

Когда атомы ведут себя как волны. Бозе-эйнштейновская конденсация и атомный лазер

В. Кеттерле

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2001 г.)

PACS numbers: 03.75.Hh, 03.75.Nt, 05.30.Jp

Содержание

1. Введение (1339).
 2. БЭК и физика конденсированного состояния вещества (1341).
 3. Спин-поляризованный водород (1341).
 4. Лазерное охлаждение (1342).
 5. Исследования в МТИ (1990–1996 гг.) (1342).
 - 5.1. Усовершенствование лазерного охлаждения. 5.2. Объединение лазерного и испарительного охлаждений. 5.3. БЭК в натрии. 5.4. "Трилистниковая" ловушка. 5.5. Интерференция двух конденсатов.
 6. Магия волн материи (1353).
 - 6.1. Усиление атомов в бозе-эйнштейновском конденсате. 6.2. Наблюдение решетки вихрей в бозе-эйнштейновском конденсате.
 7. Заключение (1356).
- Список литературы (1357).

1. Введение

Низкие температуры постоянно привлекали к себе внимание физиков прошлого столетия, и с каждым продвижением по направлению к абсолютному нулю открывалась новая богатая физика. Возможно, неспециалистам интересно узнать, почему обычный "мороз" в холодильнике недостаточно холоден. Только представьте себе, как много явлений природы мы не увидели бы, если бы жили на поверхности солнца. Без холодильников мы бы знали только газообразное состояние вещества и не имели никакого представления о жидкостях и кристаллах, никогда не смогли бы любоваться красотой снежинок. Мы можем наблюдать эти разительно отличающиеся состояния вещества только при охлаждении до обычных земных температур. Но это только начало: при дальнейшем охлаждении возникают многочисленные другие состояния. Достижение температур порядка 1 К было вознаграждено открытием сверхпроводимости в 1911 г. и

сверхтекучести в гелии-4 в 1938 г. Охлаждение до милликельвинов позволило в 1972 г. наблюдать сверхтекучесть в гелии-3. Появление лазерного охлаждения в 1980-е годы открыло новую область физики сверхнизких температур. При температурах порядка микрокельвинов были получены облака разреженного атомарного газа, которые использовались для прецизионных измерений и изучения столкновений при сверхнизких температурах. Для исследования квантового вырожденного газа, такого как бозе-эйнштейновский конденсат, полученный впервые в 1995 г., потребовалось опуститься в диапазон нанокельвинов. Каждый из этих этапов охлаждения был большим достижением и удостоивался Нобелевской премии.

Эта статья описывает мое собственное видение открытия и изучения бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) в атомарных газах. Начиная с 1995 г., эта область исследований стала бурно развиваться, в нее пришли специалисты по атомной физике, квантовой оптике и физике конденсированного состояния вещества. Удерживаемые в ловушках ультрахолодные пары явили собой новые квантовые системы, уникальные по точности и чувствительности методов, с помощью которых их можно было воспроизводить и исследовать. Теперь уже, по крайней мере, тридцать групп получили конденсаты, а число публикаций, посвященных БЭК, после открытия конденсата в атомарных газах в 1995 г. резко возросло (рис. 1).

Явление бозе-эйнштейновской конденсации еще в 1925 г. было предсказано Альбертом Эйнштейном [1], который использовал в этой работе метод, предложенный Шатъендранатом Бозе для вывода спектра излучения абсолютно черного тела [2]. Если газ атомов-бозонов охладить ниже определенной температуры T_c , значительная часть атомов сконденсируется в квантовом состоянии с наименьшей энергией. При температуре T атомы с массой m можно рассматривать как квантово-механические волновые пакеты, имеющие размеры порядка длины волны де Бройля $\lambda_{dB} = (2\pi\hbar^2/mk_B T)^{1/2}$, обусловленной тепловым движением. Величина λ_{dB} определяет неопределенность координаты, связанную с тепловым разбросом импульсов, и возрастает с понижением

В. Кеттерле (W. Ketterle). Department of Physics, MIT–Harvard Center for Ultracold Atoms; Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 02139, USA

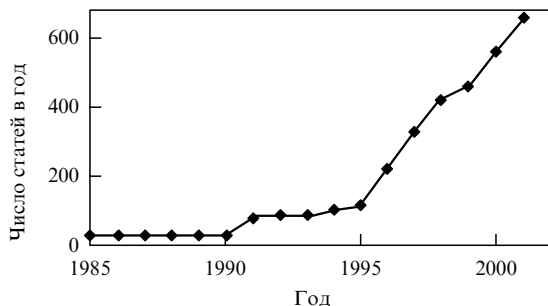


Рис. 1. Ежегодное количество публикаций, которые содержат слова "Бозе" и "Эйнштейн" в названии, аннотации или ключевых словах. Данные получены в результате поиска в базе данных Института научной информации (ISI).

температуры. Когда атомы охлаждены до температуры, при которой величина λ_{dB} становится сравнимой с межатомным расстоянием, атомные волновые пакеты начинают перекрываться, и газ превращается в "квантовый суп" неразличимых частиц. При этом газ бозонов испытывает квантовомеханический фазовый переход и образует бозе-эйнштейновский конденсат — облако атомов, каждый из которых находится в одном и том же квантовом состоянии с наименьшей энергией (рис. 2). Это происходит, начиная с некоторой температуры T_c (которая в случае идеального газа может быть найдена из соотношения $n\lambda_{dB}^3 = 2,612$, где n — пиковое значение плотности атомов). Если атомы являются фермионами, то охлаждение постепенно превращает такой газ в "море Ферми", в котором каждое состояние с энергией ниже энергии Ферми занято только одним атомом.

Таким образом, получить БЭК, в принципе, просто: надо охладить атомы до температуры, при которой волновые пакеты начинают перекрываться! Однако в большинстве случаев квантовому вырождению предшествуют более привычные для нас фазовые переходы в жидкое или твердое состояние. Эту обычную конденсацию газа в жидкость или кристалл можно "обойти" только при очень низких плотностях газа, порядка одной стотысячной доли от плотности атмосферного воздуха. При таких условиях время образования молекул или кластеров в результате трехчастичных столкновений (вероятность которых пропорциональна квадрату плотности) продлевается до нескольких секунд или даже минут. Скорость же двухчастичных упругих столкновений убывает пропорционально первой степени плотности, и поэтому такие столкновения будут происходить гораздо чаще. В результате тепловое равновесие для поступательных степеней свободы устанавливается быстрее, чем химическое, и квантовое вырождение может произойти в газовой фазе, которая в этом случае является метастабильной. Однако при таких чрезвычайно низких плотностях газа температура квантового вырождения понижается до нано- и микрокельвинов.

Получение бозе-эйнштейновского конденсата требовало, во-первых, выбора атомной системы, которая оставалась бы в газообразном состоянии вплоть до перехода к БЭК, и, во-вторых, создания такой техники охлаждения и удержания, которая позволила бы достичь диапазона искомых температур и плотностей. Даже в 1990 г. не было уверенности, что такая система существует в природе. Да, многие сомневались, что БЭК

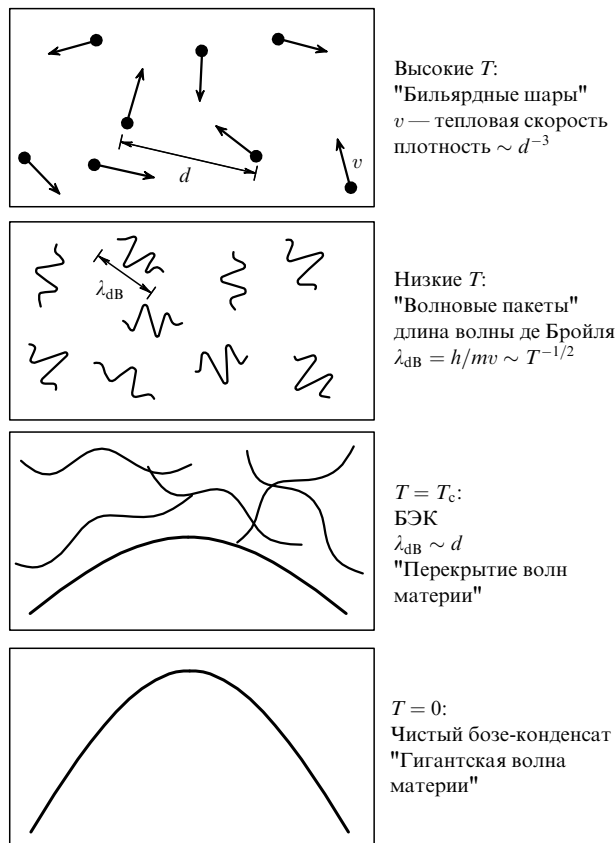


Рис. 2. Критерий бозе-эйнштейновской конденсации. При высоких температурах T слабо взаимодействующий газ можно рассматривать как систему бильярдных шаров. В упрощенном квантовом описании атомы можно считать волновыми пакетами с длиной волны де Бройля λ_{dB} . При температуре перехода к БЭК (T_c) λ_{dB} становится сравнимой с расстоянием между атомами, и образуется бозе-конденсат. Когда температура приближается к нулю, облако тепловых атомов исчезает, и остается чистый бозе-конденсат.

когда-либо будет достигнута и рассматривали ее получение как ложную цель. Другие считали, что поиски БЭК должны привести к новой интересной физике, но что при приближении к нужной области обязательно возникнут какие-нибудь неожиданные явления или технические ограничения, препятствующие БЭК. В статье 1994 г., напечатанной в разделе новостей [3], были процитированы слова Стива Чу: "Готов держать пари, что природа хочет спрятать от нас бозе-конденсацию. За последние 15 лет она много потрудилась для этого".

Если быть кратким, условия для возникновения БЭК в щелочных газах достигаются в результате применения двух методов охлаждения. На предварительном этапе используется лазерное охлаждение. Принцип лазерного охлаждения состоит в том, что рассеянные на атомах конденсата фотоны оказываются в среднем сдвинуты в фиолетовую сторону по сравнению с частотой падающего лазерного пучка. В результате рассеянный свет уносит больше энергии, чем поглощают атомы, что приводит к их охлаждению. Фиолетовое смещение вызывается доплеровским сдвигом или высокочастотным штарковским сдвигом. Различные схемы лазерного охлаждения описаны в Нобелевских лекциях по физике за 1997 г. [4–6]. После предварительного охлаждения атомы становятся достаточно холодными для того,

чтобы их можно было заключить в магнитную ловушку. Необходима ловушка, не имеющая стенок, в противном случае атомы прилипают к ее поверхности. Стоит заметить, что аналогичные магнитные ловушки используются для плазмы, которая слишком горяча для контейнера из любого материала. После захвата атомов в магнитную ловушку выполняется второй этап охлаждения — принудительное испарительное охлаждение [7–9]. Для этого уменьшают глубину ловушки, позволяя атомам с наиболее высокой энергией испаряться, в то время как атомы, оставшиеся в ловушке, термализуются при все более низких температурах. В большинстве экспериментов по БЭК квантовое вырождение достигается при температурах в интервале от 500 нК до 2 мК для плотностей между 10^{14} и 10^{15} см⁻³. Самые большие конденсаты получены для натрия — 100 миллионов атомов, и водорода — миллиард атомов; самые маленькие конденсаты содержат всего несколько сотен атомов. В зависимости от магнитной ловушки, форма конденсата может быть или приблизительно сферической с диаметром от 10 до 50 мкм, или сигарообразной, с диаметром 15 мкм и длиной 300 мкм. Полный цикл охлаждения, приводящий к образованию конденсата, может продолжаться от нескольких секунд до нескольких минут.

После этого краткого введения я хочу дать исторический обзор поисков БЭК и затем описать развитие событий, которое привело к наблюдению БЭК паров натрия в Массачусетском технологическом институте (МТИ). В конце статьи будет приведено несколько примеров, которые иллюстрируют новые физические явления, обнаруженные благодаря использованию бозе-эйнштейнских конденсатов. Более детальный отчет о работе моей группы можно найти в четырех исчерпывающих обзорах [8, 10–12].

2. БЭК и физика конденсированного состояния вещества

Бозе-эйнштейновская конденсация — одно из наиболее интригующих явлений, предсказанных квантовой статистической механикой. История развития теории БЭК весьма поучительна, она прекрасно описана в биографиях Эйнштейна [13], Лондона [14] и в обзоре Гриффина [15]. Например, Эйнштейн сделал свое предсказание еще до полного завершения квантовой теории и до того, как было осознано различие между бозонами и фермионами [16]. После Эйнштейна наиболее значительный вклад в теорию БЭК внесли Лондон, Ландау, Тисса, Боголюбов, Пенроуз, Онсагер, Фейнман, Ли, Янг, Хуанг, Беляев и Питаевский. Важнейшим вопросом теории БЭК всегда считалось установление связи между бозе-эйнштейновской конденсацией и сверхтекучестью в жидком гелии — вопрос, который вызвал острую дискуссию между Лондоном и Ландау (см. [14]). Работы Боголюбова, Беляева, Гриффина и др. показали, что БЭК дает микроскопическое обоснование "квантовой гидродинамики" Ландау. БЭК тесно связана со сверхпроводимостью, которая обусловлена бозе-эйнштейновской конденсацией куперовских пар. Таким образом, БЭК лежит в основе ряда макроскопических квантовых явлений.

БЭК уникальна в том смысле, что представляет собой чисто квантово-статистический фазовый переход, поскольку происходит даже в отсутствие взаимодействия.

Эйнштейн описывал этот переход как конденсацию "без сил притяжения" [16]. Это превращает БЭК в важную парадигму статистической механики, которая находит приложения в различных областях физики: в физике конденсированного состояния, ядерной физике, физике элементарных частиц и астрофизике [17]. С другой стороны, реальные частицы всегда взаимодействуют друг с другом, и поведение даже слабо взаимодействующего бозе-газа качественно отличается от поведения идеального бозе-газа [18]. Довольно долго считалось, что взаимодействие должно приводить к обычной конденсации (в твердое тело) прежде, чем наступит бозе-эйнштейновская конденсация. Единственным контрпримером был жидкий гелий, где малая масса атома в сочетании с большой величиной энергии нулевых колебаний препятствуют затвердеванию даже при абсолютном нуле температуры. В своем учебнике по термодинамике Эрвин Шрёдингер писал о БЭК в 1952 г.: "Для того чтобы получить сколько-нибудь заметное отклонение [от классической статистики], необходимы столь высокие плотности и столь низкие температуры, что ван-дер-ваальсово взаимодействие трудно будет отличить от возможного влияния вырождения, и маловероятно, что эти два эффекта когда-нибудь удастся разделить" [19]. При этом он не рассматривал разреженные системы в метастабильной газовой фазе!

Попытки реализовать БЭК в разреженных, слабо взаимодействующих газах предпринимались, по крайней мере, в трех различных направлениях: жидкий гелий, экситоны и атомарные газы. Экспериментальные [20, 21] и теоретические [22] исследования показали, что возникновение сверхтекучести жидкого гелия в вихре обладает чертами бозе-эйнштейновской конденсации в разреженном газе. При достаточно слабом напылении гелий, поглощенный пористым стеклом, проявлял свойства разреженного трехмерного газа. Однако интерпретация этих результатов не вполне однозначна [23].

Экситоны, представляющие собой слабо связанные электронно-дырочные пары, являются композитными бозонами. Физика экситонов в полупроводниках очень богата, в частности, возможно образование экситонной жидкости и биэкситонов. В прекрасных статьях [24, 25] обсуждалась возможность существования систем, в которых экситоны образуют слабо взаимодействующий газ. Однако первоначальные свидетельства о бозе-эйнштейновской конденсации в Si_2O [26] были затем опровергнуты [27]. Многообещающими являются последние исследования в системах со связанными квантовыми ямами [28]. Когда экситоны сильно взаимодействуют со светом в резонаторе, то образуются поляритоны. В таких поляритонных системах недавно наблюдалось вынужденное рассеяние и неравновесные конденсаты [29–31].

3. Спин-поляризованный водород

Разреженные атомарные газы отличаются от конденсированных систем, рассмотренных выше, отсутствием сильного взаимодействия. Взаимодействие в плотных жидких или твердых телах изменяет и усложняет природу фазового перехода. Используя квантовую теорию для описания соответствующих состояний, Хечт [32] и Стволли и Носанов [33] показали, что спин-поляризованный водород может оставаться в газовой фазе вплоть до абсолютного нуля и поэтому представляет собой под-

ходящий объект для реализации бозе-эйнштейновской конденсации в разреженном атомарном газе. Это предположение стимулировало многочисленные экспериментальные исследования, из которых следует особо отметить работы Сильверы и Валравена в Амстердаме и Грейтака и Клеппнера в МТИ. Проводились также эксперименты в Москве, Турку, Британской Колумбии (Канада), Корнелле, Гарварде и Киото. Получение стабильного спин-поляризованного водорода [34, 35] породило большие надежды в отношении возможности исследования квантово-вырожденных газов. Первоначально эксперименты включали в себя заполнение криогенных ячеек спин-поляризованным газом с последующим сжатием, а начиная с 1985 г. — захват в магнитные ловушки и испарительное охлаждение. Наконец, в 1998 г. Клеппнер и Грейтак с сотрудниками получили БЭК [36]. Работы [9, 37–39], и особенно [40], дают полное представление об истории получения БЭК в атомарном водороде. Сообщение о фазовом переходе в двумерном случае было опубликовано в 1998 г. [41].

Исследования в щелочных газах опираются на работы по спин-поляризованному водороду в следующих аспектах:

- Изучение спин-поляризованного водорода показало, что существуют системы, которые могут оставаться в метастабильном газовом состоянии, близком к условиям БЭК. Теперь задача состояла в том, чтобы найти интервалы плотностей и температур, в которых эта метастабильность достаточна для реализации БЭК.

- Многие аспекты физики БЭК в неоднородном поле [42–44] и теория "холодных столкновений" (см., например, [45]), развитая в 1980-х годах для водорода, могли быть непосредственно применены к щелочным газам.

- Техника испарительного охлаждения, разработанная для водорода [7, 46], была затем использована для щелочных атомов.

4. Лазерное охлаждение

Лазерное охлаждение открыло новую страницу в физике сверхнизких температур. Эксперименты по лазерному охлаждению с вакуумной камерой при комнатной температуре и простой оптической приставкой сильно отличаются от криогенных ячеек с их многослойной термической защитой. В результате число элементов, которые можно исследовать при сверхнизких температурах, значительно возросло: от гелия и водорода перешли к щелочным атомам, метастабильным инертным газам, некоторым щелочноземельным атомам и т.д. (список элементов, подвергающихся лазерному охлаждению, продолжает расти). Исчерпывающее описание принципов и техники лазерного охлаждения можно найти в [47–49] и в Нобелевских лекциях лауреатов 1997 г. Чу, Козна-Тануджи и Филиппа [4–6].

В некоторых статьях, опубликованных в начале и в середине 1980-х годов, до создания основных методов охлаждения и захвата и в процессе их развития, квантовое вырождение газа упоминалось как очевидная цель этого нового зарождающегося направления [50–52]. Однако вскоре стали ясны ограничения на возможности лазерного охлаждения и захвата. Хотя не существует фундаментального закона, ограничивающего достижимые температуры снизу, реально получаемые с помощью поляризационно-градиентного охлаждения температу-

ры — порядка десяти энергий отдачи — рассматривались как практический предел. Техника, позволяющая довести охлаждение до температур более низких, чем энергия отдачи, была значительно более сложной (особенно в трехмерном случае), и процесс охлаждения требовал большего времени. Число охлаждаемых атомов и их концентрация были ограничены неупругими столкновениями, индуцированными светом (приводящими к потерям в ловушках [53, 54]) и поглощением рассеянного излучения лазера [55], что приводило к возникновению направленного наружу радиационного давления (ослабляющего потенциал ловушки и ограничивающего концентрацию атомов). Из-за того, что самые низкие температуры не могли быть достигнуты для высоких плотностей газа [56–58], такая техника давала максимальное значение фазовой плотности $n\lambda_{dB}^3 = 10^{-5}$, в то время как для получения БЭК необходимо значение 2,612. Такова была ситуация к 1990 г., когда автор занялся исследованиями холодных атомов. Значительное увеличение фазовой плотности с помощью лазерного охлаждения было достигнуто лишь недавно [59–61], но до сих пор не удалось получить БЭК, используя только лазерное охлаждение.

5. Исследования в МТИ (1990–1996 гг.)

5.1. Усовершенствование лазерного охлаждения

Когда в 1990 г. я начал работать с Дэйвом Притчардом в МТИ в качестве постдока, первоначальные усилия были направлены на получение интенсивного источника холодных атомов для изучения холодных столкновений и изолированных протяженных молекул. В то же время мы с Дэйвом часто обсуждали ограничения на плотности и температуры, которые накладывала имеющаяся техника, и пытались придумать, как их можно обойти. Один из недостатков магнитных ловушек заключается в том, что они удерживают атомы только в таких состояниях сверхтонкой структуры, для которых энергетически выгодно слабое поле ("атомы, ищущие слабое поле"). Поэтому столкновение двух захваченных атомов может приводить к перевороту спина (дипольная релаксация). При этом зеemannовская энергия превращается в кинетическую энергию. Этот процесс стал главным препятствием в опытах с атомарным водородом.

Сначала мы задались вопросом, может ли влияние электрического или гравитационного полей стабилизировать захваченные атомы в нижнем состоянии сверхтонкой структуры? — ответ оказался отрицательным [62]. Другой выход из положения заключался в использовании переменного магнитного поля. Основываясь на идее, предложенной ранее в [63], я спланировал эксперимент по захвату атомов натрия с помощью переменного магнитного поля, что казалось осуществимым. Однако мы узнали, что Эрик Корнелл в Боулдере предложил аналогичную схему и уже реализовал ее в эксперименте [64]; поэтому мы не стали ее повторять. И этот случай, когда Эрик и я независимо и почти одновременно пришли к одной и той же идее, был далеко не последним!

Для того чтобы получить БЭК, не обязательно захватывать атомы, находящиеся на нижнем уровне сверхтонкой структуры. Еще в 1986 г. Притчард оценил константы скорости упругих и неупругих столкновений щелочных атомов [52]. С помощью этих оценок было

легко предсказать, что для щелочных атомов, в противоположность водороду, так называемые "хорошие" столкновения (упругие столкновения, необходимые для испарительных процессов) заметно преобладают над "плохими" столкновениями (неупругими двух- и трехчастичными); поэтому испарительное охлаждение в щелочном газе, вероятно, не имело бы ограничений из-за собственных потерь и нагревания. Однако по этому поводу царил полный пессимизм [65] и скептицизм, и упомянутые выше экспериментальные [64] и теоретические [62] работы по ловушкам для атомов, "ищущих сильное поле", следует рассматривать именно в таком контексте.

В те годы высказывались предположения, что зависящий от времени потенциал мог бы привести к сильному охлаждению, но мы показали, что это невозможно [66]. Для реального охлаждения нужна открытая система, которая допускала бы понижение энтропии при лазерном охлаждении — за счет рассеянных фотонов, при испарительном охлаждении — за счет покидающих систему атомов. Мы вместе с Дэйвом пытались найти новые способы лазерного охлаждения. В 1991 г. на летней школе в Варенне Дэйв предложил новую трехуровневую схему охлаждения [67]. Вдохновленный его идеей, я предложил метод, использующий рамановские переходы. Заменяя в оптической патоке шесть лазерных пучков встречными пучками, управляющими рамановскими переходами на доплеровских сдвигах, мы надеялись получить доплеровскую патоку с шириной линии, пропорциональной скорости оптической накачки; благодаря этому ширину линии можно было бы подбирать нужным образом. Мы уже начали для реализации этой идеи устанавливать радиочастотные (РЧ) электронные и магнитные экраны, когда вдруг узнали, что Марк Касевич и Стив Чу работают над рамановским охлаждением с помощью лазерных импульсов [68]. По этой причине и отчасти потому, что приблизительно в это же время мы разработали идею ловушки с "темным пятном" (dark spontaneous-force optical trap (SPOT)), которая описана ниже в этом разделе, мы прекратили нашу работу над рамановским охлаждением.

Наши экспериментальные исследования в те годы были, в первую очередь, связаны с генерацией интенсивных потоков медленных атомов. В первые месяцы моей работы в МТИ, вместе с Крисом Хелмерсоном и Мин Сяо мы собрали магнитооптическую ловушку (МОЛ) с испарительной ячейкой для натрия. Эта идея возникла под влиянием эксперимента, выполненного в Боулдере [69], но мы надеялись значительно увеличить скорость загрузки, с помощью дополнительных частот (или частотных чирпов) с красной стороны от резонансной D_2 линии натрия. Эта надежда оказалась тщетной. Сначала мы подозревали, что соседние уровни сверхтонкой структуры натрия дают негативную интерференцию, но позже было показано, что эта схема не работает также и для цезия [70] из-за неправильного выбора рабочего цикла чирпов. Однако если не считать имевшуюся криогенную установку, от которой вскоре отказались, это была первая магнитооптическая ловушка, созданная в МТИ (первые исследования Дэйва Притчарда по магнитооптическому захвату проводились в Bell Labs в сотрудничестве с группой Стива Чу). После этого мы (Майкл Иоффе, Алекс Мартин, Дэйв Притчард и я) направили наши усилия на замедление пучка, отказавшись от попытки реализации зеemanовского охлаждения

в пользу замедления изотропным светом [71]. В этой схеме атомы пропускаются через ячейку с диффузно отражающими стенками и облучаются изотропным светом. При смещении частоты света в красную сторону атомы преимущественно поглощают свет, направленный противоположно их движению, и поэтому замедляются. Эксперимент получился и доставил нам много радости. Однако требования к мощности лазера и к диапазону скоростей захвата в этом методе были более строгими, чем при зеemanовском охлаждении и поэтому мы решили сконструировать оптимизированный зеemanовский замедлитель.

Мы использовали новый метод Грэга Лафаййтиса, в котором магнитное поле возрастало, а не убывало, как в обычном зеemanовском замедлителе [72]. Мы сообразили, что в точке максимума магнитного поля можно будет применить дополнительное поперечное лазерное охлаждение, чтобы сколлимировать медленный пучок. Аспирант Майкл Иоффе намотал соленоид, который имел радиальные входы для четырех внешних лазерных пучков. Коллимация работала [73], но не так хорошо, как хотелось бы, и мы решили, что это небольшое преимущество не стоит дополнительных усложнений. Однако даже без коллимации наш зеemanовский замедлитель давал один из самых мощных потоков медленных атомов, известных к тому времени, и вскоре после этого мы уже имели магнитооптическую ловушку, удерживающую большое облако атомов натрия. Оглядываясь назад, я поражаюсь тому, как много различных схем мы реализовали и опробовали, но, по-видимому, это было необходимо, чтобы выбрать оптимальный подход.

Летняя школа по лазерному охлаждению в Варенне в 1991 г. запомнилась мне по нескольким причинам. Прошел всего год с тех пор, как я начал заниматься исследованиями холодных атомов, и в Варенне я впервые познакомился со многими коллегами, с которыми у меня потом установились продолжительные отношения. У меня сохранилось живое воспоминание, как однажды днем мы сидели с Дэйвом Притчардом рядом с местом, где проходили заседания. Перед нами открывался прекрасный вид на озеро Комо, и мы разговаривали о грандиозных целях нашей науки и о том, как их достичь. Поддержка Дэйва была очень важна для меня и помогла укрепить мою уверенность в том, что я правильно выбрал новую область исследований. Мы говорили о том, что интересовало нас уже довольно давно — о преимуществах объединения лазерного и испарительного охлаждений и способах его осуществления.

Эксперименты со спин-поляризованным водородом в МТИ [7] показали, что испарение можно осуществить в магнитной ловушке, используя индуцированные радиочастотным полем перевороты спинов, как предложил Притчард с сотрудниками в 1989 г. [74]. Магнитное пленение вместе с лазерным охлаждением уже применялось в первых экспериментах по магнитному захвату в Национальном институте стандартов и технологий (НИСТ) [75] и МТИ [76] и в экспериментах по доплеровскому охлаждению магнитно-плененных атомов в МТИ [74, 77]. В 1990 г. в Боулдере была осуществлена загрузка магнитной ловушки из магнитооптической ловушки и оптической патоки [69]. Способы получения БЭК с помощью лазерного охлаждения описаны Монро, Корнеллом и Виманом в [78]. Таким

образом, к 1990 г. была известна большая часть подходов, которые впоследствии составили метод получения БЭК, но оставались сомнения в том, что их удастся объединить в одно целое.

Лазерное охлаждение лучше всего работает при низких плотностях, когда практически отсутствует поглощение света и индуцированные светом столкновения. В то же время испарительное охлаждение требует высокой интенсивности столкновений и высокой плотности. Проблема состоит в том, что сечение рассеяния света слишком велико: оно имеет порядок 10^{-9} см², тогда как сечение упругих столкновений атомов в тысячу раз меньше. Теперь, оглядываясь назад, можно сказать, что для получения образца с временем жизни гораздо больше времени между двумя столкновениями, достаточно было после лазерного охлаждения провести сильное магнитное сжатие и иметь сверхвысокий вакуум, как недавно показали исследователи из Rice University [79]. Однако тогда мы считали, что в лазерное охлаждение должно быть внесено значительное усовершенствование, чтобы преодолеть брешь между плотностями в этих двух схемах охлаждения. Мы с Дэйвом обсуждали, как можно обойти ограничения на плотность в МОЛ. Мы рассматривали схемы когерентного захвата, когда используются атомы в когерентном суперпозиционном состоянии, в котором не происходит поглощения света. У нас были некоторые соображения относительно того, как можно было бы атомы вблизи центра ловушки переводить в это "темное" состояние, но количественные оценки были не слишком обнадеживающими. Спустя несколько месяцев появилась простая идея. Если так называемый перекачивающий луч будет иметь тень в центре МОЛ, атомы останутся там в нижнем состоянии сверхтонкой структуры и не будут поглощать свет, почти резонансный для атомов в верхнем состоянии сверхтонкой структуры. В МОЛ плотность ограничена потерями из-за столкновений, вызывающих возбуждение, и многократным рассеянием света, которое эффективно приводит к отталкиванию атомов. Когда атом находится в "темном месте", удерживающие силы ослабевают на множитель, пропорциональный вероятности того, что атом находится в резонансном состоянии сверхтонкой структуры. Однако для отталкивания необходимо, чтобы оба атома находились в резонансном состоянии, а величина силы отталкивания уменьшается пропорционально квадрату этого множителя. Поэтому в результате, когда атомы находятся в темноте, удержание становится более эффективным. Конечно, такая схема работает не всегда: она становится неприменимой, когда размер облака определяется уже не балансом удерживающих сил и сил отталкивания, а его конечной температурой.

По сравнению с обычной МОЛ выигрыш в плотности для этой схемы, названной ловушкой с "темным пятном", тем значительнее, чем больше число плененных атомов. Поэтому в 1992 г., прежде чем применить эту идею, мы довели МОЛ до гигантских размеров. Установка заработала почти сразу, и мы были очень взволнованы появлением теней плененных атомов, когда они облучались пробным пучком. Мы пришли к выводу, что пробный свет ослабляется более чем в e^{-100} раз [80]. Это означало, что мы получили облако холодных атомов, которое не имело аналогов по количеству атомов и их плотности.

5.2. Объединение лазерного и испарительного охлаждений

Последующие недели и месяцы были для нас очень волнующими. Что делать дальше? Дэйв Притчард планировал использовать эту ловушку для исследования холодных столкновений и фотоассоциаций — и, действительно, другие группы добились большого успеха в этих направлениях [81, 82]. Но была еще заманчивая перспектива объединения лазерного и испарительного охлаждений. Наши оценки дали частоту упругих столкновений в ловушке с "темным пятном" около 100 Гц [80], которая, как нам казалось, более чем достаточна для того, чтобы получить "нарастающее" испарительное охлаждение в магнитной ловушке. После непродолжительных дискуссий наша группа решила выбрать более амбициозную цель — испарительное охлаждение, что было связано с определенным риском. Это был один из тех редких моментов, когда вся группа резко меняет направление исследований. Еще до того, как мы написали статью о ловушке с "темным пятном", мы заказали оборудование, необходимое для получения сверхвысокого вакуума (СВВ) и магнитного удержания. Все денежные средства лаборатории теперь были направлены на достижение испарительного охлаждения натрия. Ловушка с "темным пятном" была значительным достижением в получении одновременно большого числа атомов и их высокой плотности при лазерном охлаждении. Ее появление стало решающим моментом для работ по БЭК как в Боулдере [83], так и в МТИ [84], и она до сих пор используется во всех экспериментах по БЭК с натрием (но не с рубидием).

Следующим шагом было конструирование магнитной ловушки с сильным удержанием. Для этой цели мы решили использовать сферическую квадрупольную ловушку, которая состояла просто из двух катушек с противоположной намоткой — это устройство использовалось в первых демонстрациях магнитного пленения [75]. Мы понимали, что эффективность этой ловушки будет ограничена переворотами Майораны в центре ловушки, где магнитное поле равно нулю. В слабом магнитном поле атомный спин прецессирует недостаточно быстро, чтобы следовать за изменением направления магнитного поля — результатом является переход на другой зеemanовский подуровень, на котором атом не захватывается, что приводит к потерям атомов из ловушки. Мы оценили интенсивность майорановских переворотов, но оставалась некоторая неопределенность нормирующего множителя. Тем не менее нам казалось, что перевороты Майораны станут существенными только после того, как облако сожмется в результате испарительного охлаждения, поэтому они не должны препятствовать демонстрации комбинированного лазерного и испарительного охлаждения. После того, как Майкл Иоффе представил наш подход с квадрупольной ловушкой на конференции QELS в 1993 г., Эрик Корнелл сообщил мне, что он независимо пришел к тому же заключению. В 1993 г. моя группа доложила на конференции OSA в Торонто о переводе атомов из ловушки с "темным пятном" в магнитную ловушку и об эффекте разрезания облака РЧ полем, вызывающим перевороты спинов [85].

Приблизительно в это время я начал работать в МТИ в качестве доцента. Дэйв Притчард сделал мне беспрецедентное предложение: если я останусь в МТИ, он

передает мне действующую лабораторию и два гранта на исследования. Чтобы я был уверен в том, что мне оказано полное доверие для проведения работ по БЭК, он решил более не заниматься этими исследованиями, которые он сам инициировал, и предоставил мне полную ответственность и независимость. Дэйв сказал, что он хотел бы сосредоточиться на двух других направлениях своей работы: измерении массы отдельного иона и атомной интерферометрии, хотя то, что он мне передал, было самым актуальным направлением его творческой деятельности. До сих пор я с благодарностью вспоминаю его великодушные и доброе наставничество. Два аспиранта, работавшие по этому проекту, Кен Дэвис и Марк-Оливер Мьюз, которые начали делать диссертации соответственно в 1991 г. и 1992 г., размышляли, остаться ли им с Дэйвом Притчардом и заниматься его экспериментами или продолжить работы по БЭК во вновь созданной группе, возглавляемой малоизвестным доцентом. Оба они выбрали последнее, и мы без промедления принялись за работу вместе с Майклом Эндрусом, который присоединился к нашей группе летом 1993 г.

В течение нескольких месяцев мы были вынуждены отвлечься от нашей основной цели — испарительного охлаждения. Температуры нашей оптической патоки были выше тех, которые были опубликованы группой из НИСТ [86], и мы понимали, что для достижения более низких температур, чем полученные в НИСТ, необходимо изучить состояние вопроса. Мы подозревали, что какую-то роль в этом играет более высокая плотность атомов, но сначала мы должны были улучшить технику измерения температуры. Наша цель состояла в изучении соотношения параметров "темной" патоки, в которой большая часть атомов накачивалась в "темное" состояние сверхтонкой структуры. Кроме того, это была хорошая работа для аспирантов, чтобы они могли отточить свое мастерство и развить самостоятельность. Через несколько месяцев мы добились некоторого прогресса, но я был озабочен отставанием от группы в Боулдере и возникающей конкуренцией с ними. Мы решили оставить этот проект и возобновить наши работы по испарительному охлаждению. И вплоть до настоящего времени мы так и не реализовали точную методику измерения температуры, достигаемой при лазерном охлаждении — это оказалось не так уж важно.

Весной 1994 г. мы обнаружили первые признаки увеличения фазовой плотности атомов при испарительном охлаждении. Эти результаты были представлены нами в приглашенном докладе на Международной конференции по квантовой электронике (IQEC) в мае 1994 г. На этой же конференции группа из Боулдера сообщила об аналогичных результатах и об ограничениях из-за переворотов Майораны при понижении температуры. Было ясно, что следующим шагом должно быть усовершенствование магнитной ловушки, чтобы можно было захватывать атомы в отклоняющем поле, которое бы подавляло перевороты Майораны. На этой конференции я выступил с идеей "оптической пробки": сфокусированный на точку нулевого магнитного поля лазерный луч с частотой, смещенной в фиолетовую сторону, должен вызывать отталкивательное дипольное взаимодействие атомов и не подпускать их к месту утечки (рис. 3). Идея казалась мне совершенно очевидной, и я ожидал, что боулдерская группа должна

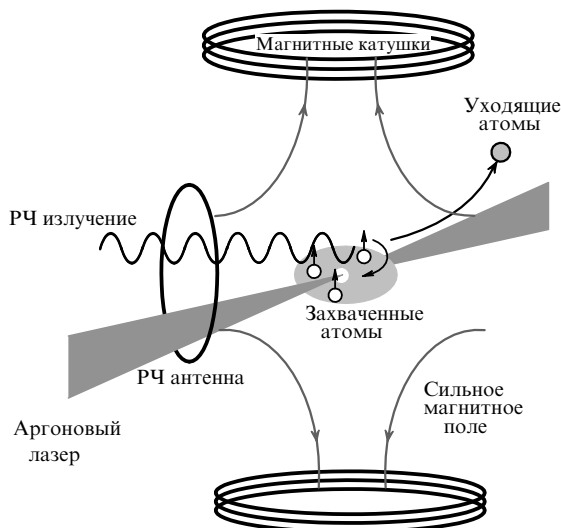


Рис. 3. Экспериментальная установка для охлаждения атомов до состояния бозе-эйнштейновской конденсации. Атомы натрия захватываются сильным магнитным полем, создаваемым двумя катушками. В центре магнитное поле обращается в нуль, в результате происходят перевороты спинов, и атомы покидают ловушку. Поэтому атомы удерживаются вне центра ловушки мощным (3,5 Вт) пучком аргонового лазера ("оптической пробкой"), который вызывает отталкивание атомов. Испарительное охлаждение контролируется радиочастотным полем, излучаемым антенной. Радиочастотное поле избирательно переворачивает спины атомов с наиболее высокой энергией. Оставшиеся атомы повторно термализуются при более низкой температуре благодаря столкновениям друг с другом. Испарительное охлаждение усиливается с понижением частоты РЧ поля.

прийти к чему-то аналогичному. И только на следующей за IQEC Международной конференции по атомной физике (ICAP, 1994 г.) в Боулдере [87], где я рассказывал о нашем подходе, я узнал, что Эрик Корнелл предложил подавлять перевороты Майораны с помощью быстро вращающегося магнитного поля (time orbiting potential) — так называемая TOP-ловушка [88]. Однако мы не сразу реализовали нашу идею об оптической пробке. Сначала надо было задокументировать наши наблюдения по испарительному охлаждению. Мы понимали, что наша флуоресцентная диагностика не подходит, и применили визуализацию поглощения, что стало теперь обычным методом наблюдения бозе-эйнштейновской конденсации. В то время мы занялись получением прямого изображения плененного облака (без его баллистического расширения). Майкл Эндрус и Марк-Оливер Мьюз разработали сложную компьютерную программу для моделирования визуализации поглощения в неоднородном магнитном поле. Мы считали эту программу весьма полезной, но затем мы быстро продвинулись в область гораздо более низких температур, при которых неоднородные зеемановские сдвиги становились меньше ширины линии, и после нашей первой статьи по испарительному охлаждению [89] больше никогда не использовали эту программу.

В конце 1994 г. у нас произошла авария — "плавление активной зоны". Магнитная ловушка была включена без водяного охлаждения, и серебряный припой, соединяющий катушки, расплавился. Поскольку тогда магнитные катушки помещались внутри вакуумной камеры, произошла резкая потеря вакуума, и большую часть нашей

установки пришлось разобрать. Я никогда не забуду вид катушек, с которых капала вода, в смотровом окне СВВ-камеры. Это произошло всего за несколько часов до того, как нашу лабораторию посетил президент МТИ Чарлз Вест, чтобы из первых рук получить информацию о некоторых исследованиях, выполняемых на факультете. Он также запомнил это событие. Мы потеряли недели или даже месяцы в ситуации жесткой конкуренции. Я был совершенно обескуражен и предложил своим сотрудникам сначала пойти выпить пива, а затем решать, что делать дальше, но аспиранты тут же вытащили гаечные ключи и начали восстанавливать установку. Я был тронут, видя их преданность делу и присутствие духа даже в такое трудное время. Мы заменили магнитную ловушку на гораздо более надежную. Это оказалось очень существенным для создания ловушки с "пробкой", когда важна точная юстировка лазерного луча относительно центра магнитного поля. Так что теперь можно сказать, что произошедшая авария не вызвала большую задержку в работе.

В начале 1995 г. я сказал трем своим аспирантам, что выделенные нам деньги быстро уходят, и необходимо, чтобы хотя бы один из выдвинутых нами двух проектов был одобрен. В противном случае мы не сможем расходовать деньги в том темпе, как это мы делали ранее, и наша работа замедлится. К счастью, в апреле 1995 г. Национальный научный фонд сообщил, что мой проект будет поддержан. Теперь, семь лет спустя, любопытно взглянуть на некоторые замечания, сделанные рецензентами: "Представляется, что необходимы значительные усовершенствования [чтобы достичь БЭК] ... современные методы настолько далеки от достижения диапазона, необходимого для БЭК, что пока невозможно ... дать какие-либо оценки"; "Научное значение, кроме важности получения БЭК, остается неясным". И третий рецензент: "...предложено несколько конкретных (или реалистичных) экспериментов, которые могут быть осуществлены с конденсатом". Несмотря на скептицизм, все рецензенты сделали заключение, что предлагаемые эксперименты "являются полезными и заслуживают финансовой поддержки". После того как пришло извещение о финансировании, которое вся группа отметила праздничным ужином, я, наконец, мог привлечь к работе четвертого аспиранта (Доллина Дерфи), который проявил интерес к нашей работе еще за несколько месяцев до этого.

В конце декабря 1994 г. мы отправили в печать статью по испарительному охлаждению и теперь могли сосредоточиться на "оптической пробке". Надо было выяснить, как юстировать мощный луч аргонового лазера и как пропустить его через множество поглотителей без больших искажений. Когда "пробка" была установлена, результат оказался впечатляющим (рис. 4). Мы сразу же смогли получить охлаждение до более низких температур и удерживать намного большее число атомов. В процессе испарения облако становилось настолько холодным и сжатым, что мы не могли его оптически разрешить. Наибольшее из измеренных значений фазовой плотности было все же в тридцать раз меньше требуемого для БЭК, но, возможно, мы были еще ближе. Мы успели провести лишь несколько экспериментов, когда столкнулись с серьезной вакуумной проблемой. Сначала мы пытались получать пространственные изображения, но столкнулись с ограничениями из-за



Рис. 4. Картина поглощения облаками атомов, захваченных в "оптически запертую" ловушку. (а) Облако уже холоднее, чем в случае без "оптической пробки" (луч аргонового лазера). (б) Облако расщеплено на два "кармана", расположенных около двух минимумов потенциала. (в) Облако, размер которого приближается к оптическому разрешению (≤ 10 мкм), все еще поглощает 90 % пробного света. Этот случай соответствует верхней границе температуры (≤ 10 мК) и нижней границе плотности (5×10^{12} см $^{-3}$).

недостаточного разрешения, тогда как фиксирование баллистического расширения времяпролетным методом не зависело от этого ограничения. Мы также считали, что БЭК может быть достигнута при более низких плотностях и для больших облаков, и поэтому занялись адиабатической декомпрессией, но столкнулись с проблемой смещения точки нулевого магнитного поля от положения "пробки".

В эти месяцы нам досаждали проблемы, связанные с вакуумом. Катушки, помещенные в вакуум, странным образом выделяли газ, и вакуум постепенно ухудшался. Весной и летом 1995 г. мы несколько раз прогревали СВВ-камеру для обезгаживания. Кроме того Кен Дэвис должен был писать диссертацию и не работал в лаборатории. Интересно вспомнить мои оценки положения дел в нашей науке в те месяцы. Я не понимал, что БЭК была уже совсем близко. В группе Тома Грейтака и Дана Клепшнера еще в 1991 г. была достигнута температура, всего лишь в 3,5 раза превышавшая температуру фазового перехода БЭК [90], но им потребовалось несколько лет, чтобы продвинуться дальше. Так что я приготовился к долгому пути — преодолению последнего порядка величины для достижения БЭК.

К этому времени к группе присоединились аспирант Дан Керн (теперь Дан Стэмпер-Керн) и мой первый постдок Клаас-Ян ван Друтен. После нескольких месяцев работы над проблемой вакуума и некоторыми другими проблемами мы как раз собрались опять запустить установку, как вдруг услышали о прорыве в Боулдере в июне 1995 г. Мы лихорадочно сделали несколько попыток запереть ловушку сфокусированными пучками и световыми полосами и испытали несколько способов испарения, но все было напрасно. Облако исчезало в тот момент, когда оно становилось очень холодным. Мы подумали, что за это может быть ответственно дрожание лазерного пучка, и, когда акселерометр показал вибрации вакуумных камер, мы решили немедленно отказаться от всех турбомеханических насосов. К сожалению, при замене турбонасоса на термостате на ионный насос в СВВ-камере произошла утечка, и нам пришлось провести еще одно продолжительное обезгаживание. Мы также добивались точечной стабилизации "оптической пробки". Но когда, наконец, мы получили БЭК, то поняли, что это не улучшало охлаждения.

Это были трудные месяцы для меня. Группа в Rice University охладила литий до квантового вырождения [79]. Открывалась новая область физики холодных атомов, и я опасался, что наш подход с натрием и

"оптической пробкой" окажется безуспешным, и мы утратим творческий порыв. Я рассматривал различные варианты действий. Некоторые коллеги советовали мне применить хорошо зарекомендовавшую себя ТОР-ловушку, использованную в Боулдере. Но я уже начал исследовать несколько возможных конфигураций магнитного удержания. Я понял, что сильно вытянутая ловушка Иоффе–Притчарда с регулируемым управляющим полем может обеспечить хорошее удержание, и это будет эквивалентно или даже лучше ТОР-ловушки. К августу 1995 г. Дан Керн разработал оптимальную конфигурацию поля за счет намотки катушек в виде трилистника [91]. Я предполагал, что вся группа будет работать в этом новом направлении, но некоторые члены нашей группы хотели провести еще несколько экспериментов на ловушке "с пробкой", чтобы, по крайней мере, установить, насколько близко можно подойти к БЭК с помощью нашего первоначального метода. К счастью, мы последовали этому предложению — всегда полезно прислушиваться к мнению своих сотрудников.

5.3. БЭК в натрии

Такова была ситуация к 29 сентября 1995 г., когда мы впервые увидели БЭК в натрии. На этот раз мы проводили измерения времени жизни плененных атомов и хотели получить характеристики возможных процессов нагревания. При нашем сверхвысоком вакууме, казалось

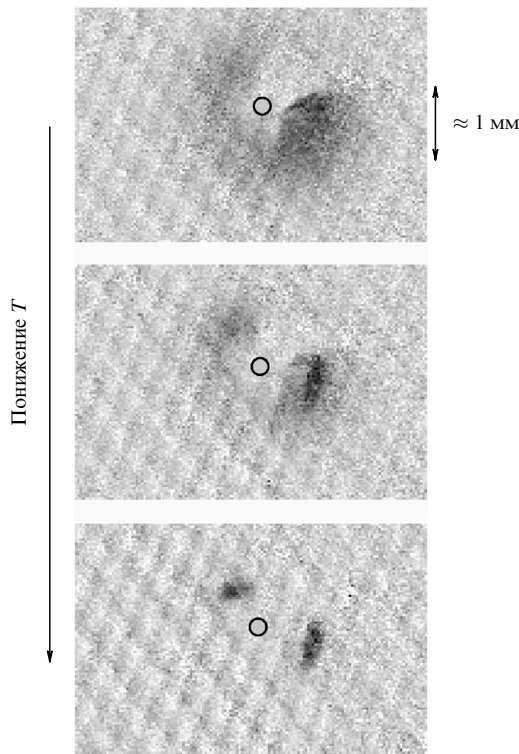


Рис. 5. Времяпролетное изображение поглощения в первых конденсатах, полученных в МТИ ночью 29 сентября 1995 г. После того, как выключалась магнитная квадрупольная ловушка, атомное облако испытывало баллистическое расширение. Однако, поскольку "оптическая пробка" (изображенная черным кружком) не могла быть удалена в момент выключения ловушки, происходило искажение расширяющегося облака. По мере понижения температуры (сверху вниз на рисунке) появляется все более резкая тень, свидетельствующая о наличии конденсата.

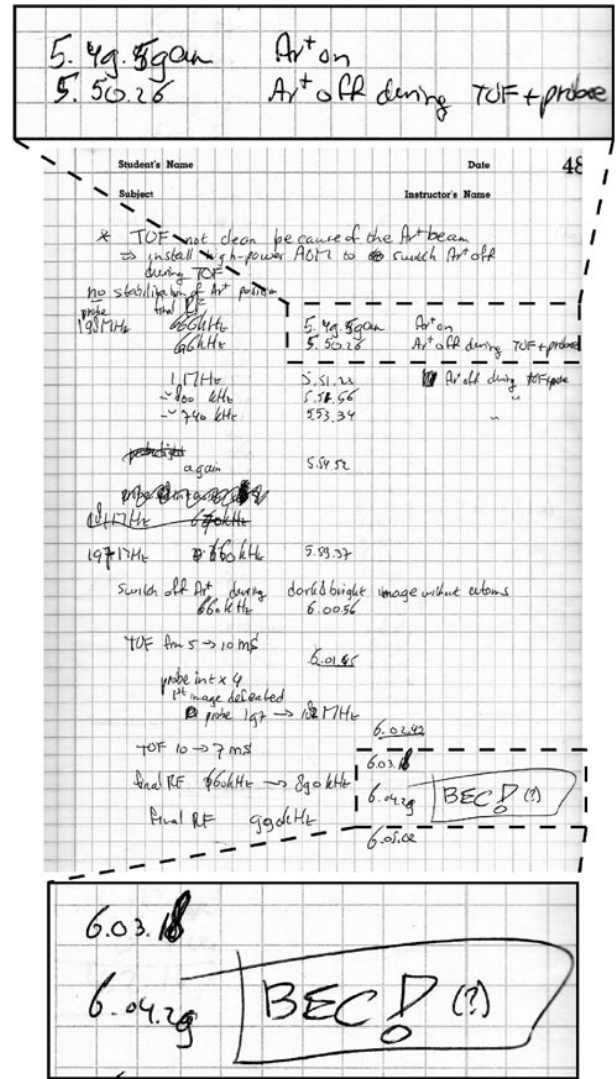


Рис. 6. Одна из страниц лабораторного журнала, заполненная в течение ночи 29 сентября 1995 г., когда БЭК впервые наблюдалась в МТИ. Запись сделал Клаас-Ян ван Друтен. В 5:50 утра мы установили новый акустооптический модулятор для выключения "оптической пробки" (пучка аргонового лазера). Спустя пятнадцать минут мы получили первое неопровержимое свидетельство возникновения БЭК в натрии.

бы, более эффективным должно быть медленное испарение. Однако мы обнаружили, что быстрое испарение работает гораздо лучше. Это ясно указывало, что существуют какие-то другие потери или процессы нагревания, например, из-за флуктуаций положения "пробки". Около 11:30 утра в лабораторном дневнике было записано, что измерения времен жизни ненадежны, но показывают, что они имеют порядок десяти секунд, что достаточно для продолжения испарения. Через несколько минут мы увидели какие-то темные пятна на времяпролетных изображениях поглощения, но они были сильно искажены, поскольку запирающий луч, который мы не могли выключить, расталкивал атомы и во время баллистического расширения (рис. 5). Внезапное появление темных пятен указывало на появление групп атомов с очень малыми относительными скоростями. В течение нескольких часов мы регистрировали появление этих пятен, но потом решили, что дальнейший прогресс

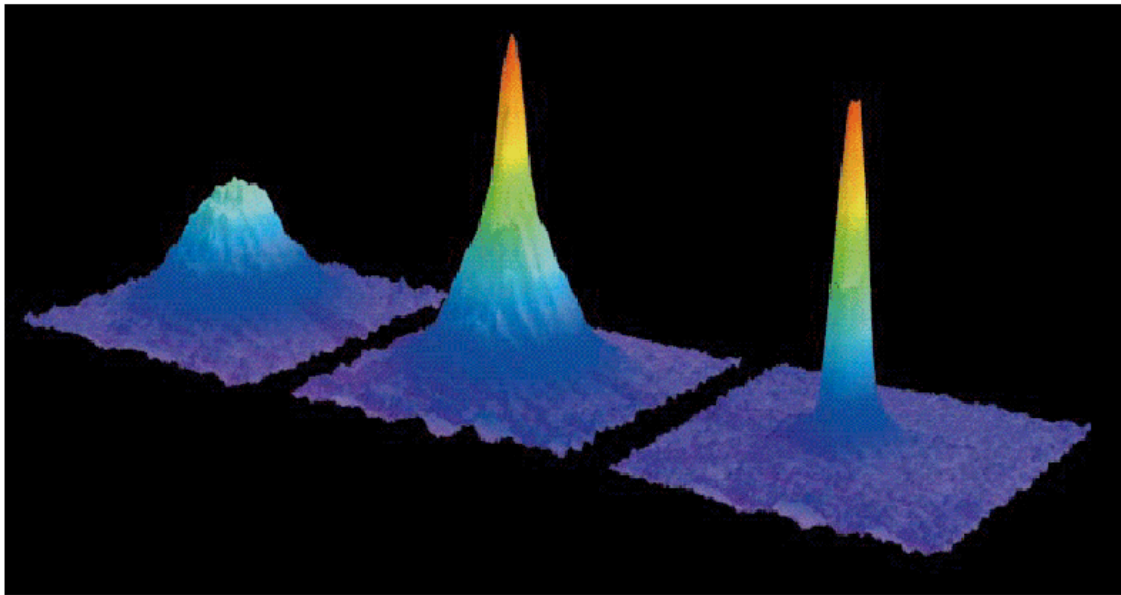


Рис. 7. Наблюдение бозе-эйнштейновской конденсации по картине поглощения. Показано поглощение в зависимости от двух пространственных координат. Бозе-эйнштейновский конденсат испытывает медленное расширение, сфотографированное после 6 мс разлета. На левом снимке показано расширенное облако, охлажденное до температуры, чуть выше точки фазового перехода; на среднем — сразу же после образования конденсата; на правом — почти идеальный конденсат после дальнейшего испарительного охлаждения. Полное число атомов, участвовавших в фазовом переходе порядка 7×10^5 , температура в точке перехода 2 мК.

может быть осуществлен при применении акустооптического модулятора для выключения "оптической пробки". Ранним утром, между 4:00 и 5:30 мы подготовили оптику и высокочастотную (ВЧ) электронику и, наконец, сумели выключить аргоновый лазер во время баллистического расширения. Спустя 15 минут мы наблюдали двухкомпонентное распределение, которое сейчас считается основным признаком БЭК. Страницы лабораторного журнала, заполненные в эту ночь, сохранили волнение того момента (рис. 6).

Эти первые измерения были выполнены с помощью получения изображения атомов в нижнем состоянии сверхтонкой структуры ($F = 1$). В следующий раз, спустя несколько дней, мы применили оптическую накачку на циклическом $F = 2$ переходе и получили изображение с гораздо лучшим отношением сигнала к шуму. Переход к БЭК был очень резким (рис. 7). Анимационное представление полученных в этом эксперименте данных (выполненное Доллином Дерфи) стало широко известным (см. [92]). Был получен конденсат из 500 000 атомов — в 200 раз больше, чем в Боулдере, и в 40 раз более коротком цикле охлаждения (всего за 9 секунд). Мы быстро написали статью и уже через две недели после эксперимента отправили ее в печать.

В самых дерзких мечтах я не мог предположить, что этап от испарительного охлаждения до получения БЭК будет столь коротким. Рисунок 8 показывает, насколько стремительным был прогресс после объединения лазерного и испарительного охлаждений. Менее чем за два года число щелочных атомов, находящихся в одном квантовом состоянии, возросло примерно на 12 порядков — настоящая сингулярность, демонстрирующая осуществление фазового перехода!

МТИ с его старыми традициями в атомной физике оказался подходящим местом для проведения работ по БЭК. Существенным шагом стало объединение лазер-

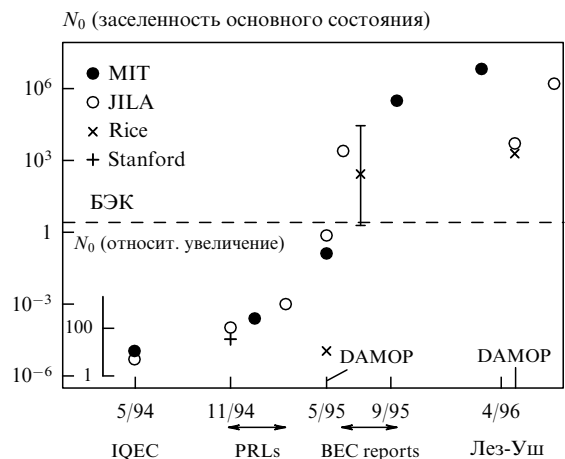


Рис. 8. Прогресс в испарительном охлаждении щелочных атомов до 1996 г. Число атомов в основном квантовом состоянии пропорционально фазовой плотности, которая должна превышать критическое значение 2,612, при котором образуется конденсат. Для $N_0 < 10^{-3}$ показано увеличение фазовой плотности, достигнутое благодаря применению испарительного охлаждения. По поводу результатов, полученных в июле 1995 г. в Rice University, см. [79] и erratum [93].

ного и испарительного охлаждений. Моими соседями в здании 26 МТИ были Дэйв Притчард, первый исследователь лазерного охлаждения, который начал работы по магнитооптической ловушке, и Дан Клеппнер, который вместе с Гарольдом Гессом и Томом Грейтаком разработал и реализовал идею испарительного охлаждения (рис. 9). Я имел счастливую возможность объединить эти исследования и вывести их на новый уровень. Трудно переоценить роль, которую сыграли Дэйв Притчард и Дан Клеппнер в развитии современной атомной физики. На генеалогическом древе специалистов по атомной физике (рис. 10) можно видеть ряд



Рис. 9. Сотрудники МТИ — специалисты по атомной физике сверхнизких температур. Дан Клеппнер, В.К., Том Грейтак и Дэйв Притчард осматривают последнюю установку для получения БЭК в натрия.

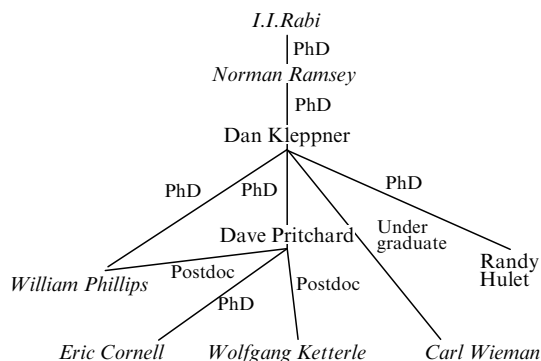
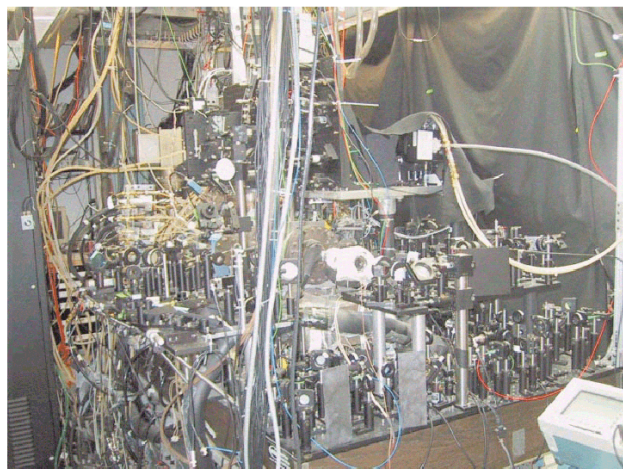
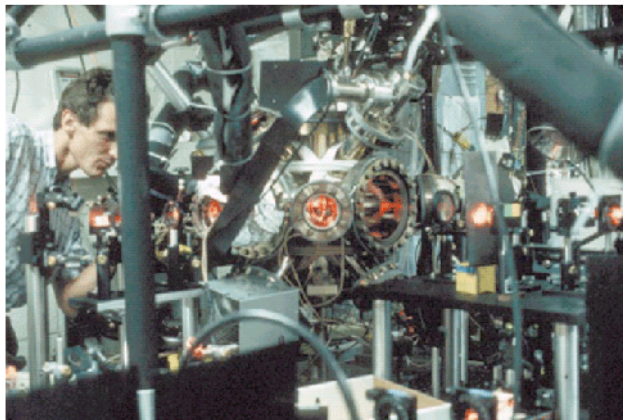


Рис. 10. "Генеалогическое древо" специалистов по атомной физике. Имена Нобелевских лауреатов набраны курсивом.

имен выдающихся физиков, которые были их учениками и сотрудниками.

Оглядываясь назад, можно сказать, что многие технические устройства, такие как "темное пятно", "сжатая" МОЛ [94], ТОР-ловушка и "оптическая пробка", были очень существенными для первого наблюдения БЭК, но совсем не обязательными. Это лучше всего иллюстрируется на примере эксперимента в Rice University, где использовалось только доплеровское охлаждение для загрузки магнитной ловушки — методика, получившая развитие в 1980-е годы. Частота столкновений была мала, но отличный вакуум делал возможным очень медленный испарительный процесс [79]. Так что, как стало ясно теперь, для получения БЭК в щелочных газах не требовалось значительных новаций в охлаждении и пленении. Для этого просто был необходим достаточный оптимизм, чтобы в течение продолжительного времени рисковать в попытке объединить лазерное и испарительное охлаждение. Это потребовало нескольких лет сосредоточенной работы, включавшей разработку ряда технологий, не традиционных для этой области науки, таких как сверхвысокий вакуум, чувствительные ПЗС-камеры, получение оптических изображений, сильноточное оборудование для питания магнитных ловушек и адаптивное компьютерное управление многоступенчатым охлаждением и регистрацией резуль-

Рис. 11. Сравнение установок для лазерного охлаждения и для получения БЭК. На верхнем снимке виден автор, работающий с ловушкой с "темным пятном" в 1993 г. В последующие годы этот эксперимент был усовершенствован для получения БЭК. На нижнем снимке показана та же аппаратура 2001 г. после того, как было добавлено большое число дополнительных компонентов.

татов. Рисунок 11 позволяет сравнить установку 1993 г. для лазерного охлаждения с установкой 2001 г. для получения БЭК, использующей ту же вакуумную аппаратуру в той же лаборатории МТИ. Добавлено множество компонентов, и я не перестаю удивляться моим сотрудникам, которые теперь ставят значительно более сложные эксперименты, чем я каких-то пять лет назад.

5.4. "Трилистниковая" ловушка

После нашего первого наблюдения БЭК мы приняли одно верное решение, хотя исходило из неверных соображений. Мы думали, что другие группы быстро добавят в свои установки для лазерного охлаждения магнитные ловушки и испарительное охлаждение и догонят нас за несколько месяцев. Никто не ожидал, что понадобится еще почти два года, прежде чем будет достигнут новый успех в получении БЭК (группы Дана Хейнзена, Лене Хау, Марка Касевича и Герхарда Ремпе пришли к этому только в 1997 г.). Меня беспокоило, что мы с нашей запираемой ловушкой окажемся в невыгодном положении, поскольку потенциал пленения в ней сильно зависел от формы и юстировки лазерного луча. Поэтому мы решили собрать "трилистниковую" ловушку и прекратили работы на ловушке "с пробкой" уже после двух

экспериментальных прогонов, в которых была получена БЭК.

Поскольку мы не хотели нарушать вакуум, нам пришлось использовать неудобную геометрию ловушки. Магнитные катушки в запираемой ловушке были расположены вертикально во фланцах, и, когда мы заменили их "трилистниковыми" катушками, ось слабого удержания ловушки Иоффе–Притчарда тоже заняла вертикальное положение. В такой геометрии гравитационное искривление должно было снижать эффективность испарения, индуцированного радиочастотным полем, так как испарение происходило бы только в нижней части облака [8, 95]. Но прежде чем нарушить вакуум и переориентировать катушки, надо было увидеть это ограничение. Около декабря 1995 г., когда мы как раз начали исследовать эффективность испарения, мы опять потеряли вакуум из-за разрушения керамической изоляции в системе питания и решили переделать весь эксперимент, расположив ось слабого пленения ловушки горизонтально. С тех пор, уже более шести лет, установка постоянно находится под вакуумом. Но в 1995 г. условия были совершенно иные: каждые два месяца мы вынуждены были открывать камеру, проводить откачку и обезгаживание. В конце концов, научившись на собственных ошибках, мы вырабатывали отлаженную процедуру этих операций.

Я помню ночь 13 марта 1996 г., когда был запущен этот эксперимент, и мы (я и Клаас-Ян ван Друтен) точно отрегулировали отклоняющее поле магнитной ловушки, так что переход на новую ловушку был, наконец, завершен. Было уже полночь, — слишком поздно, чтобы начинать какую-либо серьезную работу, когда Клаас-Ян полусушня спросил, почему бы нам не попытаться получить БЭК. Не зная, какие у нас температуры и плотности, не измерив даже частоту ловушки, мы немного понастраивали частоту развертки, которая определяет траекторию охлаждения, и около 2:10 ночи появился конденсат. Мы испытали облегчение, поскольку не получали конденсатов уже почти полгода. Кроме того, простота, с которой мы получили конденсат в новой ловушке, доказывала, что наша установка работает надежно и что от конструирования охлаждающих схем и ловушек мы можем теперь перейти к исследованию конденсата. Ловушки с намоткой типа "трилистник" и другие виды намоток для ловушек Иоффе–Притчарда теперь используются почти во всех экспериментах по БЭК. На рисунке 12 показана экспериментальная установка того времени.

Почему мы не использовали эту ловушку ранее, а шли окольными путями — квадрупольная ловушка, перевороты Майораны, ловушка с "пробкой"? Во-первых, квадрупольную ловушку было проще собрать, и она позволила нам быстрее осуществить испарительное охлаждение. Во-вторых, мы предпочли вначале квадрупольную ловушку, основываясь на анализе, который показывал, что удержание в линейном потенциале является более сильным, чем в квадратичном потенциале в конфигурации Иоффе–Притчарда [10]. Однако очень вытянутая ловушка Иоффе–Притчарда эффективно реализует линейное удержание в двух радиальных направлениях. Только в 1995 г. я понял, что было бы нетрудно адиабатически деформировать круглое облако, полученное в результате лазерного охлаждения, и придать ему такую вытянутую форму.

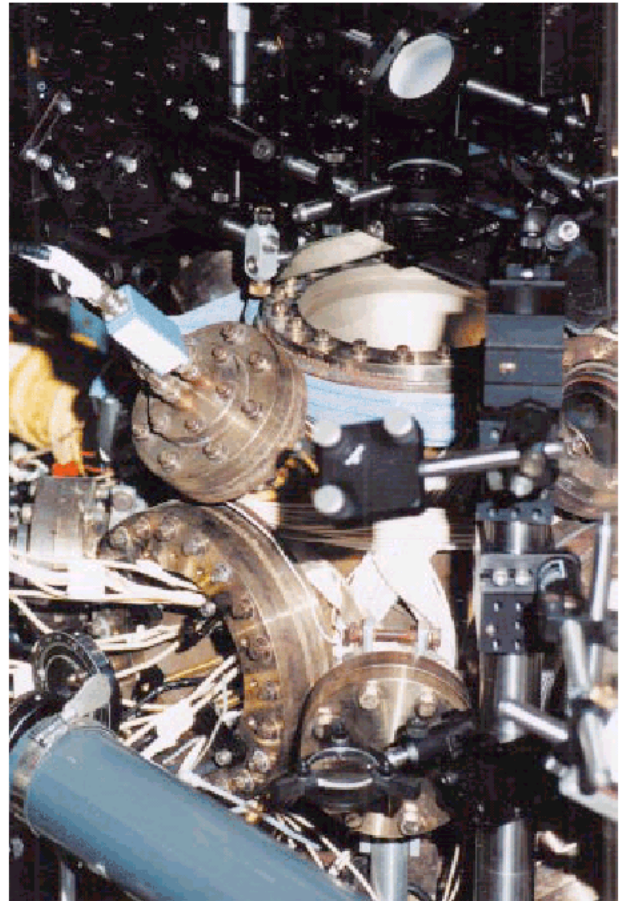


Рис. 12. Экспериментальная установка для охлаждения атомов натрия до бозе-эйнштейновской конденсации (около 1996 г.). Атомы захватываются и охлаждаются в центре камеры сверхвысокого вакуума. Источник атомного пучка и зеemanовский замедлитель расположены слева (на снимке не видны). Магнитная ловушка с "трилистниковой" намоткой смонтирована горизонтально в больших фланцах. Видны только подводные провода и соединительная часть системы водяного охлаждения. На фланце, расположенном по диагонали камеры, установлен разъем для ввода радиочастотных полей, управляющих испарительным охлаждением. Линза и зеркало над камерой используются для наблюдения за конденсатом методом дисперсионного или абсорбционного изображения.

Следующие недели были очень напряженными и волнующими: мы применили метод дисперсионного изображения и впервые увидели конденсат в ловушке. Мы научились получать изображения, не разрушая конденсата, и записали два последовательных изображения одного и того же конденсата. После целого года переживаний по поводу того, что конденсат, который мы получим, может оказаться слишком недолговечным и неустойчивым, было огромным облегчением наблюдать конденсат, не разрушая его. На рисунке 13 показано пространственное распределение конденсата; оно было получено методом неразрушающего дисперсионного изображения. Сначала мы применяли дисперсионное изображение, используя метод затемненного поля [96], но вскоре освоили метод фазоконтрастного изображения, с помощью которого и было получено изображение на рис. 13.

В первую неделю апреля 1996 г. состоялась конференция "Коллективные эффекты в ультрахолодных атомарных газах" в г. Лез-Уш, Франция, в которой участвовало

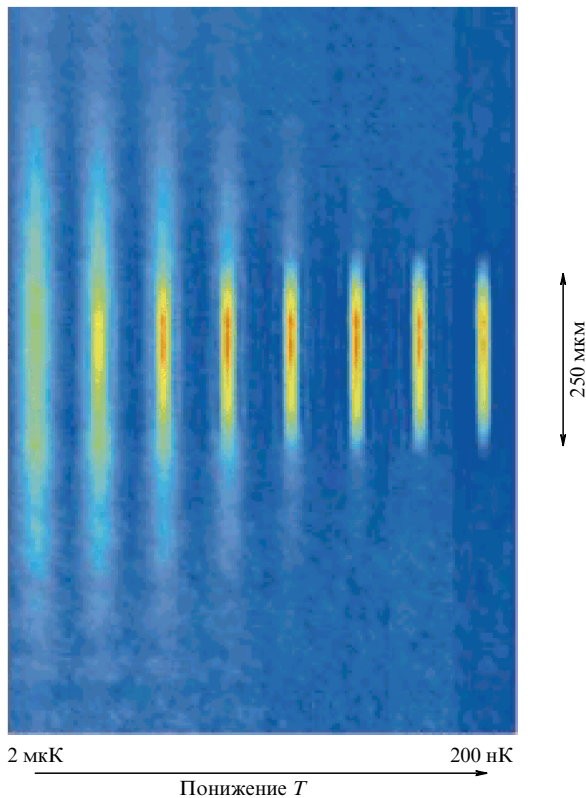


Рис. 13. Фазоконтрастные изображения плененного бозе-газа в процессе фазового перехода к БЭК. При высоких температурах T , выше температуры фазового перехода, распределение плотности газа является однородным. Когда температура становится ниже БЭК-перехода, в центре распределения появляется область более высокой плотности атомов. Это и есть бозе-эйнштейновский конденсат. При дальнейшем понижении температуры число атомов в конденсате растет, и тепловые крылья распределения укорачиваются. В конце концов, температура снижается до точки перехода, когда остается только чистый конденсат без различимой тепловой фракции. Каждое изображение на снимке представляет равновесный газ, полученный за один полный цикл пленения и охлаждения. Аксиальная и радиальная частоты около 17 и 230 Гц соответственно.

большинство лидирующих групп. Это была первая подобная конференция после лета 1995 г., и я сильно волновался, рассказывая о наших результатах. Поскольку за последние несколько месяцев ни одна из других экспериментальных групп не получила значительных результатов по БЭК, именно наша работа явилась стимулом для дальнейшего быстрого развития в этой области.

5.5. Интерференция двух конденсатов

После того, как мы получили БЭК в "трилистниковой" ловушке, и установка, и группа работали в сумасшедшем темпе. После нескольких лет конструирования и усовершенствования, частых ошибок и разочарований, произошел как будто "фазовый переход" к ситуации, когда почти все работало. В течение трех месяцев после получения конденсата мы написали три статьи о новой ловушке и фазовом переходе [91], о неразрушающем методе получения изображения [96] и коллективных возбуждениях [97]. Клаас-Ян ван Друтен ушел из нашей группы вскоре после того, как у нас появился новый постдок Кристофер Таунсенд. В качестве следующей главной цели мы выбрали изучение когерентности конденсата. При работе с оптически запираемой ловушкой

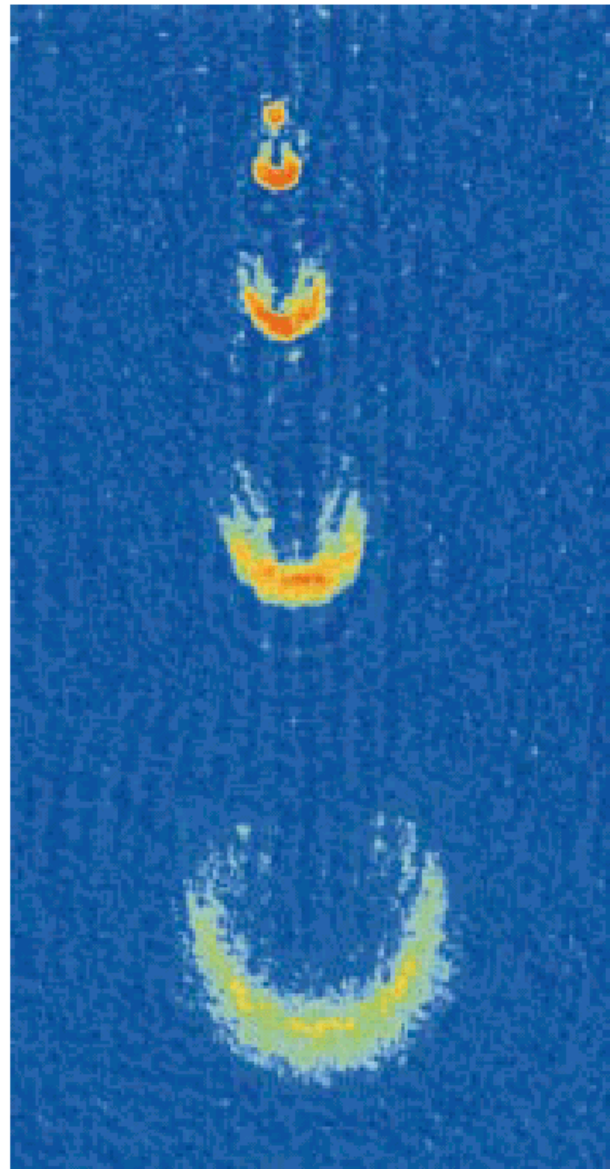


Рис. 14. Атомный лазер (МТИ), действующий с частотой 200 Гц. Импульсы когерентных атомов натрия выводятся из бозе-эйнштейновского конденсата, заключенного в магнитную ловушку (поле зрения $2,5 \times 5,0 \text{ мм}^2$). Каждые 5 мс короткий РЧ импульс переводит часть захваченных атомов в незахватываемое квантовое состояние. Эти атомы ускоряются вниз гравитационным полем, а их облако расширяется из-за отталкивательного взаимодействия. Наблюдения атомных импульсов выполнены методом регистрации поглощения. Каждый импульс содержит от 10^5 до 10^6 атомов.

мы уже научились разрезать конденсат на две части и надеялись наблюдать их интерференцию, что явилось бы явным признаком существования дальнедействующей пространственной когерентности.

Приблизительно в это же время появилась идея извлекать атомы из конденсата, используя индуцированные радиочастотным полем перевороты спинов — РЧ "выходной клапан". Некоторые теоретики считали выходной клапан нерешенным вопросом в контексте создания атомного лазера. Своей группе я предложил использовать для этого радиочастотный источник, который уже применялся при испарении, и освобождать атомы из конденсата, переводя их за счет переворотов спинов в незахватываемое состояние (рис. 14). Экспери-

мент заработал с первой попытки (хотя количественная обработка результатов заняла еще некоторое время [98]). Так как реализация РЧ выходного клапана оказалась очень простой, я никогда не считал ее большим достижением, но она произвела впечатление на специалистов, и с тех пор никто не считал освобождение атомов из конденсата серьезной проблемой!

В июле 1996 г. мы получили первые результаты по РЧ выходному клапану и впервые увидели интерференционные полосы, когда два конденсата, разделенные полосой зеленого света, перекрылись при баллистическом расширении. В это время я уехал в Австралию, чтобы отдохнуть, а также принять участие в конференции IQES в Сиднее. По электронной почте и по телефону я обсуждал со своими сотрудниками новые результаты. Интерференционные полосы становились более четкими, когда конденсаты направлялись друг на друга с ускорением в результате выключения разделяющей световой полосы сразу же после выключения магнитной ловушки. Мы думали, что некоторые из полос могут быть связаны со звуковыми колебаниями и другими коллективными эффектами, возникающими, когда два конденсата достаточно высокой плотности "касаются" друг друга. Я представил эти результаты на конференции в Сиднее только для того, чтобы продемонстрировать, что мы можем выполнять эксперименты с двумя конденсатами, но затем мы должны были разобраться, что именно с ними происходило.

Прошло еще четыре месяца, прежде чем мы смогли наблюдать чистую, без посторонних эффектов, интерференцию двух конденсатов. Когда два конденсата, первоначально разделенные расстоянием d , накладываются друг на друга, и после баллистического расширения в течение времени t записывается интерференционная картина, то интерференционные полосы должны отстоять друг от друга на де-Бройлевскую длину волны h/mv , связанную с относительной скоростью $v = d/t$. Мы оценили, что для нашей геометрии с двумя конденсатами протяженностью около 100 мкм, потребуется, по крайней мере, 60 мс для наблюдения интерференционных полос с периодом 10 мкм, близким к разрешающей способности нашей системы формирования изображения. К сожалению, из-за гравитации атомы исчезали из поля зрения в смотровом окне уже через 40 мс. Поэтому мы попытались увеличить время экспозиции за счет использования геометрии "фонтана", когда атомы сначала подбрасывались вверх магнитным полем и затем мы наблюдали их падение в смотровом окне в течение более чем 100 мс [99], однако за это время происходила деформация облаков. Мы также пытались компенсировать гравитацию вертикальным градиентом магнитного поля. Спустя некоторое время я узнал о новых расчетах, выполненных теоретической группой в Институте Макса Планка в Гархинге. Они показали, что эффективное пространственное разделение двух протяженных конденсатов меньше расстояния между их центрами масс [100]. Это означало, что мы могли бы наблюдать интерференционные полосы всего лишь за 40 мс, до того, как атомы выйдут из смотрового окна. Мы сразу же обсудили это в группе и решили прекратить работы по "фонтанированию" и "антигравитации" и просто позволить атомам падать на 8 мм в течение 40 мс.

Сначала было несколько нечетких наблюдений низко-контрастных интерференционных полос вместе с оптиче-

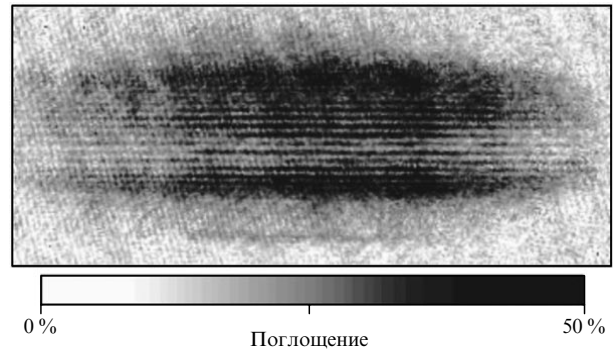
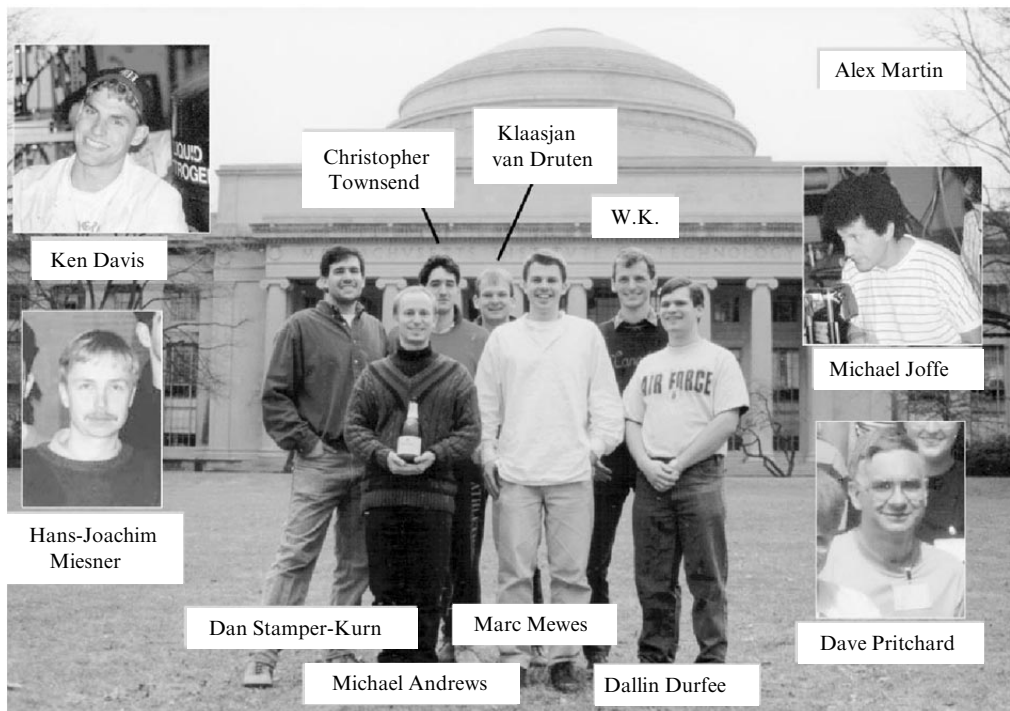


Рис. 15. Интерференционная картина двух расширяющихся конденсатов, зарегистрированная после 40 мс полета. Ширина изображения 1,1 мм. Расстояние между интерференционными полосами равно 15 мкм. Их существование представляет собой убедительное доказательство действующей когерентности бозе-эйнштейновских конденсатов.

ской интерференционной картиной пробного света, но 21 ноября 1996 г. произошел прорыв, когда мы, наконец, получили четкую интерференционную картину (рис. 15). Я до сих пор помню ту ночь, когда мы пытались найти способ достоверно доказать, что это интерференция волн материи, а не самодифракция конденсата, огражденного полосой света и затем освобожденного. Мы решили уничтожить в последний момент один из конденсатов, фокусируя на него резонансный желтый свет. Шутки ради, мы назвали этот лазерный луч "огнеметом". Если полосы появляются из-за самодифракции на остром угле ловушки, они должны остаться. Если же они действительно возникают в результате интерференции, то они исчезнут. Это похоже на оптический эксперимент с двумя щелями, когда одна из щелей перекрывается. Несколько часов заняла настройка нового лазерного луча, и мы убедились с помощью фазоконтрастного изображения, что можем избирательно уничтожать один из двух конденсатов.

Мы установили на панели управления переключатель, который отключал или включал возможность уничтожения конденсата. Затем мы продолжили юстировку установки по наблюдению интерференции. После того, как мы включили переключатель, надо было ждать примерно полминуты, пока образуется новый конденсат. Это был момент истины. Если бы интерференционные полосы появились без второго конденсата, значит, природа дурачила нас всю ночь, — но они исчезли, и вместе с ними исчезло наше невероятное напряжение. Было уже раннее утро следующего дня, когда люди приходят на работу. Я зашел в комнату к Дану Клеппнеру и сказал ему, что имеется нечто, что ему следует увидеть. И он разделил с нами волнение ожидания, когда мы щелкали переключателем в чередующихся циклах охлаждения, и, соответственно, интерференционная картина то исчезала, то опять появлялась. Интерференция двух лучей света — впечатляющее зрелище, но для атомов это выглядит еще более поразительно. Деструктивная интерференция атомных волн означает, что атом плюс атом дает вакуум!

Наличие интерференции было настолько убедительным, что мы сразу же отправили статью по результатам одного-единственного эксперимента [101]. Этот эксперимент запомнился мне и по другой причине: я в последний



Наша группа в 1992–1996 гг.

Рис. 16. Групповая фотография нашей команды была сделана в начале 1996 г. перед главным зданием МТИ. Бутылка шампанского была опустошена в честь получения БЭК в "трилистниковой" ловушке. Добавлены фотографии других сотрудников, участвовавших в работе в 1992–1996 гг.

раз играл главную роль в подготовке и проведении эксперимента. В течение этой ночи я настраивал оптику для "огнемета". До этого момента я вникал во все детали экспериментальной установки и не думал, что это может вскоре измениться, но это произошло внезапно, как еще один фазовый переход. Как раз в это время к нам прибыл Ганс-Иоахим Мизнер, первый постдок, который остался с нами более чем на год, и вскоре он принял на себя ответственность за состояние лаборатории. Мне требовалось все больше времени, чтобы писать статьи и делать доклады. Группа выросла еще на два аспиранта (Шин Иноуэ и Крис Куклевич), и мы сосредоточили наши усилия на подготовке второго эксперимента по БЭК. Все это произошло в течение нескольких месяцев. После защиты диссертации в 1986 г. я провел 11 лет в лаборатории — три срока в качестве постдока и затем в должности доцента, но теперь я стал играть роль руководителя.

Статьи по РЧ выпускному клапану [98] и по интерференции двух конденсатов [101] появились в течение одной недели в январе 1997 г. Они продемонстрировали возможность получения серии импульсов когерентных атомов, что интерпретировалось как реализация атомного лазера. Период, начавшийся с мечтаний о получении БЭК и закончившийся наблюдением когерентности конденсата, был поистине замечательным. Он был наполнен размышлениями и фантазиями, неясными физическими представлениями, провалами и успехами, энтузиазмом, волнением и разочарованием. Этот период сплотил в одну команду очень разных людей, у которых был один "общий знаменатель": страстная увлеченность экспериментальной физикой. Я получил неоценимый опыт общения с этими выдающимися людьми (рис. 16).

6. Магия волн материи

За последние несколько лет был выполнен огромный объем исследований по БЭК. Достижения в этой области к 1998 г. подробно представлены в трудах летней школы в Варенне [102]. Для меня были наиболее интересными исследования по макроскопической квантовой механике — проявления волновых свойств материи на макроскопическом уровне. Такие явления, не типичные для обычного газа, стали впечатляющим свидетельством того, что создана новая форма материи. Интерференция двух конденсатов, представленная выше (см. рис. 15), является одним из таких примеров. Далее я хотел бы обсудить эффект усиления атомов и наблюдение решетки квантовых вихрей.

Эти два эффекта представляют две области, на которые можно подразделить исследования по БЭК в газах. Для одной из них (которую можно назвать "атомный конденсат как когерентный газ" или "атомные лазеры") желательно, чтобы взаимодействие между атомами было как можно меньше — почти как для фотонов в оптическом лазере. Такие эксперименты предпочтительнее проводить при низких плотностях. Бозе-эйнштейновский конденсат является интенсивным источником ультрахолодных когерентных атомов для экспериментов по атомной оптике, для прецизионных измерений и для исследований, затрагивающих основные аспекты квантовой механики. Вторую область можно назвать "БЭК как новая квантовая жидкость" или "БЭК как многочастичная система". Центральным моментом здесь является взаимодействие между атомами, которое заметнее проявляется при высоких плотностях. Когерентное усиление атомов — это пример

оптики атомов в конденсате, а исследование вихрей относится к области сверхтекучести квантовой жидкости.

6.1. Усиление атомов в бозе-эйнштейновском конденсате

Поскольку атомы представляют собой волны де Бройля, существует аналогия между атомами и светом, который состоит из электромагнитных волн. Это используется в атомной оптике, когда атомы отражаются, дифрагируют и интерферируют на различных атомно-оптических элементах [103]. Один из важных вопросов заключался в том, можно ли распространить эту аналогию на оптический лазер, действие которого основано на усилении света. Создав в 1997 г. элементарный атомный лазер, наша группа решила проблему вывода (или извлечения) атомов из конденсата и проверки их когерентности. Этот процесс усиления атомов происходил во время образования бозе-эйнштейновского конденсата [104], что в корне отличается от процесса усиления света при его прохождении через активную среду. И только в 1999 г. наша группа сумела осуществить усиление атомов, проходящих через облако других атомов, которые играют роль активной среды [105] (одновременно с группой в Токио [106]).

Усиление атомов — более тонкий процесс, чем усиление электромагнитных волн, потому что можно только изменять квантовое состояние атомов, но их нельзя генерировать. Поэтому если бы даже кто-то научился усиливать атомы золота, он не смог бы еще реализовать мечту средневековых алхимиков. Атомный усилитель превращает атомы активной среды в волну атомов, которые находятся в точно таком же квантовом состоянии, что и атомы падающей волны (рис. 17).

Для атомного усилителя нужен резервуар (т.е. активная среда) ультрахолодных атомов с очень узким распределением скоростей, которые можно преобразовать в атомарный пучок. Естественным кандидатом на роль такого резервуара является бозе-эйнштейновский конденсат. Требуется также некоторый механизм взаимодействия, переводящий атомы резервуара в состояние падающего пучка при соблюдении законов сохранения

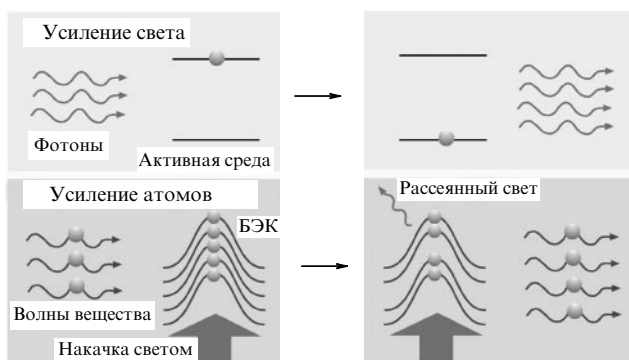


Рис. 17. Усиление света и атомов. В оптическом лазере свет усиливается при прохождении через возбужденную инверсно заселенную среду. В созданном в МТИ атомном усилителе падающая атомная волна проходит через бозе-эйнштейновский конденсат, облучаемый лазерным светом. Стимуляция бозонов падающими атомами вызывает рассеяние света конденсатом под таким же углом, при котором атом конденсата, получивший импульс отдачи, присоединяется к падающей волне атомов и усиливает ее.

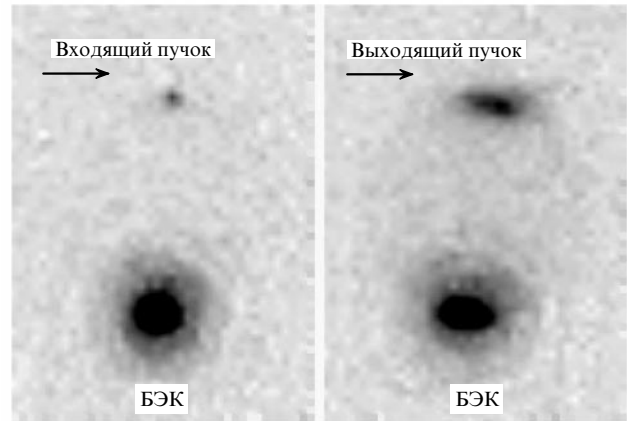


Рис. 18. Наблюдение усиления атомов. Усиление проверяется с помощью прохождения входного пучка через атомный усилитель, которым является бозе-эйнштейновский конденсат, облучаемый лазерным светом. Спустя примерно 20 мс делается теневая фотография конденсата и входного пучка. На левом снимке падающий пучок проходит через конденсат без усиления. Когда процесс усиления активизируется облучением конденсата лазерным светом (правый снимок), выходной импульс содержит гораздо больше атомов, чем входной — типичный коэффициент усиления от 10 до 100. Поле зрения имеет размеры $1,9 \times 2,6$ мм².

энергии и импульса. Такое преобразование состояния атомов осуществляется при рассеянии лазерного света. Импульс отдачи при рассеянии ускоряет некоторые атомы как раз до той скорости, которую имеют атомы в падающем пучке (рис. 18). Выходной пучок не просто усиливается — его атомы переходят именно в то состояние, в котором находятся атомы в падающем пучке, т.е. они имеют ту же самую квантовомеханическую фазу. Это было проверено с помощью интерференции усиленного выходного пучка с пучком, аналогичным входящей волне, и наблюдения фазовой когерентности.

Прямому наблюдению атомного усиления летом 1999 г. предшествовало неожиданное событие, случившееся однажды ночью в октябре 1998 г., когда мы открыли новый тип сверхизлучения [107]. Мы занимались брэгговской спектроскопией [108] и облучали БЭК двумя лазерными пучками. Я не участвовал в проведении эксперимента и работал в своем кабинете, когда около полуночи из лаборатории прибежали аспиранты и сказали, что атомы вылетают из конденсата со скоростями, перпендикулярными к направлениям лазерных пучков. Мы ожидали, что атомы получат импульс отдачи, направленный только вдоль лазерного пучка, а всякое движение в перпендикулярном направлении должно носить диффузный характер вследствие случайного направления спонтанного рэлеевского рассеяния.

Вся лаборатория стала обсуждать, что же произошло. При действующей установке все можно было сразу же проверить. Первая идея была тривиальной: давайте осветим конденсат только одним лазерным лучом и посмотрим, что получится (направленные атомные пучки остались). Мы тщательно проверили всю установку на предмет наличия отраженных или не полностью подавленных лазерных пучков, но ничего не нашли. Постепенно мы убедились, что наблюдаемое явление было реальным эффектом, а не каким-либо экспериментальным артефактом. Зная, что конденсат имеет вытянутую форму, мы пришли к мысли о вынуж-

денном излучении вдоль длинной оси конденсата, и это оказалось близким к истине. Мы решили прекратить общую дискуссию и продолжать наблюдения. Установка работала стабильно, и надо было этим воспользоваться. Несколько аспирантов, в том числе, Шин Иноуэ и Анант Чиккатур, продолжали наблюдения, а Дан Стэмпер-Керн и я подошли к доске и попытались разобраться в ситуации. В течение следующего часа мы нашли корректное полуклассическое описание сверхизлучения в конденсате. В эксперименте предсказанная нами сильная зависимость эффекта от поляризации лазерного луча получила подтверждение. Несколько месяцев спустя мы поняли, как можно использовать механизм сверхизлучательного усиления для создания фазово-когерентного атомного усилителя. Однако в это время лаборатория подверглась полной реконструкции, и нам пришлось ждать, когда установка заработает опять, чтобы осуществить идею фазово-когерентного усиления.

Создание атомного усилителя добавило новый элемент в оптику атомов. В дополнение к пассивным элементам, таким как разделитель пучка, линзы и зеркала, теперь появился активный элемент атомной оптики. Когерентные атомные усилители могут способствовать усовершенствованию атомных интерферометров, устраняя потери внутри устройства или усиливая выходной сигнал. Атомные интерферометры уже используются как чувствительные датчики гравитации и вращения.

6.2. Наблюдение решетки вихрей в бозе-эйнштейновском конденсате

Квантовая механика и волновые свойства материи проявляются особенным образом, когда частицы обладают угловыми моментами или, проще говоря, когда квантовая система вращается. Если квантовомеханическая частица движется по окружности, длина окружности должна быть кратной длине волны де Бройля. Это правило квантования лежит в основе модели Бора и приводит к дискретным энергетическим уровням атома водорода. В случае вращающейся сверхтекучей жидкости оно приводит к квантованию вихрей [109]. Если закрутить в ведре обычную жидкость, то в конечном счете, она будет вращаться как твердое тело, когда скорость постепенно возрастает от центра к периферии (рис. 19а). Однако такое непрерывное изменение скорости невозможно для частиц, находящихся в одном квантовом состоянии. Для того чтобы удовлетворить вышеупомянутому правилу квантования, поле скоростей течения должно разбиться на сингулярные области, между

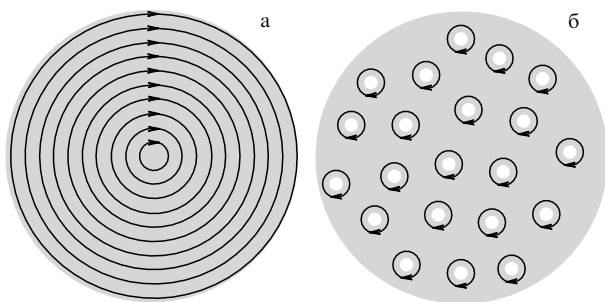


Рис. 19. Сравнение поля скоростей при вращении обычной и сверхтекучей жидкостей. Обычная жидкость вращается как твердое тело (а), а в сверхтекучей возникает решетка квантовых вихрей (б).

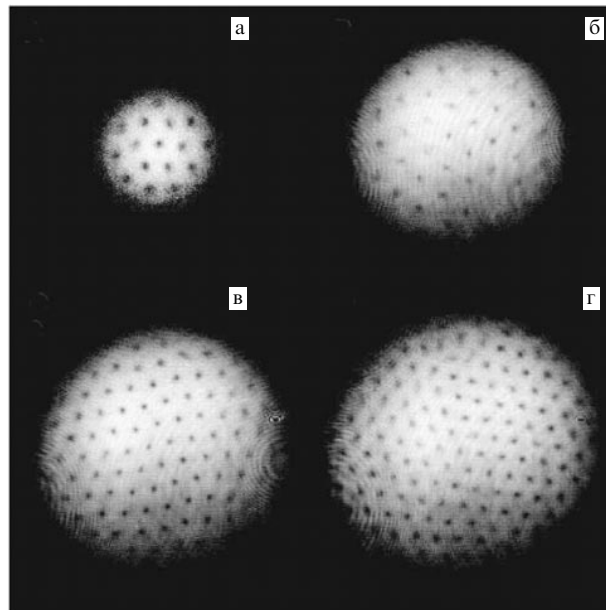


Рис. 20. Наблюдение решетки вихрей во вращающемся бозе-эйнштейновском конденсате. Показаны примеры решеток из 16 (а), 32 (б), 80 (в) и 130 (г) вихрей, полученных по мере увеличения скорости вращения. Вихри "кристаллизуются" в треугольной решетке. Диаметр облака на рис. г после баллистического расширения (которое дает увеличение в 20 раз) составлял 1 мм. (Снимки из работы [112] воспроизводятся с разрешения издателя. © American Association for the Advancement of Science 2001.)

которыми число длин волн де Бройля на замкнутом пути скачком изменяется на единицу. Одна из возможностей — это радиально симметричное поле потока с концентрическими кольцами, причем длины соседних колец отличаются на одну длину волны де Бройля.

Однако наиболее энергетически выгодная конфигурация возникает, когда сингулярности в поле скоростей располагаются не на цилиндрических оболочках, а вдоль линий. Такая конфигурация соответствует решетке вихрей. В отличие от классических вихрей, возникающих внутри смерча или при сливе воды в туалете, вихри в бозе-эйнштейновском конденсате квантованы: когда атом обходит вокруг ядра вихря, квантовомеханическая фаза атома изменяется точно на 2π . Такие квантованные вихри играют ключевую роль в сверхтекучести и сверхпроводимости. В сверхпроводнике линии магнитного потока выстраиваются в виде регулярной решетки, которую можно непосредственно наблюдать. Выполненные ранее прямые наблюдения вихрей в сверхтекучих жидкостях ограничивались небольшими решетками (до 11 вихрей) как в жидком ^4He [110], так и во вращающемся бозе-эйнштейновском конденсате газа, полученном парижской группой [111].

В 2001 г. наша группа наблюдала образование вихревых решеток высокого порядка во вращающемся бозе-эйнштейновском конденсате газа [112]. Они создавались вращением лазерных пучков относительно конденсата, что вызывало его закручивание. Затем в конденсате можно было наблюдать замечательное проявление квантовомеханических свойств на макроскопическом уровне. Облако вращающегося газа изрешетили более ста вихрей. Поскольку ядра вихрей были меньше, чем оптическое разрешение, было допущено расширение газа после выключения магнитной ловушки. Это увели-

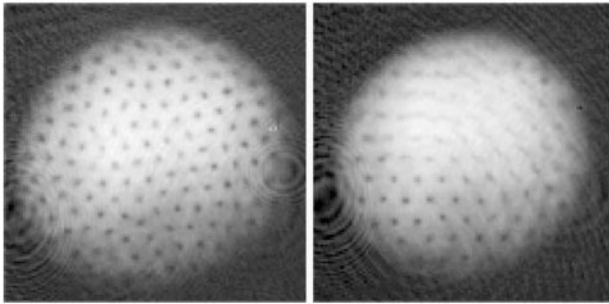


Рис. 21. Вихревые решетки с дефектами. На левом снимке решетка имеет дислокацию в центре конденсата. На правом снимке виден дефект, напоминающий зернистую поверхность монокристалла. (Снимок из работы [112] воспроизводится с разрешения издателя. © American Association for the Advancement of Science 2001.)

чивало пространственную структуру в 20 раз. На теновом фотоснимке этих облаков видны маленькие яркие пятна, где свет свободно проходит через ядра вихрей как через туннели (на рис. 20 приведены негативные изображения).

Удивительным свойством наблюдаемых вихревых решеток является их исключительная регулярность, без каких-либо искажений даже вблизи границ. Такая "абрикосовская" решетка была впервые предсказана для линий квантованного магнитного потока в сверхпроводниках второго рода. Но природа не всегда совершенна: некоторые снимки обнаруживают искажения или дефекты решетки вихрей; два примера приведены на рис. 21. Физика вихрей очень богата. После наблюдения вихревых решеток наша группа и другие коллективы начали исследования динамики и устойчивости вихревых структур. Как образуются вихри? Как они распадаются? Являются ли они прямыми или искривленными? Подобные эксперименты могут быть непосредственно сопоставлены с вычислениями "из первых принципов", которые оказываются возможными для таких разреженных систем. Живое взаимодействие теории и эксперимента может привести к лучшему пониманию сверхтекучести и макроскопических квантовых явлений.

7. Заключение

Быстрое развитие событий в области БЭК атомарных газов за последние несколько лет оказалось неожиданным для нашего сообщества. После десятилетий погони за этой ускользящей целью никто не ожидал, что конденсаты окажутся такими устойчивыми и относительно легко управляемыми. Кроме того, никто не представлял, что столь простая система может создать так много проблем не только для экспериментаторов, но и для нашего фундаментального понимания физики. Список новых задач как для теоретиков, так и для экспериментаторов — достаточно длинный. Он включает исследование сверхтекучести и второго звука в бозе-газах, физику корреляций и неклассичность волновых функций (явления, выходящие за рамки уравнения Гросса–Питаевского), изучение вырожденных молекулярных газов и ферми-газов, создание атомных лазеров "высокой мощности" и их применение в атомной оптике и для прецизионных измерений. Эти научные задачи тесно переплетаются с технологическими проблемами получения новых однокомпонентных или многокомпо-



Рис. 22. Автор со своей группой в ноябре 2001 г. В первом ряду слева направо: Z. Hadzibabic, K. Xu, S. Gupta, E. Tsikata, Y.-I. Shin. Во втором ряду: A.P. Chikkatur, J.-K. Chin, D.E. Pritchard, W.K., G. Campbell, A.E. Leanhardt, M. Boyd. В третьем ряду: J.R. Abo-Shaer, D. Schneble, J.M. Vogels, K. Dieckmann, C.A. Stan, Y. Torii, E. Streed.

нентных вырожденных систем и разработкой новых способов управления ими, например, при использовании микрочипов и атомных чипов. Все говорит о том, что впереди еще много волнующих открытий!

Работа над БЭК в МТИ потребовала огромных коллективных усилий, и я благодарен всем бывшим и настоящим сотрудникам, которые вместе со мной разделяли и радость открытий, и тяжелый труд: J.R. Abo-Shaer, M.R. Andrews, M. Boyd, G. Campbell, A.P. Chikkatur, J.-K. Chin, K.B. Davis, K. Dieckmann, D.S. Durfee, A. Görlitz, S. Gupta, T.L. Gustavson, Z. Hadzibabic, S. Inouye, M.A. Joffe, D. Kielpinski, M. Köhl, C.E. Kuklewicz, A.E. Leanhardt, R.F. Löw, A. Martin, M.-O. Mewes, H.-J. Miesner, R. Onofrio, T. Pfau, D.E. Pritchard, C. Raman, D. Schneble, C. Schunck, Y.-I. Shin, D.M. Stamper-Kurn, C.A. Stan, J. Stenger, E. Streed, Y. Torii, C.G. Townsend, N.J. van Druten, J.M. Vogels, K. Xu, M.W. Zwierlein и большому числу студентов МТИ.



Рис. 23. Лекторы, докладчики и организаторы летней школы "Бозе-эйнштейновская конденсация в атомарных газах", Варенна, 7–17 июля 1998 г. В первом ряду: Jean Dalibard, Guglielmo Tino, Fernando Sols, Kris Helmerson. Во втором ряду: Sandro Stringari, Carl Wieman, Alexander Fetter, Tilman Esslinger, Massimo Inguscio, William Phillips, Daniel Heinzen, Peter Fedichev, Lev Pitaevskii, W.K., Allan Griffin, Keith Burnett, Daniel Kleppner, Alain Aspect, Ennio Arimondo, Theodor Hänsch, Eric Cornell.

Образцовая административная помощь в течение двенадцати лет оказывалась нам со стороны Carlo Costa. На фотографии (рис. 22) снята наша команда в ноябре 2001 г. Особую благодарность мы адресуем Дану Клеппнеру и Тому Грэйтаку за стимулирующее влияние и постоянную поддержку. Автор благодарен за плодотворное сотрудничество также коллегам во всем мире — тем, кто внес вклад в эту богатую и яркую область физики. Некоторых из них можно увидеть на групповой фотографии лекторов летней школы по БЭК в Варрене в 1998 г. (рис. 23). Соревнование в течение нескольких лет с группой в Боулдере, руководимой Эриком Корнеллом и Карлом Виманом, всегда вдохновляло меня и мою группу. Несмотря на острую конкуренцию, это было подлинное сотрудничество и дружеское общение. Я хочу поблагодарить Научно-исследовательское управление военно-морских сил, Национальный научный фонд, Научно-исследовательское управление армии, Объединенное управление программ по электронике, НАСА и Фонд Дэвида и Люсиль Паккард за поощрение нашей деятельности и финансовую поддержку.

Перевел с английского Е.Д. Трифонов

Список литературы

- Einstein A *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 3 18 (1925)
- Bose S N *Z. Phys.* 26 178 (1924)
- Taubes G *Science* 265 184 (1994)
- Chu S *Rev. Mod. Phys.* 70 685 (1998); *УФН* 169 274 (1999)
- Cohen-Tannoudji C N *Rev. Mod. Phys.* 70 707 (1998); *УФН* 169 292 (1999)
- Phillips W D *Rev. Mod. Phys.* 70 721 (1998); *УФН* 169 305 (1999)
- Masuhara N, Doyle J M, Sandberg J C, Kleppner D, Greytak T J, Hess H F, Kochanski G P *Phys. Rev. Lett.* 61 935 (1988)
- Ketterle W, van Druten N J, in *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics* Vol. 37 (Eds B Bederson, H Walther) (San Diego: Academic Press, 1996) p. 181
- Walraven J T M, in *Quantum Dynamics of Simple Systems* (Eds G L Oppo, S M Barnett, E Riis, M Wilkinson) (London: Institute of Physics Publ., 1996) p. 315
- Ketterle W, Durfee D S, Stamper-Kurn D M, in *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 140, Eds M Inguscio, S Stringari, C E Wieman) (Amsterdam: IOS Press, 1999) p. 67
- Stamper-Kurn D M, Ketterle W, in *Coherent Atomic Matter Waves, Proc. of the Les Houches Summer School, Session LXXII, 1999* (Eds R Kaiser, C Westbrook, F David) (Berlin: Springer, 2001); cond-mat/0005001
- Ketterle W, Inouye S C R. *Acad. Sci. Ser. IV: Phys. Astrophys.* 2 339 (2001); cond-mat/0101424
- Pais A "Subtle is the Lord...": *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1982)
- Gavroglu K *Fritz London: A Scientific Biography* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
- Griffin A, in *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 140, Eds M Inguscio, S Stringari, C E Wieman) (Amsterdam: IOS Press, 1999) p. 1
- Einstein A *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 1 3 (1925)
- Griffin A, Snoke D W, Stringari S (Eds) *Bose–Einstein Condensation* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
- Huang K *Statistical Mechanics* 2nd ed. (New York: Wiley, 1987)
- Schrödinger E *Statistical Thermodynamics* (Cambridge: Univ. Press, 1952), reprinted (New York: Dover Publ., 1989)
- Crooker B C, Hebral B, Smith E N, Takano Y, Reppy J D *Phys. Rev. Lett.* 51 666 (1983)
- Reppy J D *Physica B+C* 126 335 (1984)
- Rasolt M, Stephen M J, Fisher M E, Weichman P B *Phys. Rev. Lett.* 53 798 (1984)
- Cho H, Williams G A *Phys. Rev. Lett.* 75 1562 (1995)
- Wolfe J P, Lin J L, Snoke D W, in *Bose–Einstein Condensation* (Eds A Griffin, D W Snoke, S Stringari) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995) p. 281
- Fortin E, Benson E, Mysyrowicz A, in *Bose–Einstein Condensation* (Eds A Griffin, D W Snoke, S Stringari) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995) p. 519
- Lin J L, Wolfe J P *Phys. Rev. Lett.* 71 1222 (1993)
- O'Hara K E, Stilleabháin L Ó, Wolfe J P *Phys. Rev. B* 60 10565 (1999)
- Butov L V, Lai C W, Ivanov A L, Gossard A C, Chemla D S *Nature* 417 47 (2002)
- Yamamoto Y *Nature* 405 629 (2000)
- Baumberg J J *Phys. World* (4) 37 (2002)
- Saba M, Ciuti C, Bloch J, Thierry-Mieg V, André R, Dang L S, Kundermann S, Mura A, Bongiovanni G, Staehli J L, Deveaud B *Nature* 414 731 (2001)
- Hecht C E *Physica* 25 1159 (1959)
- Stwalley W C, Nosanow L H *Phys. Rev. Lett.* 36 910 (1976)
- Silvera I F, Walraven J T M *Phys. Rev. Lett.* 44 164 (1980)
- Cline R W, Smith D A, Greytak T J, Kleppner D *Phys. Rev. Lett.* 45 2117 (1980)
- Fried D G, Killian T C, Willmann L, Landhuis D, Moss S C, Kleppner D, Greytak T J *Phys. Rev. Lett.* 81 3811 (1998)
- Greytak T J, in *Bose–Einstein Condensation* (Eds A Griffin, D W Snoke, S Stringari) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995) p. 131
- Greytak T J, Kleppner D, in *New Trends in Atomic Physics, Les Houches Summer School, Session XXXVIII, 1982* (Eds G Grynberg, R Stora) (Amsterdam: North-Holland, 1984) p. 1125
- Silvera I F, Walraven J T M, in *Progress in Low Temperature Physics* Vol. X (Ed. D F Brewer) (Amsterdam: Elsevier, 1986) p. 139
- Kleppner D, Greytak T J, Killian T C, Fried D G, Willmann L, Landhuis D, Moss S C, in *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 140, Eds M Inguscio, S Stringari, C E Wieman) (Amsterdam: IOS Press, 1999) p. 177
- Safonov A I, Vasilyev S A, Yasnikov I S, Lukashevich I I, Jaakkola S *Phys. Rev. Lett.* 81 4545 (1998)
- Goldman V V, Silvera I F, Leggett A J *Phys. Rev. B* 24 2870 (1981)
- Huse D A, Siggia E J. *Low Temp. Phys.* 46 137 (1982)
- Oliiva J *Phys. Rev. B* 39 4197 (1989)
- Stoof H T C, Koelman J M V A, Verhaar B J *Phys. Rev. B* 38 4688 (1988)
- Hess H F *Phys. Rev. B* 34 3476 (1986)
- Arimondo E, Phillips W, Strumia F (Eds) *Laser Manipulation of Atoms and Ions* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 118) (Amsterdam: North-Holland, 1992)
- Metcalfe H, van der Straten P *Phys. Rep.* 244 203 (1994)
- Adams C S, Riis E *Prog. Quantum Electron.* 21 1 (1997)
- Letokhov V S, Minogin V G *Opt. Commun.* 35 199 (1980)
- Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, Cable A, Ashkin A *Phys. Rev. Lett.* 55 48 (1985)
- Pritchard D E, in *Electronic and Atomic Collisions: Invited Papers of the XIV Intern. Conf. on the Physics of Electronic and Atomic Collisions, Palo Alto, Calif., 24–30 July, 1985* (Eds D C Lorents, W E Meyerhof, J R Peterson) (Amsterdam: North-Holland, 1986) p. 593
- Walker T, Feng P, in *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics* Vol. 34 (Eds B Bederson, H Walther) (San Diego: Academic Press, 1994) p. 125
- Weiner J, in *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics* Vol. 35 (Eds B Bederson, H Walther) (San Diego: Academic Press, 1995) p. 45
- Walker T, Sesko D, Wieman C *Phys. Rev. Lett.* 64 408 (1990)
- Drewsen M, Laurent P, Nadir A, Santarelli G, Clairon A, Castin Y, Grison D, Salomon C *Appl. Phys. B* 59 283 (1994)
- Townsend C G, Edwards N H, Cooper C J, Zetie K P, Foot C J, Steane A M, Szriftgiser P, Perrin H, Dalibard J *Phys. Rev. A* 52 1423 (1995)

58. Townsend C G, Edwards N H, Zetie K P, Cooper C J, Rink J, Foot C J *Phys. Rev. A* **53** 1702 (1996)
59. DePue M T, McCormick C, Winoto S L, Oliver S, Weiss D S *Phys. Rev. Lett.* **82** 2262 (1999)
60. Ido T, Isoya Y, Katori H *Phys. Rev. A* **61** 061403(R) (2000)
61. Kerman A J, Vuletić V, Chin C, Chu S *Phys. Rev. Lett.* **84** 439 (2000)
62. Ketterle W, Pritchard D E *Appl. Phys. B* **54** 403 (1992)
63. Lovelace R V E, Mahanian C, Tommila T J, Lee D M *Nature* **318** 30 (1985)
64. Cornell E A, Monroe C, Wieman C E *Phys. Rev. Lett.* **67** 2439 (1991)
65. Vigué J *Phys. Rev. A* **34** 4476 (1986)
66. Ketterle W, Pritchard D E *Phys. Rev. A* **46** 4051 (1992)
67. Pritchard D E, Ketterle W, in *Laser Manipulation of Atoms and Ions* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 118, Eds E Arimondo, W Phillips, F Strumia) (Amsterdam: North-Holland, 1992) p. 473
68. Kasevich M, Chu S *Phys. Rev. Lett.* **69** 1741 (1992)
69. Monroe C, Swann W, Robinson H, Wieman C *Phys. Rev. Lett.* **65** 1571 (1990)
70. Lindquist K, Stephens M, Wieman C *Phys. Rev. A* **46** 4082 (1992)
71. Ketterle W, Martin A, Joffe M A, Pritchard D E *Phys. Rev. Lett.* **69** 2483 (1992)
72. Barrett T E, Daport-Schwartz S W, Ray M D, Lafyatis G P *Phys. Rev. Lett.* **67** 3483 (1991)
73. Joffe M A, Ketterle W, Martin A, Pritchard D E *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 2257 (1993)
74. Pritchard D E, Helmerson K, Martin A G, in *Atomic Physics 11: Proc. of the 11th Intern. Conf. on Atomic Physics, Paris, July 4–8, 1989* (Eds S Haroche, J C Gay, G Grynberg) (Singapore: World Scientific, 1989) p. 179
75. Migdall A L, Prodan J V, Phillips W D, Bergeman T H, Metcalf H J *Phys. Rev. Lett.* **54** 2596 (1985)
76. Bagnato V S, Lafyatis G P, Martin A G, Raab E L, Ahmad-Bitar R N, Pritchard D E *Phys. Rev. Lett.* **58** 2194 (1987)
77. Helmerson K, Martin A, Pritchard D E *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 1988 (1992)
78. Monroe C, Cornell E, Wieman C, in *Laser Manipulation of Atoms and Ions* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 118, Eds E Arimondo, W Phillips, F Strumia) (Amsterdam: North-Holland, 1992) p. 361
79. Bradley C C, Sackett C A, Tollett J J, Hulet R G *Phys. Rev. Lett.* **75** 1687 (1995)
80. Ketterle W, Davis K B, Joffe M A, Martin A, Pritchard D E *Phys. Rev. Lett.* **70** 2253 (1993)
81. Weiner J, Bagnato V S, Zilio S, Julienne P S *Rev. Mod. Phys.* **71** 1 (1999)
82. Heinzen D J, in *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 140, Eds M Inguscio, S Stringari, C E Wieman) (Amsterdam: IOS Press, 1999) p. 351
83. Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, Wieman C E, Cornell E A *Science* **269** 198 (1995)
84. Davis K B, Mewes M-O, Andrews M R, van Druten N J, Durfee D S, Kurn D M, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **75** 3969 (1995)
85. Ketterle W, Davis K B, Joffe M A, Martin A, Pritchard D E, Presentation at the OSA Annual Meeting, Toronto, Canada, October 3–8, 1993
86. Lett P D, Phillips W D, Rolston S L, Tanner C E, Watts R N, Westbrook C I *J. Opt. Soc. Am. B* **6** 2084 (1989)
87. Davis K B, Mewes M O, Joffe M A, Ketterle W, in *Fourteenth Intern. Conf. on Atomic Physics, Boulder, Colorado, 1994*, Book of Abstracts, I-M3 (Boulder, Colorado: University of Colorado, 1994)
88. Petrich W, Anderson M H, Ensher J R, Cornell E A *Phys. Rev. Lett.* **74** 3352 (1995)
89. Davis K B, Mewes M-O, Joffe M A, Andrews M R, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **74** 5202 (1995)
90. Doyle J M, Sandberg J C, Yu I A, Cesar C L, Kleppner D, Greytak T J *Phys. Rev. Lett.* **67** 603 (1991)
91. Mewes M-O, Andrews M R, van Druten N J, Kurn D M, Durfee D S, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **77** 416 (1996)
92. Durfee D, Ketterle W *Opt. Express* **2** (8) 299 (1998)
93. Bradley C C, Sackett C A, Tollett J J, Hulet R G *Phys. Rev. Lett.* **79** 1170 (1997)
94. Petrich W, Anderson M H, Ensher J R, Cornell E A *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 1332 (1994)
95. Surkov E L, Walraven J T M, Shlyapnikov G V *Phys. Rev. A* **53** 3403 (1996)
96. Andrews M R, Mewes M-O, van Druten N J, Durfee D S, Kurn D M, Ketterle W *Science* **273** 84 (1996)
97. Mewes M-O, Andrews M R, van Druten N J, Kurn D M, Durfee D S, Townsend C G, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **77** 988 (1996)
98. Mewes M-O, Andrews M R, Kurn D M, Durfee D S, Townsend C G, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **78** 582 (1997)
99. Townsend C G, van Druten N J, Andrews M R, Durfee D S, Kurn D M, Mewes M-O, Ketterle W, in *Atomic Physics 15: Fifteenth Intern. Conf. on Atomic Physics, Amsterdam, August 1996* (Eds H B van Linden van den Heuvell, J T M Walraven, M W Reynolds) (Singapore: World Scientific, 1997) p. 192
100. Röhrl A, Naraschewski M, Schenzle A, Wallis H *Phys. Rev. Lett.* **78** 4143 (1997)
101. Andrews M R, Townsend C G, Miesner H-J, Durfee D S, Kurn D M, Ketterle W *Science* **275** 637 (1997)
102. Inguscio M, Stringari S, Wieman C E (Eds) *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases* (Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi", Course 140) (Amsterdam: IOS Press, 1999)
103. Adams C S, Sigel M, Mlynek J *Phys. Rep.* **240** 143 (1994)
104. Miesner H-J, Stamper-Kurn D M, Andrews M R, Durfee D S, Inouye S, Ketterle W *Science* **279** 1005 (1998)
105. Inouye S, Pfau T, Gupta S, Chikkatur A P, Görlitz A, Pritchard D E, Ketterle W *Nature* **402** 641 (1999)
106. Kozuma M, Suzuki Y, Torii Y, Sugiura T, Kuga T, Hagley E W, Deng L *Science* **286** 2309 (1999)
107. Inouye S, Chikkatur A P, Stamper-Kurn D M, Stenger J, Pritchard D E, Ketterle W *Science* **285** 571 (1999)
108. Stenger J, Inouye S, Chikkatur A P, Stamper-Kurn D M, Pritchard D E, Ketterle W *Phys. Rev. Lett.* **82** 4569 (1999)
109. Nozières P, Pines D *The Theory of Quantum Liquids* (Cambridge, Mass.: Perseus Book, 1990)
110. Yarmchuk E J, Gordon M J V, Packard R E *Phys. Rev. Lett.* **43** 214 (1979)
111. Madison K W, Chevy F, Wohlleben W, Dalibard J *J. Mod. Opt.* **47** 2715 (2000)
112. Abo-Shaeer J R, Raman C, Vogels J M, Ketterle W *Science* **292** 476 (2001)