

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Работы направлены исследование динамики квантовых состояний ансамбля холодных атомов в световых полях. Анализ основан на представленном подходе позволяющем найти численное решение задачи кинетики атомов в световых полях с учетом квантовых эффектов отдачи при взаимодействии атомов с фотонами поля. Данная задача представляет интерес для анализа как пределов лазерного охлаждения атомов в световых полях, так и для анализа динамики квантовых состояний атомов, для построения атомных интерферометров, чувствительных к внешним воздействиям. Исследования возможности построения на их основе высокочувствительных квантовых датчиков, в частности датчиков инерционных ускорений, вращений, гравиметров и градиентометров гравитационного поля. Работа в данном направлении также представляет особый интерес для развития оптических стандартов частоты нового поколения на основе холодных атомов и ионов.

2. Тема работы

Экспериментальное и теоретическое исследование динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах

3. Состав коллектива

1. Прудников Олег Николаевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт лазерной физики СО РАН, руководитель
2. Кирпичникова Анна Анатольевна, аспирант, Институт лазерной физики СО РАН, исполнитель

4. Информация о гранте

грант РФФИ № 19-29-11014 «Проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание высокоточных гравиметров нового поколения на основе интерференции холодных атомов».

5. Научное содержание работы

Проект направлен на решение фундаментальной задачи - контроля квантовых состояний пучка холодных нейтральных атомов когерентными лазерными полями, включая контроль не только его внутренних, но и поступательных степеней свободы и их взаимосвязь.

Основой атомных интерферометров, в отличие от оптических, является пучок холодных атомов, взаимодействие которого с лазерным полем сводится к расщеплению его на несколько квантовых состояний с различными поступательными (импульсными) и внутренними состояниями, и к отражению с инвертированием внутренних квантовых состояний. Измеряемый сигнал флуоресценции на выходе интерферометра зависит от разности населенности атомов в основном и возбужденном состояниях, которая определяется разностью фаз атомных состояний, приобретаемых при движении атомов по различным квантовым траекториям. Приобретаемая атомами разность фаз имеет высокую чувствительность к внешним воздействиям (вращению, ускорению и действия гравитационного потенциала). Данное обстоятельство является принципиальным и используется для создания высокочувствительных атомных интерферометров. Отметим, что первые предложения использования схемы основанную на резонансном взаимодействии атома с разнесенными бегущими волнами в качестве атомного интерферометра была высказана в работе Борде (Ch. Borde) [1], где также было предложено использовать атомный интерферометр для измерения вращения и ускорения. К настоящему времени работы в данном направлении получили широкое развитие в ведущих мировых научных центрах (обзор проводимых достижений и проводимых работ будет дан в разделе «Анализ современного состояния исследований в данной области»).

Базовым элементом рассматриваемой задачи являются фундаментальные процессы, при взаимодействии атомов со световым полем. Стоит отметить, что задача о взаимодействии атомов со световым полем достаточно сложна и для ее решения используют различные приближения. Так, пренебрежение эффектом отдачи (обменом энергии и импульсом в единичных актах поглощения/излучения фотонов поля) часто используется в различных спектроскопических задачах, где взаимодействие атомов с лазерным полем приводит лишь к изменению его внутренних состояний. В задаче лазерного охлаждения атомов световым полем напротив, как правило, используют квазиклассическое описание, сводящееся к силовому действию светового поля на атомы (см. например [2-4]). При этом изменение его внутренних состояний исключается из анализа. Имеющиеся квантовые подходы, учитывающие изменение внутренних и поступательных степеней свободы, а также их корреляцию ограничиваются рядом простых примеров, как правило, одномерными конфигурациями световых полей и случаем стационарных (нединамических) решений (см. например [5-7]). Отметим, что список приведенных работ далеко не полный, но в целом отражает направленность развитых теоретических подходов и математических методов, использующихся для решения задачи о взаимодействии атомов со световым полем с учетом кинетических эффектов. Несмотря на указанную сложность, развитие современных вычислительных систем может позволить выйти на новый уровень в развитии теоретических методов и численных

подходов в решении задачи о временной динамике квантовых состояний атомных ансамблей в когерентных световых полях, выходящие за рамки рассматриваемых ранее приближений. Рассматриваемая в проекте задача экспериментального и теоретического исследования динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах подразумевает развитие новых теоретических подходов и их экспериментальной проверки для динамического описания кинетики квантовых состояний атомов в световых полях с полным учетом эффектов отдачи, т.е. с учетом изменения внутренних степеней свободы атомов в результате оптической накачки и поступательных степеней свободы при передаче импульса энергии фотонами поля в полях произвольной пространственной конфигурации для реальных атомов (цезия, рубидия – наиболее перспективных для использования в атомных интерферометрах) с учетом вырожденности их атомных уровней по проекции углового момента.

Развитие данных методов позволит провести анализ различных схем атомных интерферометров чувствительных к вращениям, ускорениям и воздействиям гравитационного поля Земли, степень их чувствительности к другим воздействиям (магнитных и электрических полей), исследования влияния квантовых шумов лазерных систем в атомных интерферометрах и исследования возможности построения на их основе высокочувствительных квантовых датчиков, в частности датчиков инерционных ускорений, вращений, гравиметров и градиентометров гравитационного поля.

список литературы:

1. Ch.J. Bordé, Atomic interferometry with internal state labeling, Physics Letters A 140, 10-12 (1989).
2. А.П. Казанцев и др «Механическое действие света на атомь», Москва «Наука», 1991
3. В.Г. Миногин, В.С. Летохов, Давление лазерного излучения на атомы, М.: Наука, 1986
4. О.Н. Прудников, А.В. Тайченачев, А.М. Тумайкин, В.И. Юдин, Кинетика атомов в поле, образованном эллиптически поляризованными волнами, ЖЭТФ 125, 499-517 (2004)
5. D.J. Wineland, W.M. Itano “Laser cooling of atoms” Phys. Rev. A v.20 1521 (1979)
6. A Aspect, E Arimondo, R Kaiser, N.Vansteenkiste, and C. Cohen-Tannoudji “Laser cooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping: theoretical analysis” JOSAB v. 6, 2112 (1989)
7. О.Н. Прудников, Р.Я. Ильенков, А.В. Тайченачев, А.М. Тумайкин, В.И. Юдин "Стационарное состояние ансамбля атомов малой плотности в монохроматическом поле с учетом эффектов отдачи", ЖЭТФ, т.139, 1074-1080 (2011)

5.1. Постановка задачи

1. Непосредственной задачей проекта является развитие численных методов, с использованием современных вычислительных систем (с использованием ИВЦ НГУ), направленных на решение задачи динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах.
2. Важной фундаментальной задачей является построение физико-математической модели, позволяющей описывать динамику квантовых состояний атомных ансамблей с полным учетом как эффектов насыщения та и эффектов отдачи и их взаимной корреляции.
3. Разрабатываемая модель будет использоваться для исследования динамики квантовых состояний реальных атомов (Cs, K, Rb, Mg, ионов Yb⁺) анализа и проектирования различных схем атомных интерферометров, исследования степени их чувствительности к вращениям, ускорениям, воздействиям гравитационного поля Земли и другим (воздействиям магнитных и электрических полей).
4. Теоретический анализ и численные расчеты проводятся на базе ИВЦ НГУ. Экспериментальная проверка полученных результатов будет проводиться на базе экспериментальных установок Института Лазерной Физики СО РАН (с ионами Yb, либо атомами Mg).

5.2. Современное состояние проблемы

В современном мире все более широкое применение находят квантовые технологии, основанные на применении законов квантовой физики для практического управления сложными квантовыми системами на уровне их индивидуальных компонентов – атомов, ионов, молекул, примесных центров, фотонов и т.п. В целом в области квантовой обработки информации принято выделять четыре направления развития исследований: атомные часы и системы синхронизации; квантовые коммуникации; квантовые сенсоры и датчики; квантовые вычисления. Экспериментальные и теоретические исследования по атомной интерферометрии были начаты еще в 80-х годах прошлого столетия. Существенный прогресс этих исследований [1-5] за последние 20 лет связан с развитием экспериментальных методов и технологий лазерного охлаждения атомов и атомной оптики. В настоящее время, в исследования в данном направлении вовлечены ведущие институты, университеты и инновационные компании.

Текущий уровень развития исследований атомных интерферометров в мире достаточно высок. Так например, атомные интерферометры на холодных атомах позволяют создавать гравиметры с чувствительностью на уровне 50 мкГал/√Гц и точностью измерений на уровне 1 мкГал (относительная точность dg/g ~ 10⁻⁹). Уже коммерчески доступные образцы переносимых гравиметров с АИ на холодных атомах изготавливаются фирмой mQuans (<http://www.muquans.com/>). Стоит отметить, что, несмотря на то, что подобные экземпляры в настоящий момент дают сравнимую с классическими баллистическими лазерными гравиметрами точность измерений, атомные гравиметры

значительно превосходят классические варианты в чувствительности, что позволяет проводить измерения за значительно более короткие времена, что открывает потенциал для использования их в том числе и на подвижной платформе. Несмотря на множество достигнутых результатов объем научных работ в данном направлении непрерывно растет, что связано с высокими перспективами атомных интерферометров.

1. A.D. Cronin, J. Schmiedmayer, D.E. Pritchard, Optics and interferometry with atoms and molecules, Rev. Mod. Phys. 81, 1051–1129 (2009).
2. P.R. Berman (ed.), Atom Interferometry, Academic Press, (1997).
3. Б.Я. Дубецкий, А.П. Казанцев, В.П. Чеботаев, В.П. Яковлев, Интерференция атомов и получение атомных пространственных решеток в световых полях, Письма в ЖЭТФ 39, 531-533 (1984).
4. Ch.J. Bordé, Atomic interferometry with internal state labeling, Physics Letters A 140, 10-12 (1989).
5. J.F. Clauser, Ultra-high sensitivity accelerometers and gyroscopes using neutral atom matter-wave interferometry, Physica B 151, 262-272 (1988).

5.4. Полученные результаты

Проведен цикл теоретических работ направленных на построение физико-математической модели для анализа атомного интерферометра. Модель позволяет описывать кинетику атомов в резонансных лазерных полях при взаимодействии с узкими оптическими переходами, в условиях существенного влияния эффектов отдачи при взаимодействии атомов с фотонами поля. Данная модель является необходимым инструментом, позволяющим описывать квантовую эволюцию атомной системы в атомном интерферометре чувствительном к внешним воздействиям (действию инерциальных сил, вращению, ускорению, воздействию гравитационного поля, воздействию электрических и магнитных полей). Проведены первичные исследования динамики квантовых состояний реальных атомов ^{87}Rb в атомных интерферометрах рис.1. Данная модель будет применяться для дальнейших исследований влияния полевых сдвигов на точностные характеристики атомных интерферометров и выявления условий их минимизации для достижения перспективных уровней точности атомного гравиметра выше $dg/g < 10^{(-9)}$ для измерения гравитационного ускорения рис.2.

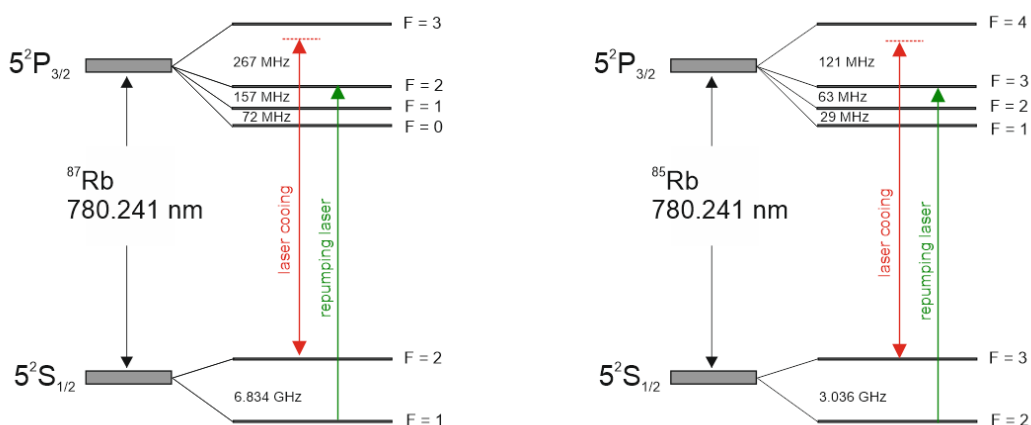


Рис. 1. Сверхтонкая структура атомов рубидия-87, рубидия-85. Красными стрелками указаны переходы, используемые для лазерного охлаждения атомов, зелеными – переходы для предотвращения оптической накачки на нижний уровень сверхтонкого расщепления.

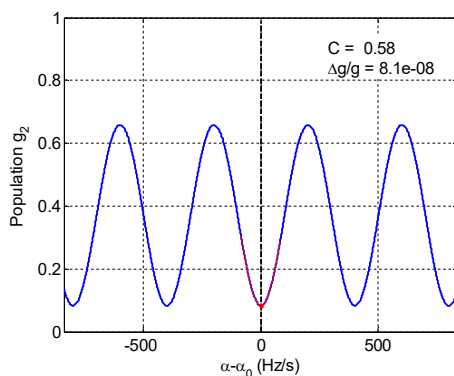


Рис. 2. Расчет сигнала интерферометра на основе представленной теоретической модели для атомов ^{87}Rb с шириной импульсного распределения $\Delta p = 10 \hbar k$, что соответствует температуре холодных атомов $T_0 \approx 12.3 \text{ мК}$. Однофотонные отстройки $\delta_{10} = -2989.98 \text{ МГц}$, $\delta_{20} = -2990 \text{ МГц}$. Разность отстроек подобрана с учетом минимизации полевого сдвига уровней $5^2S_{1/2}(F=2, m=0)$ и $5^2S_{1/2}(F=1, m=0)$. Здесь время свободной эволюции атомов $T = 50 \text{ мс}$, время $\pi/2$ -импульса $\tau = 1 \text{ мкс}$ соответствует интенсивности встречных волн $I = 330 \text{ мВт/см}^2$.

2. Проведено исследование пределов лазерного охлаждения атомов с использованием резонансных полю атомных переходов при различных параметрах отдачи (отношение кинетической энергии атомов при поглощении/излучении фотона поля к естественной ширине линии). Показано, что описываемая в рамках квазиклассической теории возможность субдоплеровского охлаждения атомов может быть не достижима для атомов, для которых параметр отдачи не предельно мал. Кроме того, показано, что при использовании волн lin \perp lin конфигурации наиболее предпочтительна по сравнению с σ_+ - σ_- конфигурацией для достижения наименьших температур в условиях охлаждения в молаисе.

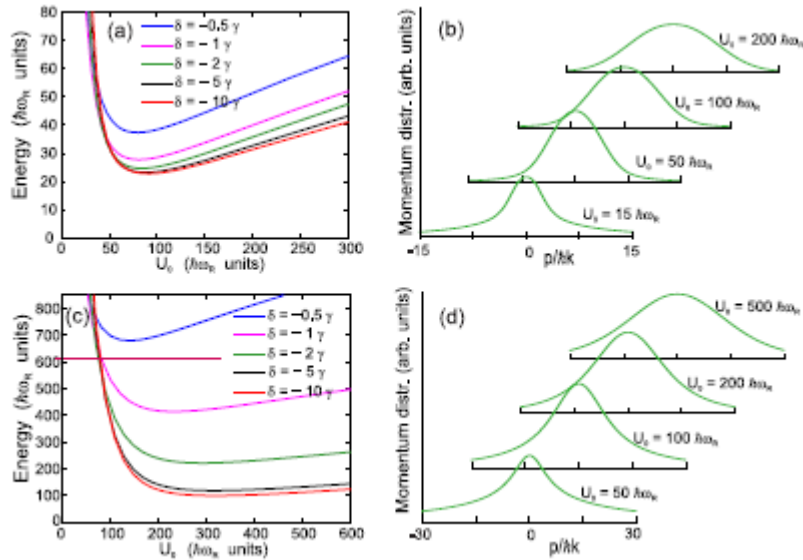


Рис.3. Средняя кинетическая энергия холодных атомов как функция полевого сдвига U_0 для различных отстроек δ в поле lin \perp lin конфигурации (a) и поле σ_+ - σ_- конфигурации (c). Импульсное распределение атомов при различных U_0 для отстройки $\delta = -2\gamma$ в поле lin \perp lin (b) и поле σ_+ - σ_- (d). Параметр отдачи $\epsilon_R = 10^3$. Красной горизонтальной линией обозначена кинетическая энергия атомов соответствующая доплеровскому пределу лазерного охлаждения $k_B T_D = \hbar\gamma/2$.

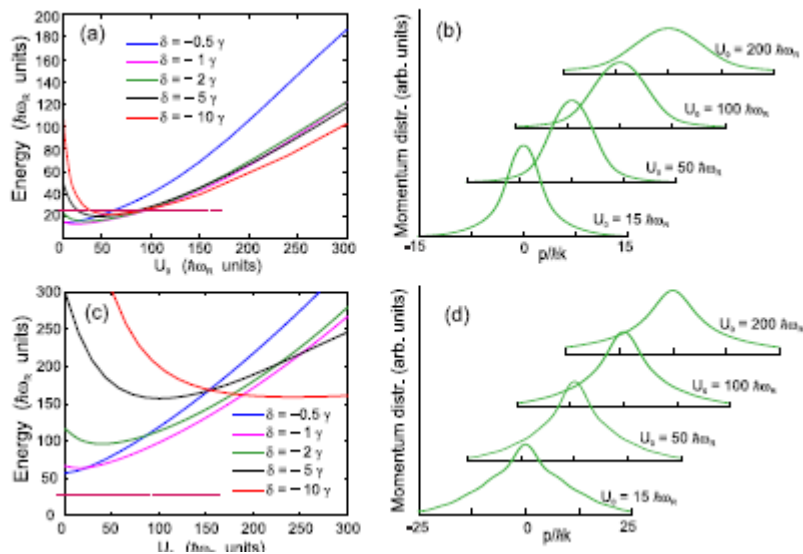


Рис.4. Средняя кинетическая энергия холодных атомов как функция полевого сдвига U_0 для различных отстроек δ в поле lin \perp lin конфигурации (a) и поле σ_+ - σ_- конфигурации (c). Импульсное распределение атомов при различных U_0 для отстройки $\delta = -2\gamma$ в поле lin \perp lin (b) и поле σ_+ - σ_- (d). Параметр отдачи $\epsilon_R = 10^2$. Красной горизонтальной линией

обозначена кинетическая энергия атомов соответствующая доплеровскому пределу лазерного охлаждения $k_B T_D = \hbar\gamma/2$.

На рисунках 3, 4 показаны результаты расчетов проведенных на основе развитого метода поиска стационарного решения для атомной матрицы плотности с полным учетом квантовых эффектов отдачи при взаимодействии атомов с фотонами поля. Получена зависимость средняя кинетическая энергия атомов достигаемая при лазерном охлаждении в световом поле в зависимости от оптического сдвига U_0 (определяемого интенсивностью светового поля) при различных отстройках δ светового поля от резонанса s , используемым для охлаждения, оптическим переходом. При этом, для рис.4, несмотря на предсказания квазиклассических теорий в условиях малого параметра отдачи $\epsilon_R = 10^{-2}$ субдоплеровское лазерное охлаждение не достигается при использовании σ_+ - σ_- конфигурации светового поля.

6. Эффект использование кластера в достижении целей работы

Исследование динамики атомного ансамбля в резонансных световых полях является достаточно сложной задачей, поскольку требует учета изменения не только внутренних состояний атомов, но и поступательных в результате эффектов отдачи вызванных процессами излучения/поглощения фотонов поля, так и учета взаимной корреляции изменения внутренних и поступательных степеней свободы. На начальном этапе исследований был предложен квазиклассический подход, который в рамках квазиклассических приближений позволил разделить эволюцию внутренних степеней свободы и поступательных, что позволило получить выражения для силы и коэффициентов диффузии описывающих эволюцию поступательных степеней свободы атомов. Тем не менее, квазиклассическое приближение нарушается при попытках описания сверхглубоких режимов лазерного охлаждения, наиболее интересных для научных задач, а также не позволяет описывать атомы взаимодействующие с лазерным полем резонансным узким оптическим переходам.

Современное развитие вычислительной техники позволяет подступиться к данному классу задач. Тем не менее, в силу их достаточной сложности требуется развитие современных вычислительных методов, которые могли бы позволить проводить анализ динамики квантовых состояний атомов с учетом эффектов отдачи.

7. Перечень публикация содержащих результаты работы

1. A.A. Kirpichnikova, O.N. Prudnikov, R.Ya. Il'enkov, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin "Laser cooling limits in fields with a polarisation gradient of atoms with different recoil energies" *Quantum Electronics* v. 50, 939 – 946 (2020) [A.A.Кирпичникова, О.Н.Прудников, Р.Я.Ильенков, А.В.Тайченачев, В.И.Юдин, Пределы лазерного охлаждения в полях с градиентом поляризации атомов с различной энергией отдачи, *Квантовая Электроника*, т.50, № 10, с. 939-946 (2020)] DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL17408>
2. A.V. Taichenachev, A.N. Goncharov, A.E. Bonert, V.I. Baraulya, M.A. Tropnikov, S.A. Kuznetsov, O.N. Prudnikov and S.N. Bagayev "Atom interferometry with ultracold Mg atoms: frequency standard and quantum sensors" *Journal of Physics: Conference Series* 1508 012002 (2020). doi:10.1088/1742-6596/1508/1/012002
3. R.Ya. Il'enkov, O.N. Prudnikov, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, "Laser cooling of atoms at narrow optical transitions in fields with a polarisation gradient", *Quantum Electronics* 50 (6) 551– 555 (2020) <http://dx.doi.org/10.1070/QEL17337> [Р. Я. Ильенков, О. Н. Прудников, А. В. Тайченачев, В. И. Юдина "Лазерное охлаждение атомов на узких оптических переходах в полях с градиентом поляризации", *Квантовая электроника*, т.50 (6), 551-555 (2020)]
4. O. N. Prudnikov, R. Ya. Il'enkov, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin "Scaling law in laser cooling on narrow-line optical transitions" *Phys. Rev. A* 99, 023427 (2019) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.023427>
5. O.N. Prudnikov, R.Ya. Il'enkov, A.V. Taichenachev, and V.I. Yudin "Laser cooling on narrow-line optical transitions in monochromatic light" *AIP Conference Proceedings*, 2098, 020013 (2019)
6. A.A. Kirpichnikova, O.N. Prudnikov, D. Wilkowski "Investigation of the possibility of ultra-deep laser cooling using a quadrupole transition" *Quantum Electronics* v. 49, 443 – 448 (2019) <https://doi.org/10.1070/QEL16999>