одной стороны орбитали и деструктивно — с другой стороны, образуя электрический диполь, вращающийся в плоскости орбитали с частотой 51 ГГц (рис. 9б). Этот диполь ведёт себя как вращающаяся антенна, исключительно чувствительная к микроволновому излучению. Его также можно представить как стрелку часов, тикающих с частотой 51 ГГц.

Когда микроволновое излучение, отстроенное от частоты перехода между состояниями  $e$  и  $g$ , падает на атом, оно не может быть им поглощено, и поэтому фотоны остаются неповреждёнными, обуславливая необходимый в наших экспериментах невозмущающий характер измерений. Тем не менее действие этого нерезонансного излучения сказывается в небольшом сдвиге атомных



энергетических уровней и, следовательно, в изменении частоты вращения атомного диполя, стрелки наших часов. Этот эффект светового сдвига был открыт в 1961 г. Клодом Коэн-Таннуджи в его основополагающих исследованиях с оптической накачкой [43]. Световые сдвиги пропорциональны энергии поля, т.е. числу фотонов. Поскольку они обратно пропорциональны отстройке частот атома и поля, их можно максимизировать, настраивая резонатор достаточно близко к резонансу (как правило, 100 кГц от частоты перехода атома в наших экспериментах), но при этом достаточно далеко от него, чтобы исключить любые процессы поглощения или излучения фотонов. Этот эффект становится в случае ридберговских атомов очень сильным, и фазовый сдвиг атомного диполя после пролёта атома через резонатор может достигать значений  $180^\circ$ : диполь разворачивается в противоположном направлении, когда число фотонов изменяется на единицу. Измерение этого фазового сдвига соответствует счёту числа фотонов без разрушения квантов света. Я отмечу также, что эти световые сдвиги играют основную роль в других экспериментах атомной физики и квантовой оптики. На них основываются методы помещения атомов в ловушки и охлаждения их лазерным излучением, за которые в 1997 г. Клод Коэн-Таннуджи, Уильям Филлипс (William Phillips) и Стивен Чу (Steven Chu) получили Нобелевскую премию [44–46].

Чтобы измерять эти сдвиги, мы использовали схему, предложенную нами в 1990 г. [47]. Мы построили атомный интерферометр вокруг нашего резонатора, хранящего фотоны (рис. 10). Атомы, приготовленные в циркулярном состоянии в ящике О, пересекают резонатор С

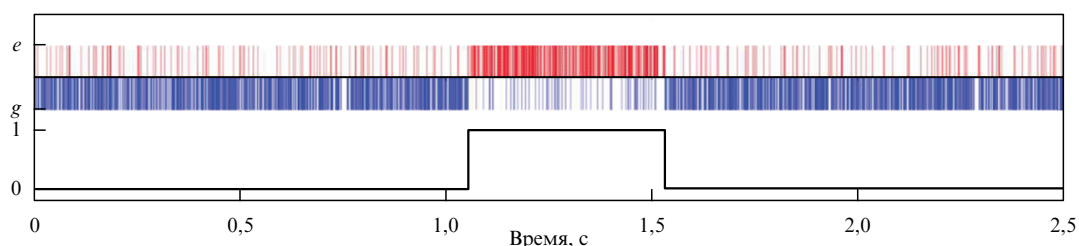


**Рис. 10.** (В цвете онлайн.) КЭД резонатор с интерферометром Рамзея. На вставках показаны изображения циркулярного атома в энергетическом состоянии (слева) и в суперпозиции состояний после взаимодействия с микроволновым импульсом в  $R_1$  (справа). (Перепечатано с разрешения [49], ©American Physical Society).

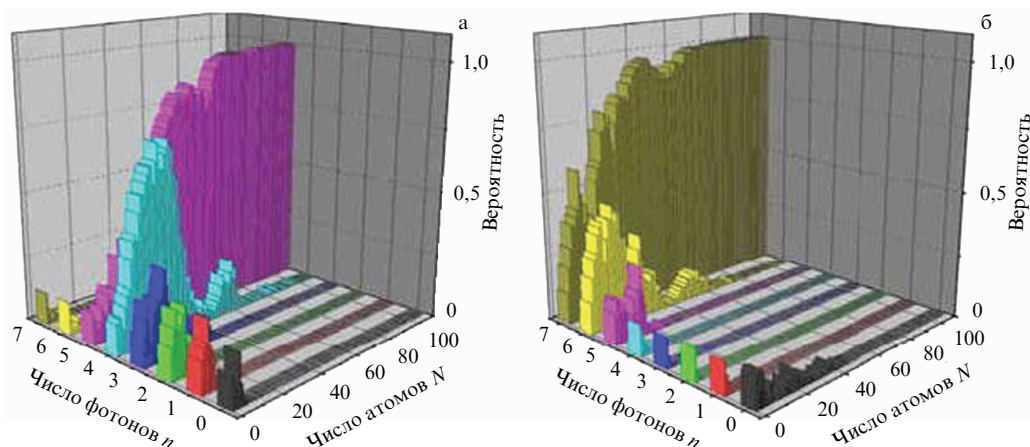
один за другим и детектируются за счёт ионизации полем в D. Неотъемлемой частью установки были дополнительные микроволновые области  $R_1$  и  $R_2$  по обе стороны от резонатора С. В первой области  $R_1$  атомы приготавливаются в суперпозиции состояний  $e$  и  $g$ , в состоянии "котёнка Шрёдингера". Эту процедуру можно соотнести с запуском секундомера, который задаёт начальное направление атомному диполу, т.е. стрелке часов. Атомный диполь затем, вращаясь, пролетает через резонатор, и вторая вспышка микроволнового излучения в области  $R_2$  используется для детектирования направления атомного диполя на выходе из резонатора — таким образом измеряется фаза, приобретённая часами.

Комбинация двух разделённых микроволновых резонаторов  $R_1$  и  $R_2$  известна как интерферометр Рамзея. Это устройство было изобретено в 1949 г. Норманом Рамзеем (Norman Ramsey) [48] (который позже стал научным руководителем кандидатской работы Дэвида Вайнленда). Метод разнесённых осциллирующих полей теперь используется во всех атомных часах, работающих на микроволновом переходе сверхтонкой структуры атомных уровней. Возбуждение двумя последовательными импульсами вызывает синусоидальное изменение вероятности перехода, когда частота микроволнового излучения сканируется вблизи резонанса. Этот так называемый сигнал "полос Рамзея" ("Ramsey fringe") используется для настройки микроволнового излучения на частоту атомного перехода. В наших экспериментах интерферометр Рамзея считает фотоны, детектируя возмущение, которое они вносят в полосы специальных атомных часов, сделанных из чувствительных к микроволновому излучению ридберговских атомов [49]. Если сдвиг фазы, вносимый одним фотоном, задать равным  $180^\circ$ , то полосы Рамзея смещаются на полпериода, когда количество фотонов изменяется на единицу. Если в резонаторе находится один фотон, то максимум полосы интерферометра будет соответствовать атому в состоянии  $e$ . Второй импульс затем переводит суперпозицию состояний атома, возбуждающего резонатор С, либо в состояние  $e$  (если в резонаторе 1 фотон), либо в состояние  $g$  (если в резонаторе 0 фотонов), и это состояние затем фиксируется детектором ионизации поля. Поэтому в итоге конечное состояние  $g$  или  $e$  коррелирует с числом фотонов, 0 или 1.

На рисунке 11 представлены отсчёты детектирования ( $g$  и  $e$  показаны соответственно синими и красными полосами) во время того, как атомы пролетают через резонатор, охлаждённый до 0,8 К, в котором, согласно формуле Планка, находится вакуум (95 % времени) или один фотон (5 % времени) [50]. Чётко виден момент, когда фотон возникает в резонаторе, остаётся в нём



**Рис. 11.** (В цвете онлайн.) Квантовое невозмущающее детектирование одиночного фотона: последовательность измерений с одиночными атомами (верхняя зависимость) фиксирует внезапное изменение числа фотонов (нижняя зависимость), демонстрируя рождение, жизнь и смерть одиночного кванта света (перепечатано с разрешения [50], ©Macmillan Publishers Ltd).



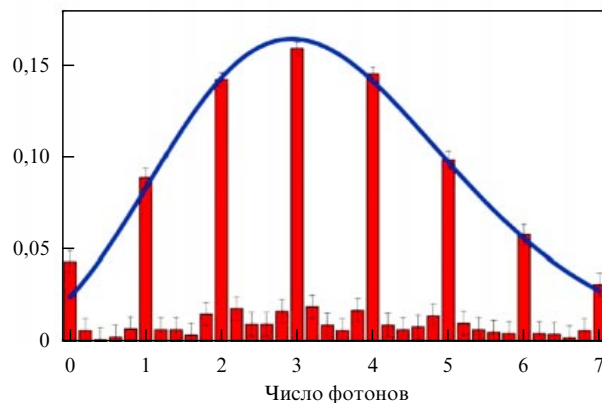
**Рис. 12.** (В цвете онлайн.) Процесс коллапсирования состояния поля, вызванный квантовым невозмущающим счётом фотонов: (а) эволюция вычисляемого распределения вероятностей числа фотонов с увеличением числа детектированных атомов в эксперименте с конечным фоковским состоянием с  $n = 5$ ; (б) эволюция того же распределения в эксперименте с конечным состоянием с  $n = 7$  (перепечатано с разрешения [52], ©Macmillan Publishers Ltd).

какое-то время, а затем исчезает. Из-за шумов и дефектов корреляция между числом фотонов и атомным сигналом не идеальна, но, используя простой метод сравнения числа отсчётов, можно однозначно восстановить зависимость числа фотонов (нижний график на рисунке). Внезапное изменение числа фотонов представляет собой квантовый скачок, явление, предсказанное много лет назад квантовой теорией и наблюдавшееся в 1980-х гг. на ионах в ловушках, как описано в лекции Дэвида Вайнленда. У нас этот эффект наблюдался впервые для квантов света. На рисунке также видно, что сотни атомов чувствуют присутствие одного и того же фотона между двумя квантовыми скачками — из этого следует, что наш метод детектирования является квантовым невозмущающим для поля. Заметим, что эти скачки осцилляций поля имеют сильное сходство с квантовыми скачками между состояниями циклотронного движения одиночного электрона, которые также наблюдаются при помощи схемы квантового невозмущающего измерения [51].

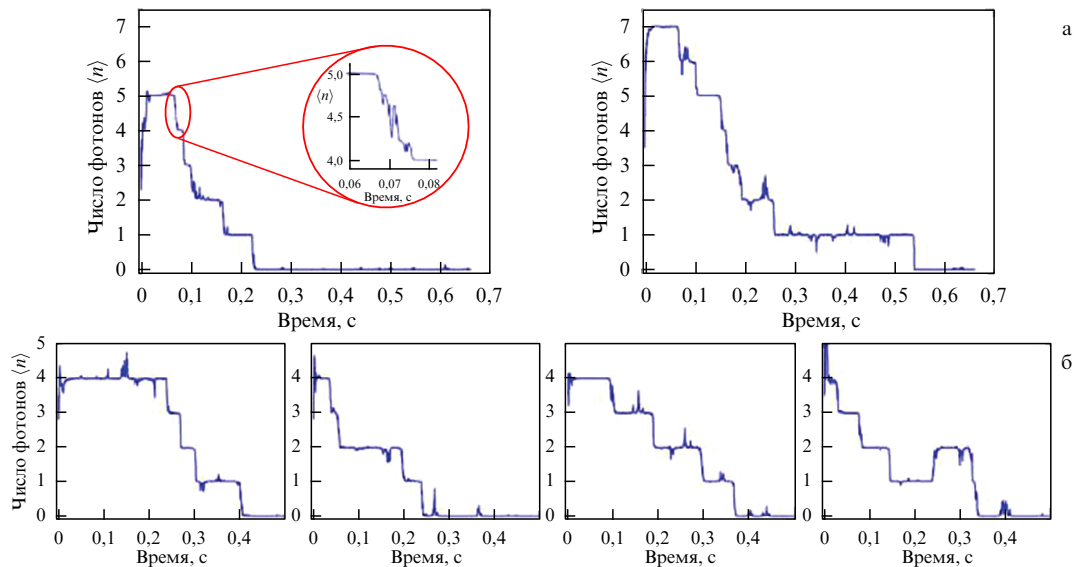
Наш метод счёта фотонов может быть использован и для счёта большого числа квантов [52]. Сначала мы создаём в резонаторе слабое когерентное поле, суперпозицию состояний с числом фотонов между 0 и 7. Такое поле появляется из-за рассеяния на краях зеркал резонатора микроволнового импульса, излучённого классическим источником. Это приводит к захвату нескольких фотонов, которые остаются между зеркалами долгое время после выключения источника. Затем нам необходимо лишь послать через резонатор последовательность атомов, каждый из которых будет считывать бит информации о поле. Сдвиг фазы, вносимый одним фотоном, оптимально настроить на такую величину, чтобы различное число фотонов соответствовало хорошо различимым направлениям диполя атома на выходе из резонатора. В начале эксперимента мы ничего не знаем о числе фотонов и предполагаем равное распределение вероятности, как показано на гистограммах в левых частях рис. 12а и 12б, присваивая одинаковые значения вероятностям иметь от 0 до 7 фотонов в резонаторе. Считывая информацию с каждого следующего атома, мы уточняем наше знание о поле в резонаторе и в итоге выделяем определённое число фотонов (гистограммы с одним пиком в правых частях

рис. 12а и 12б соответствуют числу фотонов  $n = 5$  и 7 соответственно).

Для уточнения распределения вероятности использовался байесовский метод, детально разработанный в [4]: измерение с каждым атомом даёт информацию о направлении атомного диполя и позволяет нам обновить наше знание о распределении вероятности числа фотонов. Можно сказать, что в этом эксперименте в режиме реального времени наблюдается "коллапс волновой функции", индуцированный измерением и представляющий собой в данном случае последовательный процесс преобразования равномерно распределённой гистограммы в одиночный пик. Поле, находящееся изначально в суперпозиции состояний с разным числом фотонов, простым сбором информации проецируется на состояние с фиксированным числом фотонов, так называемое фоковское состояние с чётко определённой энергией. Этот процесс является случайным, что видно из двух реализаций измерений на рис. 12а и 12б, дающих разный результат. Набор статистики большого числа измерений позволяет восстановить распределение вероятности числа фотонов в начальном состоянии (рис. 13). Оно описывается распределением Пуассона, что и следует ожидать для



**Рис. 13.** (В цвете онлайн.) Распределение числа фотонов когерентного состояния со средним числом фотонов 3,4, восстановленного с помощью статистического анализа 3000 циклов квантовых невозмущающих измерений (перепечатано с разрешения [52], ©Macmillan Publishers Ltd).



**Рис. 14.** Квантовые скачки поля, зарегистрированные квантовым невозмущающим счётчиком фотонов: (а) Эволюция числа фотонов после коллапсирования в состояние с  $n = 5$  (слева) и  $n = 7$  (справа). На вставке с увеличенным масштабом показано, что для регистрации квантового скачка необходимо детектирование нескольких атомов на протяжении времени в несколько миллисекунд. (б) Четыре случайные "траектории" числа фотонов, следующие за коллапсированием в состояние  $n = 4$ . Зависимость справа имеет скачок вверх, соответствующий временному появлению теплового фотона в резонаторе (охлаждённом до 0,8 К) (перепечатано с разрешения [52], © Macmillan Publishers Ltd).

когерентного состояния, приготовленного классическим источником излучения [53].

Как только выделяется определённое число фотонов, дальнейшую эволюцию состояния можно наблюдать, продолжив измерение с последующими атомами. Таким образом, мы видим последовательность квантовых скачков, неумолимо ведущую поле обратно к состоянию вакуума, что связано с потерями фотонов в стенках резонатора [52]. На рисунке 14 показаны зависимости для полей, содержащих в начальный момент времени разное число фотонов. Статистический анализ этих зависимостей позволил нам измерить время жизни фокковских состояний. Случайно флуктуируя от одного измерения к другому, время жизни состояния с числом фотонов  $n$  описывается экспоненциальным распределением вероятности с временной константой  $T_c/n$ , где  $T_c$  — время затухания энергии поля в резонаторе [54]. Изменение времени жизни, пропорциональное  $1/n$ , показывает, что эти неклассические состояния излучения становятся всё более "хрупкими" при увеличении их энергии. Такой же особенностью обладают состояния света типа кота Шрёдингера (см. ниже).

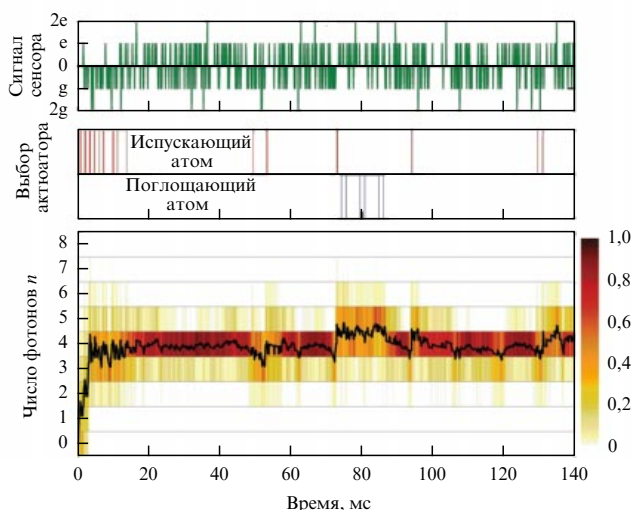
## 5. Квантовая обратная связь

Возможность проводить измерения над квантовой системой без её разрушения позволяет нам, согласно результату измерения, влиять на неё и направлять её эволюцию в сторону желаемого состояния. Вскоре после успешного проведения наших экспериментов по квантовому невозмущающему счёту фотонов мы предложили эту стратегию квантовой обратной связи, чтобы "приручить" квантовое поле, приготовляя и удерживая его в заранее заданном фокковском состоянии на протяжении произвольного промежутка времени [55]. Затем мы реализовали две схемы данного эксперимента [56, 57]. Интерферометр Рамзея, работающий как квантовый невозмущающий счётчик фотонов, используется как сенсор,

передающий информацию компьютеру, который оценивает состояние поля в реальном времени и решает, какое обратное воздействие нужно оказать на поле, чтобы направить его в сторону "запланированного" фокковского состояния. Как только это состояние достигается, схема отслеживает квантовые скачки и немедленно устраняет их последствия, переводя систему обратно в заданное состояние. Этот метод аналогичен жонглированию. Жонглер смотрит на шары и хочет, чтобы они перемещались по идеальным траекториям. Его глаза — это сенсоры, а визуальная информация, обрабатываемая его мозгом, используется для корректировки движений его рук, актюаторов. В квантовом случае роль классических шаров играют фотоны, прыгающие между зеркалами. Квантовый глаз — это интерферометр Рамзея, оповещающий компьютерный "мозг", который управляет экспериментом по состоянию поля.

Квантовому жонглеру необходимо решить проблему, которой нет в классической игре. Если наблюдение за шарами никак не сказывается на их движении, то сам факт наблюдения фотонов оказывает неминуемое обратное воздействие, согласно проекционному постулату в квантовой физике. Это обратное воздействие случайно, так как его последствия зависят от непредсказуемого результата измерений. Однако, как только детектируется атом, обратное воздействие на состояние поля определяется проецированием на состояние поля, соответствующее результату атомного измерения. Поэтому компьютер может обновлять состояние поля в режиме реального времени, основываясь на результатах последовательных измерений. На каждом шаге он определяет расстояние между реальным и запланированным состояниями и вычисляет величину воздействия, минимизирующего это расстояние. Как и в классической схеме с обратной связью, эта процедура реализуется по кругу, повторяя последовательности детектирования и корректировки, пока запланированное состояние не будет достигнуто. Затем этот процесс продолжается, чтобы





**Рис. 15.** (В цвете онлайн.) Стабилизация фоковского состояния с  $n = 4$  с использованием квантовой обратной связи. Верхний и средний графики показывают последовательность детектирования атомов-сенсоров и атомов-актюаторов (атом-сенсор, испускающий и поглощающий атомы обозначены зелёными, красными и синими полосами соответственно). На нижнем графике показана результирующая эволюция распределения числа фотонов, восстанавливаемая компьютером, управляющим экспериментом (вероятности показаны в цветовой схеме, обозначенной справа) (перепечатано с разрешения [57], ©American Physical Society; аннотация онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v108/i24/e243602>).

детектировать квантовые скачки и устранять их влияние.

Что играет роль "руки" в этой игре жонглирования? В одной из схем эксперимента [56] это микроволновый источник, периодически добавляющий слабые микроволновые поля в С, которые, в зависимости от их фазы, увеличивают или уменьшают амплитуду поля. В другой схеме [57] роль актюатора играют атомы, настроенные на точный резонанс с С. Они испускают (если они попадают в С в состоянии  $e$ ) или поглощают (если они попадают в С в состоянии  $g$ ) один фотон. Атомы-актюаторы относятся к тому же атомному пучку, что и атомы-сенсоры. Чтобы настроить их на резонанс во время этапа корректировки цикла обратной связи, отстройка между атомами и полем резонатора на протяжении этого этапа минимизируется, и импульсы Рамзея  $R_1$  и  $R_2$  не излучаются. Цикл обратной связи состоит из группы нескольких атомов-сенсоров и следующей за ней группы нескольких атомов-актюаторов. Сигналы квантовой обратной связи, соответствующие стабилизации атомным актюатором фоковского состояния с  $n = 4$ , показаны на рис. 15. В начальный момент времени резонатор находится в вакуумном состоянии и компьютер несколько раз отдаёт команду послать несколько излучающих атомов, чтобы создать поле, которое перестаёт увеличиваться, как только цель достигнута. Скачки фотонов, возникающие позже, корректируются излучающими атомами. Когда корректировка оказывается слишком сильной, используются поглощающие атомы. В среднем число фотонов стабилизируется с малыми остаточными флуктуациями около состояния с заданным числом  $n$ . Эти эксперименты открывают новые интересные возможности для контролируемого приготовления и защиты от декогеренции других неклассических состояний излучения.

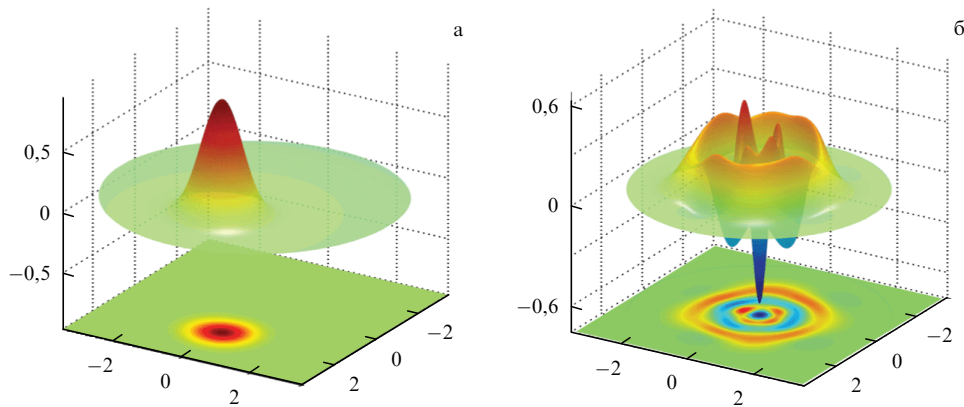
## 6. Восстановление состояния поля

Повторяя квантовые невозмущающие измерения одного и того же состояния, приготовленного много раз, мы смогли восстановить его распределение числа фотонов  $P(n)$ , которое в случае когерентного поля представляет собой функцию Пуассона, сосредоточенную около среднего числа фотонов состояния  $\langle n \rangle$  (см. рис. 13). Подобные гистограммы  $P(n)$  дают только часть информации о состоянии поля. Они описывают интенсивность света и её флуктуации и не чувствительны к когерентности полей. В общем случае состояние поля описывается матрицей плотности  $\rho$ , диагональные элементы которой  $\rho_{nn}$  в базисе фоковских состояний равны вероятностям  $P(n)$ , а недиагональные  $\rho_{nm}$  — описывают когерентность поля. Выражаясь в терминах числа фотонов, вероятности  $P(n)$  являются "одномерными" объектами, тогда как  $\rho_{nm}$  — "двумерными" величинами. Восстановление когерентности из измерений вероятностей числа фотонов, т.е. "переход от одномерности к двумерности" в представлении поля, аналогично переходу от двумерности к трёхмерности в фотографии.

Распределение вероятностей числа фотонов состояния поля действительно похоже на плоскую фотографию, полученную после записи интенсивности света, который был рассеян объектом в направлении объектива камеры. Чтобы увеличить размерность и полностью восстановить состояние, необходимо записать голограмму, добавив информацию о фазе к данным, полученным после регистрации интенсивности [58]. В фотографии это можно осуществить, наблюдая интерференцию рассеянного света и опорного пучка — малой частью, отведённой от основного лазерного пучка, освещающего объект. Интерференционная картина, записанная на голограмме, представляет собой преобразование Фурье объекта. При освещении голограммы лазерным пучком, аналогичным тому, при помощи которого она была записана, голограмма воспроизводит изображение объекта, производя обратное преобразование Фурье.

Аналогичным образом значения  $\rho_{nm}$  и полная "двумерная" информация, которую содержит квантовое состояние поля, могут быть восстановлены при помощи смещения этого поля с опорными полями разных фаз и амплитуд и восстановления распределения числа фотонов для результата интерференции этих полей. Эта процедура называется квантовой томографией [59]. В наших экспериментах по КЭД резонаторов для такого восстановления поля использовался интерферометр Рамзея с ридберговскими атомами [60]. Приготавливались идентичные копии поля и затем к ним примешивались опорные когерентные поля, излучённые классическим источником. После этого к результирующим "смешанным" полям применялся квантовый невозмущающий счёт фотонов. Данных, полученных после большого числа реализаций эксперимента с опорными полями различных фаз и амплитуд, становится достаточно для восстановления  $\rho$ .

Для описания состояния поля удобно использовать вместо  $\rho$  другой метод. Формально состояние поля эквивалентно состоянию механического осциллятора, движущегося в параболическом потенциале. Его состояние описывается вещественной функцией Вигнера [4, 61], определённой в фазовом пространстве осциллятора (координатами в этом пространстве являются положе-



**Рис. 16.** (В цвете онлайн.) Трёхмерное и двумерное изображения экспериментальной функции Вигнера: (а) когерентного состояния с  $\langle n \rangle = 2,5$ ; (б) фоковского состояния  $n = 3$  (перепечатано с разрешения [60], ©Macmillan Publishers Ltd).

ние  $x$  и импульс  $p$  воображаемого осциллятора, соответствующие "квадратурам поля"). Эта функция обобщает классическое описание при помощи распределения вероятности в фазовом пространстве на квантовый случай и содержит ту же информацию, что и  $\rho$ , с которой она связана преобразованием Фурье. Если продолжить аналогию с голограммой, функция Вигнера для матрицы плотности — это то же самое, что и голограмма для реального изображения объекта. Её интерференционная картина напрямую связана с основными особенностями квантового поля.

На рисунке 16 показаны функции Вигнера двух состояний поля, экспериментально восстановленные с помощью рамзеевской интерферометрии [60]. На рисунке 16а показана функция Вигнера когерентного состояния со средним числом фотонов  $\langle n \rangle = 2,5$ . Она имеет вид гауссова пика в центре фазового пространства, полярные координаты которого соответствуют амплитуде и фазе поля. Эта положительная функция, содержащая больше информации, чем распределение вероятности числа фотонов на рис. 13, может быть интерпретирована как классическое распределение вероятности в фазовом пространстве, а неопределённости  $p$  и  $x$  отражают флуктуации фазы и числа фотонов когерентного состояния. На рисунке 16б показана экспериментальная функция Вигнера фоковского состояния  $n = 3$ , приготовленного квантовым невозмущающим проективным измерением и затем восстановленного при помощи нашей процедуры квантовой томографии, модифицированной для КЭД резонаторов. Функция состоит из набора круговых волн, окружающих начало координат фазового пространства. Интерферирующие особенности, приобретающие отрицательные значения, являются отличительной чертой "квантовости" этого состояния. Симметричность функции Вигнера относительно начала координат говорит о полной неопределённости фазы фоковского состояния.

## 7. Состояния света типа "кот Шрёдингера" и исследование декогеренции

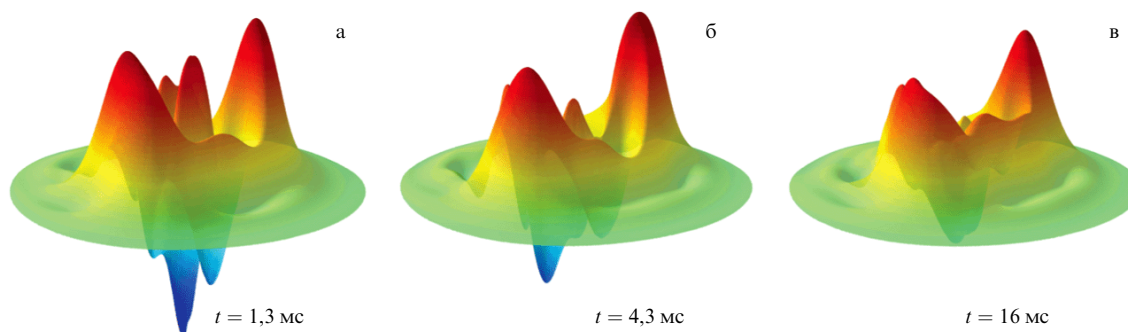
Описывая наши методы счёта фотонов в резонаторе и управления ими, я всё это время подчёркивал "корпускулярную природу" света. Тем не менее, как уже было упомянуто выше, свет также является волной. То, какие свойства света будут проявляться: волновые или корпус-

кулярные — зависит от типа эксперимента, который ставится над полем. Опишем теперь те эксперименты, в которых существенна волновая природа поля, находящегося в резонаторе. Это приведёт нас к описанию фотонных котов Шрёдингера и к экспериментам по декогеренции.

На этом этапе уместно вспомнить мысленный эксперимент Шрёдингера [62]. Австрийский физик вообразил большую систему, например кота, связанную с одиночным атомом, который был изначально приготовлен в возбуждённом состоянии и может спонтанно перейти в основное состояние, испустив фотон (или радиоактивную частицу). Этот фотон запускал смертельное устройство, убивавшее кота. После половины времени жизни возбуждённого состояния атом переходит в суперпозицию двух состояний, одно из которых соответствует мёртвому коту, а другое — живому (рис. 17). В этот момент атом и кот будут перепутаны, и кот будет растянут между жизнью и смертью. В нашей версии эксперимента атом находится в суперпозиции двух состояний и управляет судьбой когерентного поля, содержащего несколько фотонов (наш кот Шрёдингера), которое одновременно имеет две разные фазы; одну из них мы называем "живой", а другую — "мёртвой". Схема проведения этого эксперимента была изначально предложена в статье, написанной в 1991 г. совместно с нашими



**Рис. 17.** (В цвете онлайн.) Мысленный эксперимент с котом Шрёдингера (перепечатано из "Science et Vie Junior").



**Рис. 18.** (В цвете онлайн.) Кот Шрёдингера и декогеренция. (а) Реконструкция функции Вигнера состояния кота со средним числом фотонов  $n = 3,5$  через короткое время (1,3 мс) после его приготовления одиночным атомом, пролетающим через резонатор. (б) и (в) — то же состояние кота через 4,3 и 16 мс: исчезновение особенностей с интерферирующими полосами является признаком декогеренции (перепечатано с разрешения [49], ©American Physical Society).

бразильскими коллегами Луисом Давидовичем (Luiz Davidovich) и Нисимом Загури (Nicim Zagury) [63]. Схожее описание метода приготовления состояний света типа "кот Шрёдингера" в оптическом диапазоне было приведено ранее в другом контексте [64].

В нашей схеме мы снова используем интерферометр Рамзея. Сначала в резонаторе готовится когерентное поле с гауссовой функцией Вигнера (рис. 16а). Затем одиночный нерезонансный атом готовится в когерентной суперпозиции двух состояний — это, как я назвал его ранее, атомный "котёнок Шрёдингера". Этот атом пролетает через резонатор и две его компоненты сдвигают фазу поля в разных направлениях в результате простого эффекта дисперсии групповой скорости. Здесь мы снова пользуемся сильным взаимодействием ридберговских атомов и микроволн, благодаря которому влияния одного атома на показатель преломления оказывается достаточно для наблюдения макроскопических эффектов с фазой поля. На выходе из резонатора атом и поле становятся перепутанными, и каждое состояние атома коррелирует с состояниями разной фазы (в эксперименте, описанном ниже, разность фаз близка к  $135^\circ$ ). Можно представить, что поле, описываемое маленькой стрелкой в комплексной плоскости, — это прибор, измеряющий энергию атома. После воздействия второго рамзеевского импульса на атом и детектирования атома нет никакой возможности узнать, в каком состоянии атом пролетел через резонатор, и поле коллапсирует в суперпозицию кота Шрёдингера. Другими словами, атомный котёнок Шрёдингера приготовил фотонного кота Шрёдингера, который в среднем состоит из нескольких фотонов.

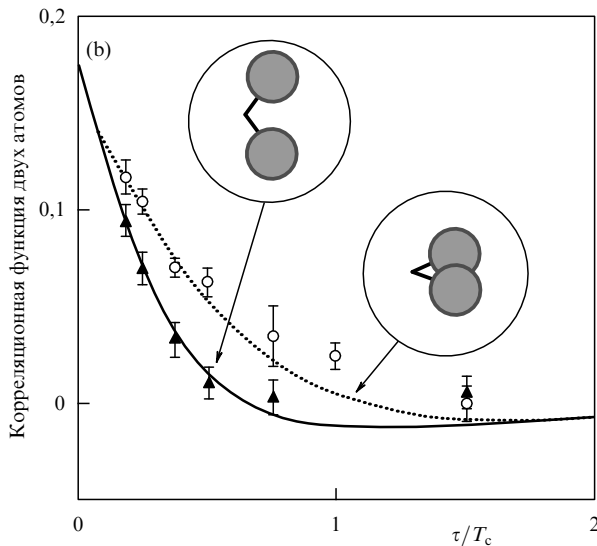
Последовательно посылая атомы в резонатор и проводя томографическое восстановление поля при помощи квантового невозмущающего счёта фотонов, мы смогли в 2008 г. полностью восстановить функцию Вигнера состояния кота Шрёдингера [60]. На рисунке 18а чётко видны два максимума, соответствующие двум классическим полям, находящимся в суперпозиции. Интерференционные полосы между этими максимумами говорят о когерентности суперпозиции. Отрицательные значения в этих полосах являются признаком "квантовости" состояния "кота". Теоретические расчёты показывают, что взаимодействие поля и окружающей среды очень быстро размывает квантовую когерентность кота, переводя его в обычную статистическую смесь состояний. В. Журек (W. Zurek) внёс большой вклад в объяс-

нение роли окружающей среды в этом процессе, который происходит тем быстрее, чем больше "размер" кота, равный квадрату расстояния между его компонентами в фазовом пространстве [65]. Для заданной разности фаз между гауссовыми компонентами этот размер пропорционален среднему числу фотонов кота.

Мы изучили этот эффект декогеренции, восстанавливая функцию Вигнера поля в разные моменты времени [60]. Рисунки 18б и 18в, на которых показан вид функции Вигнера, восстановленной в последовательные моменты времени после приготовления состояния кота Шрёдингера, демонстрируют процесс декогеренции. За время, значительно меньшее времени релаксации энергии 130 мс, интерференционные особенности состояния кота действительно подавляются и функция Вигнера становится суммой двух квазигауссовых пиков. Мы удостоверились в том, что скорость декогеренции пропорциональна размеру кота. Важно подчеркнуть, что регистрация состояния кота Шрёдингера, как и восстановление состояния поля, получены после большого числа реализаций эксперимента и обработки результатов с применением сложного статистического анализа [60]. Такая статистическая процедура всегда необходима для получения информации о квантовом состоянии, и эти эксперименты основываются на том, что мы можем готовить произвольное число копий состояния, которое мы хотим восстановить, и наблюдать за дальнейшей эволюцией каждой из этих копий.

Более ранняя схема этого эксперимента была реализована в 1996 г. с помощью резонатора со значительно меньшим временем затухания, порядка ста микросекунд [66]. Поскольку не было возможности послать последовательность атомов в резонатор до затухания его поля, эксперимент базировался на информации, которую сообщал одиночный зондирующий атом, следовавший за атомом, готовившим состояние кота. Вместо полного восстановления функции Вигнера мы использовали этот одиночный зондирующий атом, чтобы находить значение функции Вигнера в начале координат фазового пространства, где она очень чувствительна к когерентности кота. Сравнивая детектирующие сигналы первого атома, приготовившего кота, и второго, зондирующего когерентность кота, мы получали корреляционную функцию сигнала двух атомов, ширина которой в зависимости от задержки между атомами определяла степень квантовой когерентности кота как функцию времени. На рисунке 19 показаны эти зависимости для двух





**Рис. 19.** Наблюдение декогеренции в эксперименте с двумя атомами. Корреляционная функция построена в зависимости от задержки между атомом, приготавливающим "состояние кота", и атомом, зондирующим его когерентность. Эта задержка указана в единицах времени затухания поля в резонаторе  $T_c$  (равное 160 нс в этом эксперименте). Точки соответствуют эксперименту, кривые — теории. Две кривые соответствуют состояниям кота с различным расстоянием между их компонентами (как показано на вставках, схематически отображающих их гауссовы компоненты как круги). (Перепечатано с разрешения [66], ©American Physical Society; аннотация онлайн <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v77/i24/p4887.1>.)

состояний кота с разными расстояниями между его компонентами (как показано на вставках). Чётко демонстрируется уменьшение времени декогеренции с увеличением расстояния между компонентами.

Мы также приготовили состояния излучения типа кота Шрёдингера при помощи резонансного взаимодействия атома и поля [67, 68]. После некоторого времени взаимодействия поля с резонансным ридберговским атомом система атом–поле переходит в перепутанную суперпозицию состояний атома и поля, содержащую два когерентных поля с противоположными фазами. Эти две компоненты кота позже сливаются вместе. Данный эффект расщепления и рекомбинации фазы поля связан с исчезновением и возникновением эффекта осцилляций Раби [30]. Эксперименты с состоянием кота Шрёдингера в КЭД резонаторов показывают, что по мере роста числа частиц, составляющих квантовое состояние, квантовая когерентность этого состояния становится всё более и более неустойчивой. Эти эксперименты позволяют нам взглянуть на границу между квантовым миром, где постоянно встречаются суперпозиции состояний, и классическим миром, где системы ведут себя привычным классическим образом. Подробное изучение котов Шрёдингера в КЭД резонаторов вместе с обзором предложенных схем для приготовления различных котов Шрёдингера в квантовой оптике можно найти в книге "Exploring the quantum: atoms, cavities and photons" [4]. В этой книге также представлен подробный анализ декогеренции этих состояний.

## 8. Квантовая информация в КЭД резонаторов

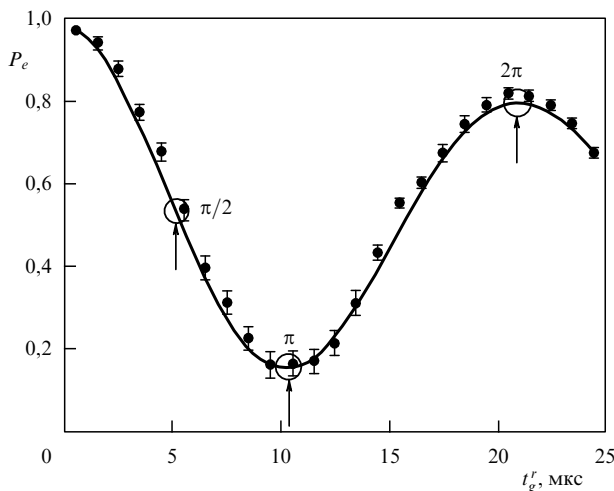
Эксперименты с ловушками для фотонов в ENS и для ионов в NIST показательны для очень широкой области

экспериментальной физики. Невозмущающее управление и манипулирование одиночными квантовыми частицами теперь осуществляется во многих лабораториях по всему миру и сильно мотивировано возможностью использовать эти системы в разработках новых методов обработки квантовой информации. Эта область исследований стала очень популярной в середине 1990-х гг., когда мы готовили наш эксперимент с фотонным ящиком, стремясь к невозмущающему счёту фотонов и управлению светом. Размышления Фейнмана о квантовых симуляторах [69] и схемы передачи криптографического ключа, основанные на квантовых законах [70, 71], относятся к 1980-м и ранним 1990-м гг., но в то время они не оказали влияния на нашу работу в ENS. Всё изменилось с появлением проекта квантовых компьютеров, работающих с кубитами из атомов или частиц света [72, 73], и с изобретением квантовых алгоритмов, определивших очевидное применение для таких компьютеров [74, 75].

Эти идеи созрели тогда, когда наша установка по КЭД резонаторов стала пригодной для их тестирования, т.е. когда время жизни фотона в нашем открытом резонаторе достигло величины (пара сотен пикосекунд), превышающей время взаимодействия атома и резонатора (около 20 пикосекунд). Близость этих теоретических идей и наших экспериментов тогда стала очень плодотворной. Примерно в то время нас заинтересовали теоретические исследования декогеренции [65, 76], а возможность проверить их в простых экспериментах нас чрезвычайно стимулировала. Обзор экспериментальных методов, которые мы тогда разработали для тестирования первых шагов квантовой информации, можно найти в [77].

Если квантовый невозмущающий счёт фотонов и эксперименты с состоянием кота Шрёдингера, описанные выше, основываются на нерезонансном взаимодействии атомов с полем резонатора за счёт дисперсии, то в наших экспериментах по квантовой информации в КЭД резонаторов в основном использовались резонансные взаимодействия атома с полем резонатора. Основным эффектом в этом случае являются осцилляции Раби, о которых рассказано во введении к этой лекции. На рисунке 20 показана экспериментальная зависимость вероятности обнаружить атом в состоянии  $e$  от времени  $t$  взаимодействия атома и резонатора, при этом атом попадает в резонатор без фотонов в момент времени  $t = 0$ . На этом графике, полученном в 1996 г. [6], видны затухающие осцилляции на вакуумной частоте Раби  $\Omega_0/2\pi = 50$  кГц (затухание происходит из-за различных экспериментальных несовершенств). Эти осцилляции являются прямым проявлением режима сильного взаимодействия в КЭД резонаторов, наблюдение которого было нашей целью с начала 1980-х гг. Впервые мы достигли этой цели в 1987 г., используя закрытый цилиндрический резонатор из нашего эксперимента с двухфотонным ридберговским лазером [35], и затем снова в 1996 г. с нашим первым открытым резонатором, способным хранить фотон дольше времени пролёта атома через него.

Только с использованием этой открытой структуры резонатора мы смогли легко менять время взаимодействия атома с резонатором и таким образом напрямую измерять осцилляции Раби. Метод, который мы для этого применяем, состоит в создании между зеркалами резонатора электрического поля, которое в результате



**Рис. 20.** Вакуумные осцилляции Раби, отображающие вероятность обнаружить атом в его начальном состоянии  $e$  после взаимодействия в течение времени  $t$  с резонатором, находившимся изначально в вакууме, и в резонансе с переходом  $e \rightarrow g$ . Точки соответствуют экспериментальным результатам, а кривая получена аппроксимацией затухающей синусоидой. Три стрелки обозначают времена, соответствующие  $\pi/2$ ,  $\pi$  и  $2\pi$  импульсам Раби.

эффекта Штарка изменяет энергии циркулярных ридберговских состояний  $e$  и  $g$ . Это позволяет настраивать атомный переход на резонанс и выводить из него в заданный момент времени. Атомы готовят в циркулярном состоянии посредством импульсного процесса, который фиксирует их скорость, таким образом мы знаем, когда они попадают в резонатор, и можем решить, когда штарковский импульс должен быть приложен, чтобы зафиксировать время взаимодействия атома с резонатором [77]. Наши эксперименты по квантовой информатике, проведённые на установке, аналогичной той, которая изображена на рис. 10, основывались на использовании осцилляций Раби в основном резонаторе С вместе с классическими микроволновыми импульсами, излучаемыми во вспомогательных резонаторах  $R_1$  и  $R_2$ . Поэтому в этих экспериментах всевозможным образом использовались разносторонние свойства установки с интерферометром Рамзея.

В экспериментах по квантовой информации управляют двухуровневыми системами, называемыми кубитами. В нашем случае такие кубиты представляют собой либо атомы, пролетающие через резонатор во время эволюции между двумя ридберговскими состояниями, либо поле резонатора, осциллирующее между двумя состояниями  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , содержащими 0 и 1 фотон. Взаимодействие между кубитами основано на использовании импульсов осцилляций Раби разной длительности. Вспомогательные резонаторы  $R_1$  и  $R_2$ , между которыми находится резонатор С, хранящий фотоны, применяются для приготовления и анализа состояния атомного кубита соответственно до и после его взаимодействия с полем резонатора.

Когда время взаимодействия атома и поля задаётся таким, что  $\Omega_0 t = \pi/2$ , осцилляции Раби максимально перепутывают атом и поле резонатора, проводя преобразование  $|e, 0\rangle \rightarrow (|e, 0\rangle + |g, 1\rangle)/\sqrt{2}$ . При  $\Omega_0 t = \pi$  атом и поле обмениваются квантом возбуждения, осуществляя переходы  $|e, 0\rangle \rightarrow |g, 1\rangle$  и  $|g, 1\rangle \rightarrow -|e, 0\rangle$ . Ещё один полез-

ный импульс Раби соответствует  $\Omega_0 t = 2\pi$ . Его действие — добавление к состоянию атома и поля фазы  $\pi$  с преобразованиями  $|e, 0\rangle \rightarrow -|e, 0\rangle$  и  $|g, 1\rangle \rightarrow -|g, 1\rangle$ , в то время как на атом, пролетающий в состоянии  $|g\rangle$  через резонатор в вакууме, при тех же условиях влияния не оказывается:  $|g, 0\rangle \rightarrow |g, 0\rangle$ .

Для того чтобы максимально перепутать два атома, один из которых приготовлен в состоянии  $e$ , а другой — в состоянии  $g$ , мы последовательно посылали их в резонатор, в начальный момент времени находившийся в вакууме, и воздействовали  $\pi/2$  импульсом на первый атом и  $\pi$  импульсом на второй [78]. Первый импульс перепутывает первый атом с полем резонатора, в то время как второй обменивает возбуждениями второй атом и поле резонатора, в итоге приводя к двухатомному перепутанному состоянию  $(|e, g\rangle - |g, e\rangle)/\sqrt{2}$ . Поле резонатора, временно перепутываясь с первым атомом, в конце возвращается к начальному вакуумному состоянию, играя таким образом роль катализатора в управляемом перепутывании двух атомов.

Мы также реализовали схему квантовой памяти, храня в резонаторе информацию, которая изначально была записана на первом атоме, и копируя её затем на второй атом [79]. Первый атом, приготовленный в суперпозиции состояний  $a|e\rangle + b|g\rangle$  в  $R_1$ , подвергается  $\pi$  импульсу в изначально пустом резонаторе, переводя поле в состояние  $a|1\rangle + b|0\rangle$ . Второй атом, изначально находившийся в  $|g\rangle$ , затем подвергается  $\pi$  импульсу в этом поле, возбуждая атом в состояние  $-a|e\rangle + b|g\rangle$ , которое с точностью до фазового сдвига идентично начальному состоянию первого атома. Прикладывая ко второму атому до его детектирования классический микроволновый импульс в  $R_2$ , мы можем анализировать его конечное состояние, проверяя, что суперпозиция состояний была скопирована с первого атома на второй.

Мы также продемонстрировали работу квантового ключа [80] — элементарного устройства, связывающего контрольный и целевой кубит таким образом, что над целью проводится унитарное преобразование, если контроль находится в одном состоянии, и цель остаётся неизменной, если контроль находится в другом состоянии (в обоих случаях контроль не меняется). Для этого эксперимента использовались три циркулярных состояния ридберговских атомов: уровни  $e$  и  $g$  с главными квантовыми числами 51 и 50 (переход между этими состояниями находится в резонансе с модой резонатора) и третье циркулярное ридберговское состояние с главным квантовым числом 49, в дальнейшем обозначаемое  $i$ . Переход из  $g$  в  $i$  находится далеко от резонанса с резонатором, атом в состоянии  $i$  был абсолютно нечувствителен к наличию фотонов в резонаторе. Контрольным кубитом было поле резонатора в состоянии 0 или 1, тогда как целевой кубит был ридберговским атомом, эволюционирующим между состояниями  $g$  и  $i$ .

Время взаимодействия между атомом и полем резонатора было выбрано таким, чтобы на атом, эволюционирующий между состояниями  $e$  и  $g$ , действовал  $2\pi$  импульс в вакууме. Взаимодействие между фотонным и атомным кубитами приводило к преобразованиям  $|i, 0\rangle \rightarrow |i, 0\rangle$ ,  $|g, 0\rangle \rightarrow |g, 0\rangle$ ,  $|i, 1\rangle \rightarrow |i, 1\rangle$ ,  $|g, 1\rangle \rightarrow -|g, 1\rangle$ . Это "таблица истинности" для "фазового" преобразователя, вносящего фазовый сдвиг  $\pi$  в целевом кубите в том и только том случае, если контроль находится в состоянии 1. Прикладывая к целевому атомному кубиту два

импульса в  $R_1$  и  $R_2$ , что эквивалентно так называемому однокубитному ключу Адамара, этот "фазовый ключ" превращался в ключ "контролируемое нет", не изменяющий целевое состояние, если контроль был в состоянии 0, и переключающий два целевых состояния, если контроль был в состоянии 1. Такой ключ работал как квантовый невозмущающий счётчик 0–1 фотона, так как конечное состояние атома, пролетевшего резонатор ( $i$  или  $g$ ), определялось числом фотонов в нём (0 или 1), которое на протяжении измерения оставалось неизменным. Этот эксперимент, проведённый в 1999 г. [81], предшествовал нашему более позднему квантовому невозмущающему эксперименту [50], и в нём нельзя было считать числа фотонов больше 1, так же как и повторять процедуру счёта много раз до затухания поля в резонаторе.

Использование импульсов Раби с управляемой длительностью, воздействующих на атомы, пролетающие через резонатор один за другим, может быть описано как подобие управляемой квантовой процедуры "сшивания". Расширив эту процедуру на случай трёх атомов, мы смогли приготовить тройку перепутанных частиц, так называемое GHZ-состояние<sup>2</sup> [82]. В приготовлении используется  $\pi/2$  импульс, прикладываемый к первому атому, приводящий к перепутанному состоянию атома и резонатора, как описано выше. Состояние поля затем считается при помощи  $2\pi$  импульса, приложенного ко второму атому, осуществляя квантовый невозмущающий счёт числа фотонов поля, оставленного первым атомом в резонаторе. После этого состояние двух атомов и поля становится следующим:  $(|e, 0, i\rangle + |g, 1, g\rangle)/\sqrt{2}$ . Затем третий атом, изначально находящийся в состоянии  $g$ , пролетает через резонатор и подвергается  $\pi$  импульсу, таким образом копируя состояние поля и возвращая резонатор в состояние вакуума. Тогда результирующее состояние трёх атомов станет  $(|e, i, g\rangle + |g, g, e\rangle)/\sqrt{2}$ , где три символа соответствуют в том же порядке трём атомам, последовательно пролетевшим через резонатор.

В другом эксперименте с перепутыванием мы проверяли принцип неопределённости, изучая то, как полосы атомного интерферометра Рамзея исчезают, когда информация о пути атомов в интерферометре остаётся в поле, смешивающем атомные уровни [83]. Снова используя нашу установку КЭД резонаторов, мы продемонстрировали, как при помощи наведённых резонатором столкновений перепутать два атома, одновременно пролетающих через моду поля [84], и как перепутать две моды поля через их резонансное взаимодействие с одиночным атомом [85]. Мы также показали, как можно, используя дисперсионное взаимодействие атомов с полем резонатора, невозмущающим способом детектировать атомы по фазовому сдвигу, который они вызывают у слабого когерентного поля [86]. Все эти эксперименты подробно описаны в [4].

## 9. Дальнейшие перспективы работы ENS

В ходе наших исследований КЭД резонаторов мы научились невозмущающим способом проводить измерения квантовых полей, готовить и восстанавливать различные неклассические состояния излучения, а также использовали взаимодействие этих полей с ридберговскими

атомами, чтобы продемонстрировать базовые шаги обработки квантовой информации. В данный момент мы развиваем несколько направлений этих исследований в рамках гранта для ведущих исследователей, полученного в 2009 г. от Европейского исследовательского совета (ERC). В этом проекте мы хотим дальше отодвинуть границу квантового и классического, проведя эксперименты по приготовлению неклассических состояний света типа "кот Шрёдингера" и фоковских состояний, содержащих большое число фотонов, изучая нелокальные свойства перепутанных состояний, хранящихся в двух резонаторах, а также разрабатывая методы эффективной защиты неклассических полей от декогеренции.

Другое направление исследований будет заключаться в использовании квантового эффекта Зенона для управления гамильтонианом, определяющим эволюцию поля. Мы уже показали, что можно остановить рост когерентного поля в резонаторе с помощью повторяющихся измерений числа фотонов поля [87]. Мы предлагаем обобщить этот эксперимент и использовать повторяемую квантовую невозмущающую процедуру, чтобы узнать, содержит ли поле в резонаторе установленное заранее число фотонов  $n_0$ . Проводя это измерение, мы не дадим полю достичь состояния с этим числом фотонов и заставим его эволюционировать в подпространствах, образованных фоковскими состояниями либо с  $n < n_0$ , либо с  $n > n_0$ . Ограничив таким образом его эволюцию, мы сможем изобрести новые методы для приготовления фотонных котов Шрёдингера или, в более общем смысле, сможем определить новые процедуры для приготовления и управления произвольными суперпозициями когерентных состояний в резонаторе [88, 89]. Для этих и других экспериментов нам необходима установка, в которой атомы будут взаимодействовать с полем резонатора в течение времён миллисекундного масштаба. Чтобы достичь этого условия, мы собираем установку с атомным фонтаном, в которой через резонатор будут пролетать медленные атомы со скоростями порядка нескольких метров в секунду. Атомы, охлаждённые в магнито-оптической ловушке [45], будут лазерным толчком направляться вверх в сверхпроводящий резонатор, находящийся над ловушкой в верхней точке параболической траектории атомов. Медленные атомы будут готовиться в циркулярных состояниях и детектироваться при помощи ионизации полем внутри резонатора.

## 10. Связь с другими областями квантовой информатики

Наши эксперименты с микроволновым сверхпроводящим резонатором и ридберговскими атомами связаны с другими экспериментами, в различных контекстах исследующими взаимодействие атомов и фотонов в структурах, удерживающих электромагнитное поле. КЭД оптических резонаторов развивалась параллельно с КЭД микроволновых резонаторов и достигла режима сильного взаимодействия в 1992 г. [90]. В этой очень популярной области исследования за последние двадцать лет было проведено множество экспериментов для проверки квантовых свойств света или для демонстрации базовых операций в обработке квантовой информации. Эти эксперименты часто включают в себя взаимодействие холодных атомов с оптическими фотонами и в них

<sup>2</sup> Состояние Гринбергера – Хорна – Цайлингера. (Примеч. перев.)

применяются как стандартные методы лазерного охлаждения, так и основанные на чипе ловушки для атомов. В них используются всевозможные виды резонаторов, включая высокодобротные резонаторы Фабри–Перо, микросферы и микротороидные структуры, поддерживающие возбуждение мод шепчущей галереи. Многообразие исследований так велико, что развёрнутое описание отдельных работ выходит за рамки этой лекции. Обзор ранних работ в этой области можно найти в [91], а более современное описание этого раздела науки представлено в [92]. Необходимо упомянуть и другие разработки в области физики твёрдого тела. В них атомы заменяются квантовыми точками, включёнными в брэгговские слои или в материалы с фотонной запрещённой зоной, удерживающие фотоны [93]. В этих системах наблюдалось множество интересных эффектов КЭД резонаторов. Развитие методов усиления взаимодействия источников света с микрорезонаторными структурами позволило провести операции, которые полезны для квантовой коммуникации и обработки квантовой информации. Здесь я также не буду пытаться обсуждать конкретные работы.

Необходимо отдельно упомянуть область КЭД контуров [94], так как она тесно связана с КЭД резонаторов и с нашей работой. В этой области исследований, которая очень быстро и захватывающе развивалась в последнее время, атомы заменяются малыми сверхпроводящими контурами с джозефсоновскими контактами, которые ведут себя как искусственные двухуровневые атомы, взаимодействующие с полосковой линией передачи, компланарные структуры или трёхмерные закрытые резонаторы для радиочастотных полей. Взаимодействие между искусственными атомами и полем также описывается гамильтонианом Джейнса–Каммингса, как и наша система из ридберговского атома и сверхпроводящего резонатора [95]. Множество групп по всему миру работают в этой новой области науки, и с этими структурами были проведены эксперименты, очень похожие на те, которые осуществлены в ENS, включая приготовление и исследование фоковых состояний [96, 97] и фотонных состояний кота Шрёдингера [98, 99]. Очень сильное взаимодействие гигантских искусственных джозефсоновских атомов с радиочастотными волнами приводит к процессам быстрее, чем в случае взаимодействия ридберговских атомов и сверхпроводящего резонатора. Операции обработки квантовой информации, использующие эти системы, занимают времена наносекундного масштаба, тогда как в экспериментах с ридберговскими атомами эти времена относятся к микросекундному диапазону. Эти контуры можно изготавливать, используя хорошо развитые методы литографии, что открывает перспективы применения в области квантовой информации на малых масштабах с лучшим контролем декогеренции.

Специалисты по ионным ловушкам, так же как и специалисты по фотонным, составляют широкое сообщество. В своей лекции Дэвид Вайнленд рассказывает об экспериментах, проводимых над ионами в ловушках многими группами по всему миру и тесно связанных с нашей собственной работой. В более общем контексте квантовой информации помимо КЭД резонаторов и физики ионов в ловушках также важно упомянуть широкое разнообразие экспериментов по квантовой оптике, использующих детектирование корреляций фотонов, испускаемых различными источниками пучков-близне-

цов. Эти эксперименты начались с новаторских демонстраций нарушений неравенств Бэлла в 1970-х гг. и начале 1980-х гг. [100, 101]. С тех пор эти исследования продемонстрировали различные свойства неклассического света и изучили их возможное применение в квантовой коммуникации [102], квантовой телепортации [103] и квантовых вычислениях [104]. В квантовых невозмущающих исследованиях распространяющихся оптических пучков [105] пока что не достигнута чувствительность в один квант, но, тем не менее, в них есть множество общих черт с нашими квантовыми невозмущающими измерениями. В экспериментах по квантовой оптике были также получены состояния света типа кота Шрёдингера, очень схожие с нашими "котами" КЭД резонаторов [106]. Эта область слишком обширна, чтобы приводить ещё больше конкретных работ. Эксперименты с холодными атомами, в особенности те, в которых изучаются свойства атомов, зафиксированных в оптических решётках по одной, двум или трём координатам, также нацелены на управление отдельными частицами в контролируемой окружающей среде и на возможное применение в квантовой информатике [107, 108]. Наконец, разработки наномеханических осцилляторов, связанных с атомными системами или резонаторами электромагнитных полей, открывают новую область, где скоро будут наблюдаться проявления суперпозиции и перепутанности [109, 110]. Многие идеи и концепции, используемые как в этих экспериментах, так и в КЭД резонаторов или физике ионов в ловушках, имеют общие особенности.

Не сравнивая относительные заслуги или ограничения различных направлений исследований, нацеленных на управление квантовыми системами, мы можем попробовать предсказать будущее этой области физики в целом. Универсальный квантовый компьютер, в котором можно будет использовать произвольные алгоритмы, до сих пор похож на утопию [111]. Проблему декогеренции действительно очень трудно решить, несмотря на прогресс, связанный с применением корректировки ошибок [112, 113]. Квантовые симуляторы, моделирующие структуры конденсированных сред и динамику массива атомов в оптических решётках [114] или ионов в ловушках [115], кажутся более реалистичными. Они, возможно, приведут к важным достижениям в ближайшем будущем. Также, скорее всего, будет разработана квантовая передача информации с использованием фотонов, а для создания эффективных квантовых повторителей будут реализованы квантовые узлы, где смогут обмениваться информацией атомные системы и фотоны [116]. В этом контексте идеи КЭД резонаторов кажутся наиболее подходящими. Также, применяя инструменты управления частицами, можно ожидать важных успехов в квантовой метрологии [117]. Но я отлично понимаю, что эти попытки предсказаний абсолютно бесполезны. Самые важные применения квантовой физики определились в прошлом благодаря случайным комбинациям различных достижений, сделанных учёными, которые никогда не предвидели бы того, к чему приведут их результаты. Я думаю, то же самое случится и с управлением отдельными квантовыми частицами.

### Благодарности

Разрешите мне добавить к вышесказанному пару личных замечаний. В работе, которая проводилась в моей



Рис. 21. Автор, Жан-Мишель Раймонд и Мишель Брун (слева направо) в лаборатории осенью 2012 г. (предоставлена J.F. Dars, фототека ENS).

лаборатории последние три десятилетия, были важны наши общие усилия и устремления. Значимую роль в этой работе сыграли мои бывшие студенты, теперь уже коллеги, Жан-Мишель Раймонд и Мишель Брун. Мне очень повезло, что все эти годы мы держались вместе и сумели создать этот крепкий и дружественный союз (на рис. 21 представлена фотография нашей лаборатории осенью 2012 г.). Мы всегда открыто и свободно обсуждали наши проекты, совместно решая, какому пути следовать в нашей работе. Многие плодотворные идеи исходили от Жан-Мишеля или от Мишеля, и я полностью осознаю, что сегодняшнее признание адресовано не только моей, но и их работе. Я уверен, что они разделяют это чувство!

В эту работу было вовлечено множество людей, в общей сумме около ста студентов, постдоков и приглашённых учёных. Самые юные из них изображены на фотографии (рис. 22), которая была сделана в октябре 2012 г., спустя три дня после того, как были объявлены лауреаты Нобелевской премии. Помимо Жан-Мишеля и Мишеля, я бы хотел упомянуть двух молодых коллег, которые присутствуют на этом снимке, Себастьяна Глейзеса (Sebastien Gleyzes) и Игоря Доценко (Igor Dotsenko), чей вклад в эксперименты по детектированию фотонов, коту Шрёдингера и квантовой обратной связи был очень важен. Штефан Кюр (сейчас в Университете Стратклайд в Глазго) был постдоком в нашей группе в тот момент, когда мы впервые в 2006 г. осуществили квантовый невозмущающий счёт фотонов, и его вклад в нашу работу тоже был очень важен. Жиль Ног (Gilles Nogues) был в нашей команде до 2010 г., после этого он получил должность в Гренобле. Среди тех, кто сыграл важную роль в самом начале нашего исследования, я должен упомянуть Филиппа Гоя, для нас были очень важны его технологические навыки и глубокое понимание физики. Важную роль в развитии нашей процедуры приготовления ридберговских атомов сыграли Мишель Гросс и Жан Ар (Jean Hare). Валери Лефавр-Сегуан (Valerie Lefevre-Seguin) была членом нашей группы, когда сформировались наши квантовые невозмущающие идеи, а Фердинанд Шмидт-Калер (Ferdinand Schmidt-Kaler), который сейчас работает в Майнце, помогал нам провести первые эксперименты с режимом сильного взаимодействия в открытых резонаторах. С

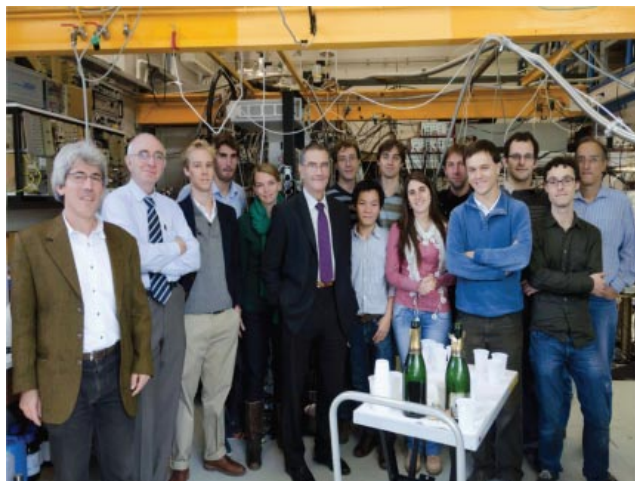


Рис. 22. Группа в ENS в октябре 2012 г. Слева направо: М. Брун, Ж.-М. Раймонд, А. Факон, А. Синьоль, Э.-К. Дич, С. Арош, Т. Рыбарczyk, Нгуен Тан Лонг, И. Доценко, С. Герман, С. Гуэрлих, Б. Подесерф, С. Глейзес, Р. Техейра и Дж. Ар (коллега, бывший член группы) (М. Brune, J.-M. Raimond, A. Facon, A. Signoles, E.-K. Dietsche, S. Haroche, T. Rybarczyk, Nguyen Thanh Long, I. Dotsenko, C. Herman, S. Guerlich, B. Peaudecerf, S. Gleyzes, R. Texeira and J. Hare).

точки зрения теории очень важной и плодотворной для нас стала совместная работа с нашими бразильскими коллегами Луисом Давидовичем и Нисимом Загури. В конце настоящей статьи в списке литературы дан полный список соавторов, в котором перечислены другие студенты, постдоки, а также другие участники нашей работы. Я надеюсь, они простят меня за то, что я не упоминаю их здесь поимённо. Каждый благодаря своим успешным вкладам позволил улучшить приёмы в нашей игре с жонглированием фотонами. Приехав из разных стран, они трудились очень упорно, с тем энтузиазмом, который побеждает все неизбежные препятствия, так часто встречающиеся на пути экспериментатора.

Я навсегда запомню некоторые радостные моменты, когда наши усилия бывали вознаграждены и все сложности забывались. Например, в день (а точнее, ночь) взятия Бастилии в 1987 г. мы с моим другом Луисом Давидовичем в лаборатории наблюдали первое свидетельство того, что наш двухфотонный микроазер работал, или ранним утром в июле 1996 г. в отеле в Сиднее перед моим докладом на конференции я получил по факсу известие, о том, что пока я спал, в двадцати тысячах километров и в десяти временных зонах от меня Мишель, Жан-Мишель и студенты только что получили сигналы кота Шрёдингера, которые мы так долго ждали. Или тот момент, когда 11 сентября 2006 г. (в день моего рождения!), Штефан Кюр вызвал меня по телефону в лабораторию как раз вовремя, чтобы впервые увидеть регистрацию рождения и смерти одиночного фотона в нашем резонаторе.

Необходимо также упомянуть уникальную роль лаборатории Кастлер Броссель, в которой мы работали все эти годы в атмосфере доверия, свободно следовали всем нашим идеям и не были обязаны оправдывать нашу работу, обещая невероятные практические применения. Этот дух свободы мы получили в наследство от наших предшественников, Альфреда Кастлера и Жана Бросселя, которые создали эту лабораторию 60 лет назад,





**Рис. 23.** Фотография, сделанная в день объявления присуждения Нобелевской премии Альфреду Кастлеру, в той же комнате, что на рис. 22. Слева направо: Франк Лалоу (Franck Laloe), Клод Коэн-Тануджи (Нобелевская премия 1997), Альфред Кастлер (Нобелевская премия 1966), Серж Арош, Жан Броссель и Ален Омон (Alain Omon).

когда изобрели оптическую накачку. Клод Коэн-Тануджи пошёл по их стопам и вдохновил меня своей страстью к квантовому миру. Фотография на рис. 23 была сделана в ENS в той же комнате, что и предыдущий снимок, 46 лет назад с точностью почти в один день, когда было объявлено о присуждении Нобелевской премии Альфреду Кастлеру. Мы с Клодом, конечно же, изменились физически, но наш энтузиазм и страсть к физике остались прежними!

С самого начала моей карьеры я получал финансирование непосредственно от лаборатории, меня даже не просили писать заявки и длинные отчёты. Со временем это изменилось, в конце 1980-х гг. научные исследования стали более проектно-ориентированными. Мы с моей командой тогда были достаточно известны, чтобы получать гранты от CNRS и Национального агентства исследований (Agence Nationale de la Recherche), а заодно и от европейских фондов, заканчивая нашим последним грантом ERC, полученным в 2009 г. Я должен также упомянуть о щедром финансировании, которое мы получали от Японского фонда науки и технологий (Japanese Science and Technology Corporation, JST) благодаря совместному гранту с Йошиши Ямамото (Yoshisha Yamamoto) с 1999 по 2009 гг. Это позволило нам свободно следовать нашему исследованию квантовой перепутанности, избегая бюрократической волокиты.

Я бы не был полностью честен, не упомянув, что важным стимулом для меня всегда было преподавание. В Университете Париж 6 и в ENS я понял, что подготовка к лекциям и общение со студентами потрясающе помогает мне лучше понять физику, это не раз давало мне идеи для экспериментов. Начиная с 2001 г. у меня появилась возможность каждый год преподавать новый курс в Колледже Франции (College de France) по тем темам в квантовой физике, которые касались непосредственно моей работы и работы моих коллег, занимавшихся наукой о квантовой информации. Это стало непростой задачей для меня, но, безусловно, этот опыт был для меня невероятно полезен и продуктивен.

Я бы хотел поблагодарить моих друзей и коллег со всего мира. Меня часто стимулировало посещение их лекций, чтение их работ и обсуждения с ними непосредственно в Париже или в их лабораториях. Такая дружба — огромное преимущество в жизни учёного. Я очень дорожу этой возможностью для нас, таких разных людей, разделять страсть к открытиям и интерес к пониманию Природы. Особенно важно здесь упомянуть нашу дружбу с Дэвидом Вайнлендом, для меня было исключительным удовольствием разделить с ним эту Нобелевскую премию.

И в заключение надо сказать, что всё было бы невозможным без Клодин, моей жены, которую я встретил задолго до того, как узнал, что такое фотон, и без наших детей, Жульена и Юдит. Они озаряют мою жизнь своей любовью, своим остроумием и интеллектуальной поддержкой. Но эта часть истории будет рассказана не здесь [118].

Перевёл с английского *А.Л. Чехов*  
Консультант перевода *М.В. Чехова*

## Список литературы

- Bohr N "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics", in *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (Ed. P A Schilpp) (Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers, 1949)
- Schrödinger E "Are there quantum jumps? Part II" *British J. Philos. Sci.* **3** 233 (1952); Шрёдингер Э *Избранные труды по квантовой механике* (М.: Наука, 1976)
- Jaynes E T, Cummings F W *Proc. IEEE* **51** 89 (1963)
- Haroche S, Raimond J-M *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2006)
- Meekhof D M, Monroe C, King B E, Itano W M, Wineland D J *Phys. Rev. Lett.* **76** 1796 (1996)
- Brune M, Schmidt-Kaler F, Maali A, Dreyer J, Hadley E, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **76** 1800 (1996)
- Haroche S, Cohen-Tannoudji C *J. Physique* **30** 125 (1969)
- Haroche S, Thèse d'Etat (PhD Thesis) (Paris: Paris VI Univ., 1971); *Ann. Phys. Paris* **6** 189 (1971); *Ann. Phys. Paris* **6** 327 (1971)
- Cohen-Tannoudji C, Haroche S *J. Physique* **30** 153 (1969)
- Cohen-Tannoudji C, Haroche S, Audoin C, Schermann J-P *Phys. Rev. Lett.* **24** 861 (1970)
- Haroche S, Paisner J, Schawlow A L *Phys. Rev. Lett.* **30** 948 (1973)
- Cohen-Tannoudji C, Haroche S *C.R. Acad. Sci. Paris* **261** 5400 (1965)
- Haroche S, Gross M, Silverman M *Phys. Rev. Lett.* **33** 1063 (1974)
- Fabre C, Goy P, Haroche S *J. Phys. Lett. B* **10** L183 (1977)
- Fabre C, Goy P, Haroche S *Phys. Rev. A* **18** 229 (1978)
- Dukas T W, Littman M G, Freeman R R, Kleppner D *Phys. Rev. Lett.* **35** 366 (1975)
- Gross M, Goy P, Haroche S, Fabre C, Raimond J-M *Phys. Rev. Lett.* **43** 343 (1979)
- Dicke R H *Phys. Rev.* **93** 99 (1954)
- Raimond J-M, Goy P, Gross M, Fabre C, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **49** 1924 (1982)
- Gross M, Haroche S *Phys. Rep.* **93** 302 (1982)
- Kaluzny Y, Goy P, Gross M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **51** 1175 (1983)
- Bonifacio R, Schwendimann P, Haake F *Phys. Rev. A* **4** 302 (1971)
- Raimond J-M, Goy P, Gross M, Fabre C, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **49** 117 (1982)
- Purcell E M *Phys. Rev.* **69** 681 (1946)
- Goy P, Raimond J-M, Gross M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **50** 1903 (1983)
- Kleppner D *Phys. Rev. Lett.* **47** 233 (1981)
- Hulet R G, Hilfer E S, Kleppner D *Phys. Rev. Lett.* **55** 2137 (1985)
- Gabriele G, Dehmelt H *Phys. Rev. Lett.* **55** 67 (1985)
- Haroche S, in *New Trends in Atomic Physics. Les Houches Summer School* (Eds G Grynberg, R Stora) (Amsterdam: North-Holland, 1984)
- Eberly J H, Narozhny N B, Sanchez-Mondragon J J *Phys. Rev. Lett.* **44** 1323 (1980)
- Meschede D, Walther H, Müller G *Phys. Rev. Lett.* **54** 551 (1985)
- Meystre P, Rempe G, Walther H *Opt. Lett.* **13** 1078 (1988)
- Rempe G, Schmidt-Kaler F, Walther H *Phys. Rev. Lett.* **64** 2783 (1990)



34. Scully M O, Englert B-G, Walther H *Nature* **351** 111 (1991)
35. Jhe W, Anderson A, Hinds E, Meschede D, Moi L, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **58** 666 (1987)
36. Brune M, Raimond J-M, Goy P, Davidovich L, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **59** 1899 (1987)
37. Nikolaus B, Zangh D Z, Toscheck P *Phys. Rev. Lett.* **47** 171 (1981)
38. Haroche S, Kleppner D *Phys. Today* **42** (1) 24 (1989)
39. Брагинский В Б, Воронцов Ю И, Халили Ф Я *ЖЭТФ* **73** 1340 (1977); Braginskii V B, Vorontsov Yu I, Khalili F Ya *Sov. Phys. JETP* **46** 705 (1977); Брагинский В Б, Вятчанин С П *ДАН СССР* **259** 570 (1981); Braginskii V B, Vyatchanin S P *Sov. Phys. Dokl.* **26** 686 (1981); Braginsky V B, Khalili F Ya *Rev. Mod. Phys.* **68** 1 (1996)
40. Kuhr S, Gleyzes S, Guerlin C, Bernu J, Hoff U-B, Deléglise S, Osnaghi S, Brune M, Raimond J-M, Haroche S, Jacques E J, Bosland P, Visentin B *Appl. Phys. Lett.* **90** 164101 (2007)
41. Nussenzweig P, Bernardot F, Brune M, Hare J, Raimond J-M, Haroche S, Gawlik W *Phys. Rev. A* **48** 3991 (1993)
42. Hulet R G, Kleppner D *Phys. Rev. Lett.* **51** 1430 (1983)
43. Cohen-Tannoudji C *Ann. Physique* **7** 423 (1962); *Ann. Physique* **7** 469 (1962)
44. Chu S *Rev. Mod. Phys.* **70** 685 (1998)
45. Cohen-Tannoudji C N *Rev. Mod. Phys.* **70** 707 (1998)
46. Phillips W D *Rev. Mod. Phys.* **70** 721 (1998)
47. Brune M, Haroche S, Lefevre-Segun V, Raimond J-M, Zagury N *Phys. Rev. Lett.* **65** 976 (1990)
48. Ramsey N F *Phys. Rev.* **76** 996 (1949)
49. Haroche S, Brune M, Raimond J-M *Phys. Today* **66** (1) 27 (2013)
50. Gleyzes S, Kuhr S, Guerlin C, Bernu J, Deleglise S, Busk Hoff U, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **446** 297 (2007)
51. Peil S, Gabrielse G *Phys. Rev. Lett.* **83** 1287 (1999)
52. Guerlin C, Bernu J, Deléglise S, Sayrin C, Gleyzes S, Kuhr S, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **448** 889 (2007)
53. Glauber R J *Phys. Rev.* **131** 2766 (1963)
54. Brune M, Bernu J, Guerlin C, S Deléglise S, Sayrin C, Gleyzes S, Kuhr S, Dotsenko I, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **101** 240402 (2008)
55. Dotsenko I, Mirrahimi M, Brune M, Haroche S, Raimond J-M, Rouchon P *Phys. Rev. A* **80** 013805 (2009)
56. Sayrin C, Dotsenko I, Zhou X X, Peaudecerf B, Rybarczyk T, Gleyzes S, Rouchon P, Mirrahimi M, Amini H, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **477** 73 (2011)
57. Zhou X X, Dotsenko I, Peaudecerf B, Rybarczyk T, Sayrin C, Gleyzes S, Raimond J-M, Brune M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **108** 243602 (2012)
58. Gabor D "Holography, 1948 – 1971", Nobel Lecture, December 11, 1971, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1971/gabor-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1971/gabor-lecture.html)
59. Smithey D T, Beck M, Raymer M G *Phys. Rev. Lett.* **70** 1244 (1993)
60. Deléglise S, Dotsenko I, Sayrin C, Bernu J, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **455** 510 (2008)
61. Schleich W *Quantum Optics in Phase Space* (Berlin: Wiley-VCH, 2005)
62. Schrödinger E *Naturwissenschaften* **23** 844 (1935)
63. Brune M, Haroche S, Raimond J-M, Davidovich L, Zagury N *Phys. Rev. A* **45** 5193 (1992)
64. Savage C M, Braunstein S L, Walls D F *Opt. Lett.* **15** 628 (1990)
65. Zurek W H *Phys. Today* **44** (10) 36 (1991)
66. Brune M, Hagley E, Dreyer J, Maître X, Maali A, Wunderlich C, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **77** 4887 (1996)
67. Auffeves A, Maioli P, Meunier T, Gleyzes S, Nogues G, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **91** 230405 (2003)
68. Meunier T, Gleyzes S, Maioli P, Auffeves A, Nogues G, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **94** 010401 (2005)
69. Feynman R P *Opt. News* **11** (2) 11 (1985)
70. Bennett C H, Brassard G, in *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing* (New York: IEEE, 1984) p. 175
71. Ekert A *Phys. Rev. Lett.* **67** 661 (1991)
72. Ekert A, Jozsa R *Rev. Mod. Phys.* **68** 733 (1996)
73. Nielsen M A, Chuang I L *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
74. Shor P W, in *Proc. of the 35th Annual Symp. on the Foundations of Computer Science* (Los Alamitos, CA: IEEE Computer Soc. Press, 1994) p. 124
75. Deutsch D, Jozsa R *Proc. R. Soc. London A* **439** 553 (1992)
76. Giulini D, Joos E, Kiefer C, Kupsch J, Stamatescu I-O, Zeh H D *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Berlin: Springer, 1996)
77. Raimond J-M, Brune M, Haroche S *Rev. Mod. Phys.* **73** 565 (2001)
78. Hagley E, Maître X, Nogues G, Wunderlich C, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **79** 1 (1997)
79. Maître X, Hagley E, Nogues G, Wunderlich C, Goy P, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **79** 769 (1997)
80. Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S, Bertet P, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **83** 5166 (1999)
81. Nogues G, Rauschenbeutel A, Osnaghi S, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **400** 239 (1999)
82. Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S, Bertet P, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Science* **288** 2024 (2000)
83. Bertet P, Osnaghi S, Rauschenbeutel A, Nogues G, Auffeves A, Brune M, Raimond J-M, Haroche S *Nature* **411** 166 (2001)
84. Osnaghi S, Bertet P, Auffeves A, Maioli P, Brune M, Raimond J M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **87** 037902 (2001)
85. Rauschenbeutel A, Bertet P, Osnaghi S, Nogues G, Brune M, Raimond J M, Haroche S *Phys. Rev. A* **64** 050301(R) (2001)
86. Maioli P, Meunier T, Gleyzes S, Auffeves A, Nogues G, Brune M, Raimond J M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **94** 113601 (2005)
87. Bernu J, Deléglise S, Sayrin C, Kuhr S, Dotsenko I, Brune M, Raimond J M, Haroche S *Phys. Rev. Lett.* **101** 180402 (2008)
88. Raimond J M, Sayrin C, Gleyzes S, Dotsenko I, Brune M, Haroche S, Facchi P, Pascasio S *Phys. Rev. Lett.* **105** 213601 (2010)
89. Raimond J M, Facchi P, Peaudecerf B, Pascasio S, Sayrin C, Dotsenko I, Gleyzes S, Brune M, Haroche S *Phys. Rev. A* **86** 032120 (2012)
90. Thompson R J, Rempe G, Kimble H J *Phys. Rev. Lett.* **68** 1132 (1992)
91. Mabuchi H, Doherty A C *Science* **298** 1372 (2002)
92. Rempe G "Optical cavity quantum electrodynamics", in *Proc. of Lasers and Electro-Optics 2009 and 11th European Quantum Electronics Conf., CLEO Europe-EQEC 2009, 14–19 June 2009, Munich, Germany* (Piscataway, NJ: IEEE, 2009)
93. Reithmaier J P "Strong exciton-photon coupling in semiconductor quantum dot systems" *Semicond. Sci. Technol.* **23** 123001 (2008)
94. Schoelkopf R J, Girvin S M *Nature* **451** 664 (2008)
95. Fink J M, Göppl M, Baur M, Bianchetti R, Leek P J, Blais A, Wallraff A *Nature* **454** 315 (2008)
96. Schuster D I, Houck A A, Schreier J A, Wallraff A, Gambetta J M, Blais A, Frunzio L, Majer J, Johnson B, Devoret M, Girvin S M, Schoelkopf R J *Nature* **445** 515 (2007)
97. Hofheinz M, Weig E M, Ansmann M, Bialczak R C, Lucero E, Neeley M, O'Connell A D, Wang H, Martinis J M, Cleland A N *Nature* **454** 310 (2008)
98. Hofheinz M, Weig E M, Ansmann M, Bialczak R C, Lucero E, Neeley M, O'Connell A D, Sank D, Wenner J, Martinis J M, Cleland A N *Nature* **459** 546 (2009)
99. Kirchmair G, Vlastakis B, Leghtas Z, Nigg S E, Paik H, Ginossar E, Mirrahimi M, Frunzio L, Girvin S M, Schoelkopf R J *Nature* **495** 205 (2013)
100. Freedman S J, Clauser J F *Phys. Rev. Lett.* **28** 938 (1972)
101. Aspect A, Dalibard J, Roger G *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982)
102. Gisin N, Ribordy G G, Tittel W, Zbinden H *Rev. Mod. Phys.* **74** 145 (2002)
103. Bouwmeester D, Pan J M, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeller A *Nature* **390** 575 (1997)
104. Walther P, Resch K J, Rudolph T, Scheuk E, Weinfurter H, Zeller A *Nature* **434** 169 (2005)
105. Grangier P, Levenson J A, Poizat J P *Nature* **396** 537 (1998)
106. Ourjoumteva A, Jeong H, Tualle-Broui R, Grangier P *Nature* **448** 784 (2007)
107. Garcia-Ripoli J J, Cirac J I *Phil. Trans. R. Soc. London* **361** 1537 (2003)
108. Negretti A, Treutlein P, Calarco T *Quantum Information Process.* **10** 721 (2011)
109. Rocheleau T, Ndukum T, Macklin C, Hertzberg J B, Clerk A A, Schwab K C *Nature* **463** 72 (2010)
110. Chan J, Alegre T P M, Safavi-Naeini A H, Hill J T, Krause A, Groblacher S, Aspelmeyer M, Painter O *Nature* **478** 89 (2011)
111. Haroche S, Raimond J-M *Phys. Today* **49** (8) 51 (1996)
112. Schindler P, Barreiro J T, Monz T, Nebendahl V, Nigg D, Chwalla M, Hennrich M, Blatt R *Science* **332** 1059 (2011)
113. Reed M D, DiCarlo L, Nigg S E, Sun L, Frunzio L, Girvin S M, Schoelkopf R J *Nature* **482** 382 (2012)
114. Jaksch D, Zoller P *Ann. Physics* **315** 52 (2005)
115. Schneider C, Porras D, Schaez T *Rep. Prog. Phys.* **75** 024401 (2012)
116. Kimble H J *Nature* **453** 1023 (2008)
117. Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L "Advances in quantum metrology" *Nature Photon.* **5** 222 (2011)
118. Haroche S "Biographical", The Nobel Prize in Physics 2012, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/haroche-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/haroche-bio.html)