

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИВАНОВА Татьяна Юрьевна

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ
ОХЛАЖДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ АТОМОВ
В ОПТИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2006



Работа выполнена на кафедре общей физики I физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук

Голубев Юрий Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Егоров Валентин Семенович

кандидат физико-математических наук

Задков Виктор Николаевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Защита диссертации состоится «23 ноября» 2006 г. в 12 час. на заседании диссертационного совета Д 212.232.45 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, БФА.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького СПбГУ.

Автореферат разослан «20» октября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Ионих Ю.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время управление единичными атомами и атомными ансамблями, в частности охлаждение их до ультра низких температур, представляет важную экспериментальную и теоретическую задачу. Стандартные методы управления основаны на резонансном взаимодействии лазерного поля с атомами. Однако использование резонансных полей в значительной степени ограничивает возможности такого управления за счет шума, вызванного спонтанным излучением. Кроме того, эти методы применимы для охлаждения только атомов, имеющих переходы резонансные доступным лазерным источникам.

Для того чтобы расширить диапазон атомов, которые могут быть охлаждены до ультра низких температур, можно использовать лазерные поля, далеко отстроенные от частоты атомного перехода. В этом случае механизм управления может быть основан на дипольном взаимодействии атомов с полем.

Этот механизм может быть удобно реализован в так называемых нерезонансных оптических решетках, которые представляют собой периодический потенциал для атомов, созданный за счет интерференции двух или более лазерных лучей. Параметры оптической решетки, такие как постоянная решетки или глубина потенциальных ям, можно легко регулировать, изменяя длину волны, поляризацию или интенсивность лазерных лучей. Это, в частности, позволяет управлять динамикой ультра холодных атомов, удерживаемых в решетках. Например, оказалось возможным наблюдение квантового фазового перехода между режимами сверхтекучести и изолятора Мотта. Более того, поскольку атомы в оптической решетке во многом схожи с электронами в кристалле, оказалось возможно использовать их для исследования ряда фундаментальных явлений физики твердого тела, которые по различным причинам были не доступны в реальных кристаллах. Другой важной областью применения оптических решеток является атомная нанолитография, где они используются для управления процессом осаждения атомов. И, наконец, оптические решетки открывают новые возможности в области, связанной с реализацией квантовых вычислений и созданием квантовых компьютеров. При этом с экспериментальной точки зрения во всех этих приложениях особую роль играет проблема стабилизации атомов.

Действительно, в нерезонансных оптических решетках отсутствует внутренний механизм охлаждения. Несмотря на то, что в таких решетках шум спонтанного излучения сказывается слабо, во всех реальных

экспериментах присутствуют шумы из-за флуктуаций параметров решетки и столкновений с атомами фона. Поэтому, для того чтобы иметь возможность предотвращать воздействие на атомы внешних шумов или даже охлаждать их, необходимо позаботиться о механизме диссипации энергии. Такой механизм, может быть обеспечен за счет введения петли обратной связи, с помощью которой можно управлять поведением системы, используя информацию о ее состоянии, полученную из измерения. Этот метод не оказывает воздействие на внутренние степени свободы атомов и, поэтому, может быть применен к различным видам атомов и даже к молекулам.

Теория управления посредством обратной связи хорошо разработана для классических систем, то есть в том случае, когда можно получить полную информацию о динамических переменных. Однако в случае квантовых систем, таких как, например, атомы и холодные газы, классическая теория управления перестает быть адекватной. Однако к настоящему времени достаточно полно исследована работа метода обратной связи для единичных систем (атом, мода оптического резонатора) и в квантовом режиме. Стоит отметить, что эти исследования включают в себя не только теоретическое описание, но и экспериментальную реализацию этого метода управления. В частности, было продемонстрировано охлаждение единичного атома и единичного иона посредством обратной связи. Особый интерес представляет также использование обратной связи для управления многочастичными системами. Несмотря на то, что квантовые особенности применения обратной связи для управления многочастичными системами теоретически исследовались, важные аспекты работы этого метода далеко не полностью освещены.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы являлось всестороннее исследование возможностей метода обратной связи для управления многоатомными системами в оптических решетках.

В соответствии с указанной целью исследования поставлены следующие задачи:

1. Развить описание работы метода управления посредством обратной связи коллективной координатой атомов, удерживаемых в оптической решетке, с учетом как квантово-механических особенностей, так и многочастичного характера системы.
2. На основании полученной теории исследовать динамику атомов в результате применения серии актов обратной связи.

3. Определить факторы, влияющие на эффективность управления посредством обратной связи квантовыми многоатомными системами, и установить границы применимости метода.
4. Исследовать возможности метода обратной связи для стабилизации атомных систем, подверженных воздействию различных типов внешних источников шума.

Научная новизна

1. В диссертации впервые рассматривается последовательная квантовая теория измерения координат атомов в оптических решетках с учетом многочастичного характера проблемы.
2. Впервые получены аналитические выражения для атом-атомных корреляций, возникающих в результате применения обратной связи, и проанализировано совокупное влияние неточности измерения и корреляций между атомами на эффективность управления посредством обратной связи.
3. Впервые исследовано совместное влияние петли обратной связи и источников внешнего шума на динамику атомов в оптической решетке. Продемонстрирована принципиальная возможность увеличения времени жизни (стабилизации) атомов за счет управления их коллективной координатой.

Практическая ценность

На основании результатов работы предложен и обоснован новый метод охлаждения атомов. Кроме того, показано, что метод обратной связи может быть использован для увеличения времени жизни атомов в оптической решетке.

Защищаемые положения

1. Общий вид наблюдаемой, измеряемой в экспериментах по управлению коллективной координатой атомов в оптических решетках.
2. Аналитическое выражение для преобразования атом-атомных корреляций в результате применения мгновенных актов обратной связи. Аналитическое выражение для изменения средней энергии атомов в результате действия обратной связи с учетом свободной эволюции атомов между актами обратной связи.
3. Атом-атомные корреляции, возникающие в результате работы обратной связи, оказывают значительное влияние на эффективность управления. С учетом этого факта предложен новый метод охлаждения

атомов, комбинирующий идеи обратной связи и симпатетического охлаждения.

4. Управление посредством обратной связи может быть использовано для стабилизации атомов в оптической решетке. Происходит подавление как длинноволнового, так и коротковолнового шумов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- 1-ом российско-французском лазерном симпозиуме для молодых ученых «1st Russian-French Laser Physics Workshop for Young Scientists» (Санкт-Петербург, 2004);
- международной конференции «International Conference on Coherent and Nonlinear Optics» (Санкт-Петербург, 2005);
- международной конференции XI «International Conference on Quantum Optics» (Минск, Беларусь, 2006).

По теме диссертации опубликована 1 статья и 2 тезиса докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 138 страницах, включает 33 рисунка и список литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлено краткое введение в проблемы управления атомными ансамблями и обсуждение современного состояния исследований в этой области. В частности, проанализированы стандартные способы охлаждения атомов (лазерное и испарительное охлаждение). Эти методы обладают рядом недостатков, которые ограничивают их применение для охлаждения большинства элементов из периодической системы, а также молекул. Так, например, метод

испарительного охлаждения эффективно работает только для атомов, имеющих большие сечения упругих столкновений. Для реализации лазерного охлаждения необходимо наличие особой структуры энергетических уровней атома. Кроме того, этот метод основан на резонансном взаимодействии атомов с лазерным полем и, поэтому, не позволяет охлаждать атомы ниже предела отдачи фотона.

В качестве альтернативы лазерному охлаждению обсуждается возможность манипулирования атомами в нерезонансных полях. Наиболее эффективно такое управление может быть реализовано в далеко отстроенных от резонанса оптических решетках. В связи с этим рассматриваются особенности управления атомами в таких решетках, а также представлены основные области их применения. Однако, как отмечается в работе, охлаждение атомов или их стабилизация в таких оптических решетках невозможны без использования дополнительных механизмов, приводящих к диссипации энергии. В данной работе для реализации такого механизма предлагается использовать метод обратной связи.

Таким образом, вторая часть первой главы посвящена обсуждению управления атомами и атомными ансамблями посредством обратной связи. В начале приводится краткая история развития этого метода на примере классических систем. Затем проводится обзор основных экспериментальных и теоретических работ, посвященных управлению квантовыми системами. Действительно, в оптических решетках атомы удерживаются в областях пространства, сравнимых с их длиной волны де Бройля. Это означает, что при описании воздействия на атомы обратной связи необходимо учитывать квантово-механические особенности этой проблемы. В первой главе отмечается, что к настоящему времени для единичных квантовых систем работа метода обратной связи описана достаточно полно. Несмотря на большой интерес и определенный прогресс в этой области исследования влияние квантовой обратной связи на многочастичные системы освещено в литературе не достаточно подробно. Так, несмотря на первые эксперименты всестороннее теоретическое исследование возможностей обратной связи для управления атомами в оптических решетках по имеющимся у автора сведениям проведено не было. Это обстоятельство и мотивировало данную диссертационную работу.

Вторая глава посвящена квантово-механическому описанию петли обратной связи, включающей измерение и последующий сдвиг коллективной координаты атомов в одномерной оптической решетке. Схема экспериментальной реализации такой петли обратной связи показана на

Рис.1. Измерение коллективной координаты атомов в оптической решетке может быть осуществлено на основании сигналов с детекторов D_1 и D_2 , регистрирующих интенсивности лазерных лучей после взаимодействия с атомами. Разность сигналов детекторов ΔP зависит от положения атомов относительно минимумов потенциальных ям. Корректировка положения атомов осуществляется посредством сдвига оптической решетки, достигаемого с помощью фазового модулятора РМ.

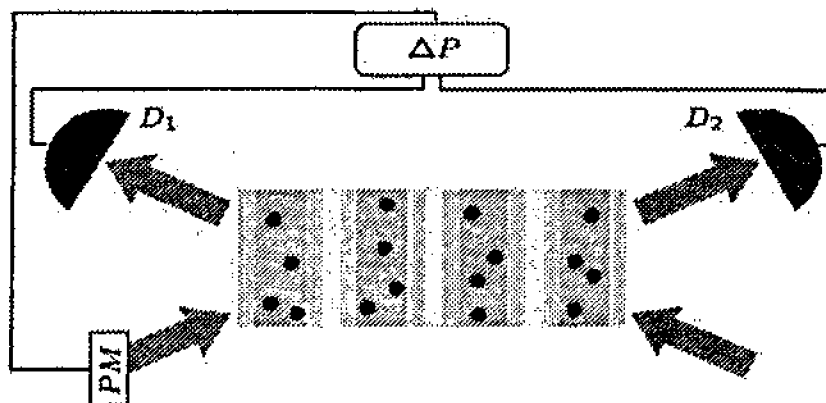


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, реализующей управление коллективной координатой атомов в оптической решетке.

Описание проводится в рамках модели, предполагающей, что в каждой ячейке решетки содержится не более одного атома. Это позволяет, во-первых, пренебречь туннелированием атомов между соседними узлами и различать атомы в соответствии с занимаемыми узлами. Во-вторых, в этом случае можно не учитывать взаимодействие атомов. Кроме того, предполагается, что энергии атомов достаточно малы так, что потенциал оптической решетки можно представить набором гармонических потенциальных ям.

В первой части главы излагается основа квантовой теории измерений - постулаты фон Неймана, непосредственное применение которых, используя формализм проекционных операторов, позволяет описывать идеально точные измерения. Затем обсуждается обобщение теории проекционных измерений, допускающее возможность конечной ошибки измерения. Процесс измерения при этом рассматривается как взаимодействие измеряемой квантовой системы с некоторой квантовой же системой-посредником. Поскольку в результате взаимодействия состояния указанных систем становятся скоррелированными, то, производя после выключения взаимодействия, точное измерение системы-посредника, описываемое

формализмом фон Неймана, можно получить информацию об интересующей характеристике квантовой системы. Результат измерения в этом случае описывается с помощью операторов, называемых эффектами, полный набор которых, как иногда говорят, образует положительную операторно-значную меру.

Во второй части второй главы на основании обобщенной квантовой теории измерений проводится описание процесса измерения коллективной координаты атомов в оптической решетке, которое осуществляется в результате взаимодействия атомов с полем лазерных лучей, формирующих решетку. Исходя из полуклассического рассмотрения следует что, детектируя разность числа фотонов Δn в лазерных лучах, возникающую за счет взаимодействия с N атомами, можно измерить коллективную переменную атомов, которая представляет собой сумму синусов их координат

$$\sum_{i=1}^N \sin(2kx_i) = \frac{\delta}{(dE_0)^2} \frac{\Delta n}{\tau}, \quad (1)$$

где δ - отстройка частоты лазеров от атомного перехода, d - дипольный момент атома, E_0 - амплитуда поля, τ - время взаимодействия атомов с полем.

Рассматривая взаимодействие ансамбля N двухуровневых атомов с полем кольцевого резонатора, имеющего две распространяющиеся навстречу друг другу моды, получено общее выражение, описывающее преобразование оператора плотности многоатомной системы в результате измерения разницы числа фотонов в модах. При этом оказалось, что измеряемая экспериментально разность числа фотонов определяет не просто сумму синусов атомных координат, а более сложную функцию, зависящую как от суммы синусов, так и от суммы косинусов

$$\Delta n = 2|\alpha|^2 \text{Tr} \left\{ \hat{\rho}(0) \sin(2\varepsilon\tau \sqrt{(\sum_{i=1}^N \sin(2k\hat{x}_i))^2 + (\sum_{i=1}^N \cos(2k\hat{x}_i))^2}) \right. \\ \left. \times \frac{\sum_{i=1}^N \sin(2k\hat{x}_i)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N \sin(2k\hat{x}_i))^2 + (\sum_{i=1}^N \cos(2k\hat{x}_i))^2}} \right\}, \quad (2)$$

где $\hat{\rho}(0)$ - оператор плотности, содержащий внешние степени свободы, в начальный момент времени, $|\alpha|$ - амплитуда поля, ε - константа взаимодействия. Анализ полученного выражения показал, что в зависимости от величины произведения константы взаимодействия и времени взаимодействия $\varepsilon \cdot \tau$ можно выделить два режима измерения. Первый режим соответствует слабому взаимодействию атомов с полем ($\varepsilon \cdot \tau \rightarrow 0$), когда можно пренебречь влиянием атомов на поле. В этом случае выражение для

разницы числа фотонов совпадает с полуклассическим результатом. Второй режим реализуется в случае, когда произведение $\varepsilon \cdot \tau$ достаточно велико. Очевидно, что время взаимодействия должно быть выбрано достаточно малым, поэтому данный режим измерения может быть реализован только в случае сильного взаимодействия.

На примере измерения фазового сдвига оптической решетки, необходимого для уменьшения потенциальной энергии атомов в методе охлаждения посредством так называемого «оптического встряхивания», описанного в работе [Averbukh I.Sh., Prior Y. // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94. – P. 153002], проводится сравнение двух указанных режимов измерения. В общем случае для определения требуемого фазового сдвига одного измерения не достаточно. Однако при условии, что имеется априорная информация о некоторой наблюдаемой системы, приемлемая точность может быть достигнута в результате единственного измерения. При этом в случае слабого взаимодействия ошибка определяется первой степенью отклонения известного среднего значения от точного. При работе в режиме сильного взаимодействия ошибка определяется квадратом упомянутой флуктуации. Таким образом, продемонстрировано преимущество использования режима сильного взаимодействия. Также показано, что при условии достаточно большого числа атомов реализация режима сильного взаимодействия не требует экстремально больших значений константы взаимодействия.

Далее рассмотрен случай низких энергий атомов, когда отклонения положений атомов от центров, занимаемых ими потенциальных ям малы по сравнению с размерами этих ям. Величина, которая измеряется в этом случае посредством измерения разности числа фотонов в модах, представляет собой среднюю координату атомов $\hat{q} = \sum_{i=1}^N \hat{x}_i / N$. Полученный в этом приближении оператор разрешения измерения имеет гауссову форму с шириной, характеризующей точность измерения.

В конце второй главы описывается заключительная фаза петли обратной связи, состоящая в сдвиге средней координаты атомов, основанном на результате измерения. Этот сдвиг организуется таким образом, чтобы компенсировать отклонение измеренной координаты от нулевого значения. Сдвиг описывался с помощью группы унитарных преобразований, генератором которой являлся канонически сопряженный коллективной координате оператор полного импульса.

Предполагая мгновенность и дискретность обратной связи, получено выражение для преобразования оператора плотности системы в результате действия одного акта обратной связи, учитывающее измерение и сдвиг,

$$\hat{\rho}_N(t_+) = \int dq \hat{U}(q) \hat{M}(q) \hat{\rho}_N(t_-) \hat{M}^*(q) \hat{U}^*(q), \quad (3)$$

где $\hat{\rho}_N(t_{\pm})$ - оператор плотности атомов в моменты времени t_- и t_+ , соответственно, до и сразу же после применения акта обратной связи. $\hat{M}(q)$ - оператор разрешения измерения, $\hat{U}(q)$ - оператор сдвига. В выражении (3) возникает интегрирование по q , поскольку в процессе каждого акта обратной связи результаты измерения обычно не регистрируются, и, следовательно, конечное состояние системы получается усреднением по всевозможным результатам измерения.

В третьей главе исследуется динамика атомов в оптической решетке за счет применения ряда шагов обратной связи. Решение задачи проводится в терминах фазово-пространственного распределения, используя многоатомную функцию Вигнера. Для этой функции, используя преобразование (3) с явным видом операторов разрешения измерения и сдвига, получено выражение, позволяющее описать динамику состояния атомного ансамбля в результате применения двух последовательных шагов обратной связи и свободной эволюции между ними. При выводе этого выражения предполагалось, что при малых временах можно пренебречь влиянием внешних шумов.

Эффективность процедуры обратной связи определялась, анализируя изменение средней энергии атомов за счет применения каждого шага обратной связи: $\Delta E_{n+1} = E_{n+1} - E_n$, где E_n и E_{n+1} обозначают среднюю энергию после n -го и $(n+1)$ -го шагов, соответственно. Чтобы найти это изменение потребовалось знание корреляций между координатами $X_{\alpha\beta} = \langle \hat{x}_\alpha \hat{x}_\beta \rangle$, импульсами $P_{\alpha\beta} = \langle \hat{p}_\alpha \hat{p}_\beta \rangle$, а также координатами и импульсами $\Gamma_{\alpha\beta} = \langle \hat{x}_\alpha \hat{p}_\beta + \hat{p}_\beta \hat{x}_\alpha \rangle / 2$ двух произвольных атомов с индексами α и β . Для этих корреляций в свою очередь были получены замкнутые уравнения, связывающие корреляции, возникающие в результате применения данного шага обратной связи, с корреляциями на предыдущем шаге. Выражение для изменения средней энергии за счет применения $(n+1)$ -го шага обратной связи имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \Delta E_{n+1} = \frac{1}{2} \left[N \sigma_{n+1}^2 + \frac{1}{N \sigma_{n+1}^2} - \cos^2(\omega \Delta t) \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N X_{\alpha\alpha}^n - \sin^2(\omega \Delta t) \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N P_{\alpha\alpha}^n \right. \\ \left. - \cos^2(\omega \Delta t) \frac{2}{N} \sum_{\mu < \nu} X_{\mu\nu}^n - \sin^2(\omega \Delta t) \frac{2}{N} \sum_{\mu < \nu} P_{\mu\nu}^n - \sin(2\omega \Delta t) \frac{1}{2N} \sum_{\mu, \nu=1}^N \Gamma_{\mu\nu}^n \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где σ_{n+1} - разрешение измерения на этом шаге, ω - частота колебаний атома в потенциале оптической решетки, Δt - временной интервал между актами обратной связи. Первые два слагаемых в этом выражении описывают шум

измерения. Слагаемое пропорциональное σ_{n+1} возникает за счет неточности измерения коллективной координаты, слагаемое обратно пропорциональное σ_{n+1} описывает шум обратного воздействия измерения. Показано, что шум за счет измерения может быть минимизирован, выбирая оптимальное значение разрешения измерения $\sigma_{opt} = N^{-1/2}$. Помимо нагревания за счет шума это выражение содержит также вклады, ответственные за компенсацию энергии, зависящие от потенциальной (третье слагаемое) и кинетической (четвертое слагаемое) энергии атомов до акта обратной связи. Кроме того, изменение средней энергии определяется двухатомными корреляциями, которые в зависимости от состояния атомов могут давать как положительный, так и отрицательный вклад, увеличивая или, соответственно, уменьшая эффективность работы метода. Вклад различных корреляций может контролироваться за счет выбора времени свободной эволюции атомов между двумя последовательными шагами обратной связи. В работе найдено оптимальное время свободной эволюции, используя которое можно добиваться максимально возможной компенсации энергии на каждом шаге.

Во второй части третьей главы исследуется действие обратной связи на атомы, находящиеся изначально в состоянии термодинамического равновесия. Продемонстрировано, что в этом случае за счет возникновения отрицательных атом-атомных корреляций вычитание энергии в результате применения обратной связи происходит только на первых двух шагах. Кроме того, обнаружено, что несмотря на присутствие квантового шума предельная энергия атомов, при которой метод все еще обеспечивает вычитание энергии, ограничивается только классическими шумами за счет неточности измерения координаты атомов.

Однако для достижения этого предела на практике необходимо обеспечить механизм, разрушающий атом-атомные корреляции, возникающие за счет применения обратной связи. Действительно, в работе показано, что в отсутствие такого механизма отрицательные корреляции приводят к тому, что охлаждение прекращается еще до того, как достигается предел, определяемый шумом измерения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что именно атом-атомные корреляции играют доминирующую роль в определении эффективности работы метода обратной связи. Показано, что при наличии механизма, разрушающего корреляции, а также, используя оптимальные параметры петли обратной связи (разрешение измерения и время между двумя последовательными шагами), можно в принципе охладить атомы до энергии основного состояния в потенциале решетки.

В конце третьей главы обсуждается принципиальная возможность использования в качестве механизма, разрушающего корреляции, внешнего шума, для компенсации которого, в частности, и применяется метод обратной связи. Очевидно, однако, что этот шум будет приводить не только к распаду корреляций, но и к нагреванию атомов. Можно ожидать, что процесс распада корреляций не более эффективен чем нагревание, поэтому в присутствии шума существенно охладить атомы, скорее всего, не удастся. Однако на основании результатов данной главы можно предположить, что обратная связь может быть эффективно использована для подавления влияния внешних шумов (стабилизации) на систему атомов и увеличения их времени жизни в решетке.

Кроме того, на основании результатов проведенного в третьей главе исследования предлагается и обосновывается новый метод охлаждения атомов, комбинирующий идеи обратного воздействия и симпатетического охлаждения. Именно, предлагается охлаждать смесь из атомов двух сортов, один из которых удерживается в решетке, другой же не чувствует ее присутствия. В результате действия обратной связи энергия отнимается от захваченных в решетке атомов, однако за счет упругих столкновений последних со свободными атомами вся система приходит в состояние равновесия с меньшей температурой. Таким образом, механизмом разрушения корреляций, о котором шла речь выше, является в данном случае взаимодействие удерживаемых атомов со свободными. Приводится пример реализации предлагаемой схемы для атомов щелочных металлов с ядерным спином $3/2$ (например, ${}^7\text{Li}$, ${}^{39}\text{K}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{87}\text{Rb}$).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния внешних шумов на атомы в оптической решетке, а также возможности подавления этих шумов с помощью метода обратной связи. Рассмотрено воздействие на динамику атомов коротковолнового и длинноволнового шумов. Первый тип шума соответствует столкновениям атомов решетки с атомами фона, второй тип характеризует флуктуации параметров решетки. В перезонасных оптических решетках, когда спонтанным рассеянием фотонов можно пренебречь, именно эти шумы ограничивают время жизни атомов.

В первой части четвертой главы изучается воздействие на атомы, удерживаемые в оптической решетке, шума за счет столкновений с атомами фона. Моделируя этот шум как процесс взаимодействия каждого атома с некоторым резервуаром, независимым от резервуаров других атомов, выводится квантовое кинетическое уравнение для эволюции оператора плотности системы. Затем с помощью этого уравнения получается замкнутая система уравнений движения для атом-атомных корреляций. Решая

аналитически эти уравнения, показано, что взаимодействие с резервуаром приводит к затуханию двухатомных корреляций, а также к росту энергии атомов до некоторого равновесного значения, определяемого температурой резервуара. При этом скорости этих процессов оказываются одинаковыми. Тем не менее, поскольку разрушающий корреляции механизм все же присутствует, возникающее нагревание может быть, по крайней мере, частично компенсировано посредством обратной связи. Для подтверждения этого было произведено моделирование динамики атомов, взаимодействующих с независимыми резервуарами и одновременно подверженных воздействию обратной связи. Анализируя полученные в результате моделирования зависимости энергии атомов от времени, обнаружено, что стационарная энергия атомов оказывается ниже равновесного значения. Однако эта энергия зависит от температуры резервуара и не может быть зафиксирована на начальном уровне. Таким образом, можно сделать вывод, что рассматриваемая схема обратной связи способна противостоять лишь не очень интенсивным шумам такой природы. Однако на практике влияние фонового газа действительно не велико и, значит, его подавление посредством описанной петли обратной связи может быть весьма продуктивно.

Во второй части четвертой главы обсуждается влияние шума за счет флуктуаций поля решетки, под которыми, прежде всего, понимаются флуктуации фазы решетки или, другими словами, пространственного положения узлов решетки. В отличие от предыдущего случая такая ситуация должна описываться в предположении, что все атомы взаимодействуют с одним резервуаром. В этом случае уравнения движения для двухатомных корреляций оказываются зависящими от корреляций между единичным атомом и центром масс, а также от вторых моментов самого центра масс. Поэтому для того чтобы найти необходимые двухатомные корреляции дополнительно решались системы уравнений движения для указанных корреляций. Важно, что решения всех этих систем получались аналитически.

Исследование эволюции энергии атомов, находящихся изначально в состоянии термодинамического равновесия, за счет взаимодействия их с общим резервуаром, показало, что в этом случае ее стационарное значение оказывается ниже энергии резервуара. Это объясняется спецификой состояния термодинамического равновесия и отражает тот факт, что некоторые состояния атомных ансамблей оказываются мало подверженными влиянию такого длинноволнового шума. Кроме того, результатом воздействия на коллективные переменные является также образование положительных атом-атомных корреляций, чего не происходило для

независимых резервуаров. Принципиальное отличие эволюции корреляций для общего и независимых резервуаров было обнаружено при рассмотрении действия этих резервуаров на атомы в когерентном состоянии. Это отличие состоит в том, что в случае независимых резервуаров на больших временах эволюции корреляции достигают стационарного значения, в случае же общего резервуара они продолжают осциллировать. Это связано с тем, что общий резервуар не влияет на относительное движение атомов, и несмотря на то, что степени свободы центра масс приходят в равновесие относительное движение остается неизменным.

Изучая воздействие обратной связи на динамику атомов взаимодействующих с общим резервуаром, показано, что, если значения параметров обратной связи (разрешение измерения и временной интервал между шагами) выбраны оптимальным образом, применение обратной связи позволяет удерживать среднюю энергию атомов значительно ниже равновесного значения. При этом со временем энергия не приходит к стационарному значению, а осциллирует, опускаясь практически до первоначального значения в моменты применения обратной связи и возрастая за счет взаимодействия с резервуаром между актами обратной связи (Рис. 2 сплошная кривая). Отметим, что для независимых резервуаров аналогичная динамика наблюдалась на фоне постепенного увеличения энергии.

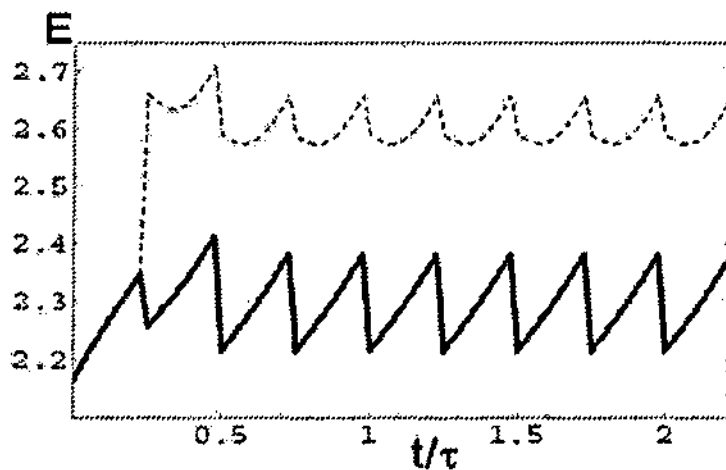


Рис. 2. Временная зависимость средней энергии атома, взаимодействующего с общим резервуаром и одновременно подверженного воздействию обратной связи. Сплошная кривая соответствует оптимальному значению разрешения измерения, пунктирная - неоптимальному.

Поскольку на практике, очевидно, неизбежны отклонения параметров петли обратной связи от оптимальных значений, были рассмотрены ситуации, в которых разрешение измерения и время между актами обратной связи имели неоптимальные значения. В частности, выбирая значение разрешения измерения ниже оптимального, показано, что обратная связь не только не компенсирует воздействие шума, но приводит и к дополнительному нагреванию за счет шума обратного воздействия измерения (Рис. 2 пунктирная кривая).

Анализируя динамику энергии атомов для различных временных интервалов между актами обратной связи, продемонстрировано, что уменьшение временного интервала не приводит к нежелательным последствиям для стабилизации атомов. Действительно, для задач стабилизации основную роль, по-видимому, играет верхняя граница, до которой поднимается энергия. При уменьшении временного интервала эта граница остается практически на том же уровне, что и для его оптимального значения. Также показано, что, выбирая слишком большие временные интервалы, стабилизация не достигается, поскольку в этом случае применение обратной связи не позволяет полностью компенсировать воздействие резервуара.

Общий вывод, который можно сделать по результатам четвертой главы, состоит в том, что метод обратной связи может быть использован как для подавления шума столкновений с фоном, так и шума, вызванного флуктуациями параметров оптической решетки. Однако компенсация последнего оказывается более эффективной, поскольку этот шум влияет на коллективные степени свободы атомов, на которые непосредственно воздействует обратная связь.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получено выражение для преобразования оператора плотности многоатомной системы в оптической решетке в результате действия одного акта обратной связи, включающего измерение и сдвиг коллективной координаты атомов.
2. На основе этого выражения с явным видом операторов измерения и сдвига получено интегральное преобразование, позволяющее найти функцию Вигнера атомов после применения данного шага обратной связи, если известна эта функция сразу же после применения предыдущего шага. Это выражение учитывает также свободную эволюцию атомов между шагами обратной связи.

3. Найдены аналитические выражения для преобразования атом-атомных корреляций, возникающих в результате применения обратной связи.
4. Для определения эффективности работы метода обратной связи, используя результат для атом-атомных корреляций, получено выражение для изменения средней энергии атомов в результате действия обратной связи с учетом свободной эволюции атомов между актами обратной связи. Помимо слагаемых, отвечающих за компенсацию энергии, в этом выражении содержатся слагаемые, ответственные за нагревание. Они возникают за счет неточности измерения коллективной координаты (классический шум) и обратного воздействия измерения (квантовый шум). Кроме того, это выражение содержит двухатомные корреляции, которые в зависимости от состояния атомов могут давать как положительный, так и отрицательный вклад, снижая или, соответственно, увеличивая эффективность работы метода.
5. Анализируя выражение для изменения средней энергии атомов, найдены оптимальные параметры петли обратной связи (разрешение измерения и временной интервал между шагами обратной связи), позволяющие добиться максимальной компенсации энергии на каждом шаге.
6. Изучено действие обратной связи на атомы, находящиеся изначально в состоянии термодинамического равновесия. Продемонстрировано, что в этом случае эффективность компенсации энергии посредством обратной связи ограничивается отрицательными атом-атомными корреляциями, возникающими за счет самой процедуры обратной связи.
7. Показано, что при наличии механизма, разрушающего отрицательные атом-атомные корреляции, а также при правильном выборе параметров петли обратной связи, можно в принципе охладить атомы до энергии основного состояния в потенциале решетки.
8. На основании полученных результатов предложен и обоснован новый метод охлаждения атомов, комбинирующий идеи обратного воздействия и симпатетического охлаждения.
9. Исследовано влияние на динамику атомов в оптической решетке двух типов внешних шумов: шума за счет столкновений с атомами фона и шума, связанного с флуктуациями параметров решетки.
10. Для обоих типов шумов продемонстрирована стабилизация энергии атомов в результате применения обратной связи. Показано, однако, что подавление шума, вызванного флуктуациями параметров решетки, происходит более эффективно.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. *Ivanova T., Ivanov D., Wallentowitz S.* Feedback cooling of atoms in optical lattices. - St. Petersburg, 2004. - Technical digest of The 1st Russian-French Laser Physics Workshop for Young Scientists.

Иванова Т., Иванов Д., Валленовиц С. Охлаждение атомов посредством обратной связи в оптических решетках. – Санкт-Петербург, 2004. – Сборник тезисов 1-го российско-французского семинара по лазерной физике для молодых ученых (личный вклад 75%).

2. *Ivanov D., Ivanova T.* Quantum feedback of atoms in optical lattices. - St. Petersburg, 2005. – Technical digest of the International conference on Coherent and Nonlinear Optics.

Иванов Д., Иванова Т. Применение квантовой обратной связи к атомам в оптических решетках. – Санкт-Петербург, 2005. – Сборник тезисов международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (личный вклад 80 %).

3. *Ivanova T., Ivanov D.* Quantum limits of feedback cooling in optical lattices. // JETP Letters - 2005. - Vol. 82. - P. 482.

Иванова Т., Иванов Д. Квантовый предел охлаждения посредством обратной связи в оптических решетках. // Письма в ЖЭТФ – 2005. – В. 82. – С. 482 (личный вклад 70 %).

**Отпечатано копировально-множительным участком отдела
обслуживания учебного процесса физического факультета СПбГУ.**

Приказ № 571/1 от 14.05.03.

Подписано в печать 14.10.06 с оригинал-макета заказчика.

**Ф-т 30x42/4, Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз., Заказ № 435/с
198504, СПб, Ст. Петергоф, ул. Ульяновская, д. 3; тел. 428-43-00.**

