

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Работы направлены исследование динамики и лазерного охлаждения атомов в световых полях с полным учетом эффектов отдачи, т.е. обмена импульсом при взаимодействии с фотонами поля. Вычислительные модели строятся из базовых принципов квантовой механики и основаны на квантовом кинетическом уравнении для атомной матрицы плотности, позволяющей описывать когерентные и некогерентные процессы взаимодействия. В целом, задача лазерного охлаждения актуальна для многих направлений современной физики, включая работы в области фундаментальных свойств квантовой системы холодных атомов бозе- и фермиконденсатов, для реализации элементов квантовой логики и квантовых вычислений. Высокую актуальность приобрели работы в области создания современных стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов, а также квантовых сенсоров на основе интерференции волн материи.

2. Тема работы

Полностью квантовая теория магнитооптической ловушки

3. Состав коллектива

1. Прудников Олег Николаевич, д.ф.-м.н., директор, Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирский государственный университет, руководитель
2. Юдин Валерий Иванович, г.н.с., Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирский государственный университет, исполнитель

4. Информация о гранте

РНФ 25-42-00093 RSF-NSFC: Новые методы прецизионной лазерной спектроскопии в атомной интерферометрии

5. Научное содержание работы

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 лазерного охлаждения в магнито-оптической ловушке (МОЛ).
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) в МОЛ. Анализа оптимальных режимов МОЛ.
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.

5.2. Современное состояние проблемы

Магнитооптические ловушки в настоящее время являются одним из эффективных инструментов для захвата и лазерного охлаждения нейтральных атомов [2, 3]. Работа МОЛ основана на сочетании эффектов лазерного охлаждения, вызванного действием диссипативных сил спонтанного светового давления, и глубокого потенциала (порядка нескольких K), образуемого данными силами в пространственно неоднородном магнитном поле. Холодные атомы, приготовленные в МОЛ, находят широкое применение в различных областях физических исследований, например, в нелинейной спектроскопии сверхвысокого разрешения, при исследовании охлаждения и динамики атомов в оптических решетках, в области фундаментальной метрологии при создании первичных стандартов частоты нового поколения [4, 5, 6, 7], для достижения Бозе-Эйнштейновской конденсации [8, 9] и исследовании ферми-газов [10, 11, 12].

Теория магнитооптической ловушки достаточно хорошо описана в рамках квазиклассического представления, в терминах сил светового давления, действующих на атомы [2, 3]. Достижимая температура лазерного охлаждения атомов определяется балансом процессов диссипации кинетической энергии атомов, вызванной диссипативными силами светового давления от встречных волн, и процессом нагрева, связанным с флуктуацией сил при взаимодействии атомов с единичными фотонами поля. В силу того, что атомы концентрируются в области минимума магнитооптического потенциала, где магнитное поле равно нулю, то для оценок температуры лазерного охлаждения в МОЛ преимущественно используют оценки для температуры атомов в оптическом моласисе [3]. Так в полях, образованных волнами с противоположными круговыми поляризациями – σ_+ – σ_- конфигурация, субдоплеровские механизмы трения [13] приводят к достижению температур ниже доплеровского предела.

Учет квантовых эффектов отдачи в задачах лазерного охлаждения атомов, приводит к отклонениям от результатов квазиклассической теории [14]. Учет влияния квантовых эффектов отдачи является наиболее актуальным в задачах лазерного охлаждения с использованием узкими оптическими переходами [15], так и для охлаждения атомов, характеризующихся недостаточно малым параметром квазиклассичности [16, 17].

Отметим, что в рамках квазиклассического приближения задачу численного анализа лазерного охлаждения атомов в МОЛ можно решить и вне рамок приближения оптического моласиса, поскольку выражения для сил, действующих на атомы в световых полях могут быть получены в общем случае, в присутствии неоднородного магнитного поля [18].

В рамках же квантовых подходов, позволяющих точно учесть влияние квантовых эффектов отдачи на кинетику атомов, численный анализ задачи лазерного охлаждения в МОЛ не представлялся возможным. Действительно, использование квантовых подходов в задачах лазерного охлаждения в оптическом моласисе основано на периодичности решения на масштабах длины волны [19, 20, 21]. Также, в развитых квантовых подходах Монте Карло [22, 23] характерный пространственный масштаб задачи определяется минимальным разбиением дискретизации волновой функции в импульсном пространстве, и, в силу ограничения ресурсов вычислительных систем составляет $\Delta p/hk \approx 0.1 - 0.01$, что приводит к характерным пространственным масштабам задачи нескольких десятков длин волн. Для задачи кинетики атомов в МОЛ характерно два масштаба: масштаб изменения параметров светового поля, определяемый длиной волны $\Lambda_{micro} \sim \lambda$, а также макроскопический масштаб, задающийся более медленной зависимостью магнито-оптического потенциала вблизи центра МОЛ. Макроскопический масштаб определяется областью локализации холодных атомов в МОЛ $\Lambda_{macro} \sim 10^4 - 10^5 \lambda$ и достигает сантиметровых масштабов. Поэтому, например, для решения задачи кинетики атомов в МОЛ в рамках численных квантовых подходов Монте-Карло в импульсном пространстве следует выбирать сетку для волновой функции в масштабах $-p_{max} \dots p_{max}$, где p_{max} определяется температурой атомов в ловушке, а разбиение сетки должно составить $\Delta p \approx h/\Lambda_{macro}$, для охвата всей области локализации атомов в МОЛ. Столь детализированное разбиение в импульсном пространстве, а также учет реальной структуры внутренних состояний атомов, накладывает высокие требования к вычислительным системам, что делает такую задачу достаточно сложной для численной реализации.

список литературы:

- [1] Townsend C G, Edwards N H, Cooper C J, Zetie K P, Foot C J, Steane A M, Szriftgiser P, Perrin H and Dalibard J 1995 Phys. Rev. A 52(2) 1423–1440
- [2] Raab E, Prentis M, Cable A, Chu S and Pritchard D 1987 Phys. Rev. Lett. 59 2631–2634
- [3] Metcalf H J and Straten P v d 1999 Laser Cooling and Trapping (Springer)
- [4] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H and Katori H 2020 Nat. Photonics 14 411–415
- [5] Lion G, Panet I, Wolf P, Guerlin C, Bize S and Delva P 2017 Journal of Geodesy 91 597–611
- [6] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, Schaffer S A, Beloy K, Nicolodi D, Brown R C, Hinkley N, Milani G, Schioppo M, Yoon T H and Ludlow A D 2018 Nature 564 87–90
- [7] Nicholson T, Campbell S, Hutson R, Bloom B, McNally R, Zhang W, Barret M, Safronova M, Strouse G, Tew W and Ye J 2015 Nat. Commun. 6 6896
- [8] Cornell E and Wieman C E 2002 Rev. Mod. Phys. 74 875
- [9] Ketterle W 2002 Rev. Mod. Phys. 74 1131
- [10] DeMarco B and Jin D S 1999 Science 285(10) 1703–1706
- [11] DeMarco B, Bohn J L, Burke J P, Holland M and Jin D S 1999 Phys. Rev. Lett. 82(21) 4208–4211
- [12] Truscott A G, Strecker K E, McAlexander W I, Partridge G B and Hulet R G 2001 Science 291 2570–2572
- [13] Dalibard J and Cohen-Tannoudji C 1989 J. Opt. Soc. Am. B 6 2023–2045
- [14] Kirpichnikova A A, Prudnikov O N, Il'enkov R Y, Taichenachev A V and Yudin V I 2020 Quantum Electronics 50 939
- [15] Prudnikov O N, Il'enkov R Y, Taichenachev A V and Yudin V I 2019 Phys. Rev. A 99(2) 023427
- [16] Prudnikov O N, Brazhnikov D V, Taichenachev A V, Yudin V I, Bonert A E, Il'enkov R Y and Goncharov A N 2015 Phys. Rev. A 92(6) 063413
- [17] Kirpichnikova A, Prudnikov O and Wilkowski D 2019 Quantum Electronics 49 443
- [18] Prudnikov O N, Taichenachev A V, Tumaikin A M and Yudin V I 2008 Phys. Rev. A 77(3) 033420
- [19] Prudnikov O N, Taichenachev A V, Tumaikin A M and Yudin V I 2007 Phys. Rev. A 75(2) 023413
- [20] Prudnikov O N, Il'enkov R Y, Taichenachev A V, Tumaikin A M and Yudin V I 2011 JETP 112 939–945 12
- [21] Castin Y and Dalibard J 1991 Europhysics Letters 14 761–766
- [22] Mølmer K, Castin Y and Dalibard J 1993 J. Opt. Soc. Am. B 10 524–538
- [23] Castin Y and Mølmer K 1995 Phys. Rev. Lett. 74(19) 3772–3775
- [24] Khersonskii V K, Moskalev A N and Varshalovich D A 1988 Quantum Theory Of Angular

5.4. Полученные результаты

В рамках проведенной работы предложен альтернативный метод решения квантовой задачи кинетики атомов в МОЛ. Метод основан на численном решении квантового кинетического уравнения для атомной матрицы плотности с полным

учетом квантовых эффектов отдачи, вызванных взаимодействием с единичными фотонами поля. В работе мы приводим сравнение полученных результатов с результатами задачи лазерного охлаждения в оптическом моласисе, которое часто используется в качестве нулевого по магнитному полю приближения для оценки параметров лазерного охлаждения атомов в МОЛ. Также мы указываем на ряд особенностей в кинетике атомов, возникающих в МОЛ.

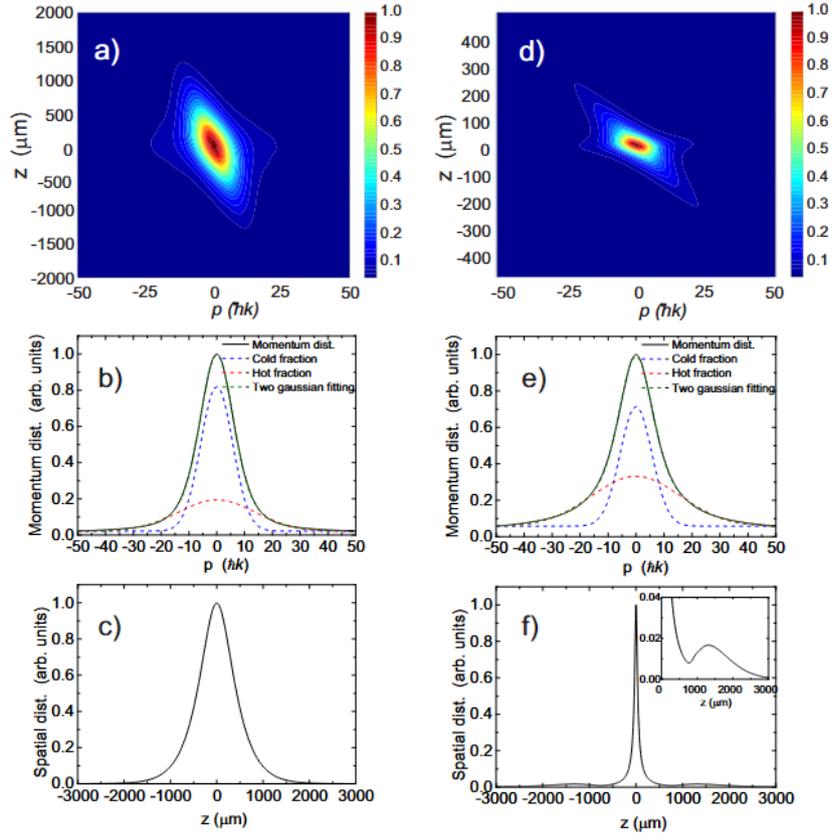


Рис. 1 Стационарное решение квантового кинетического уравнения (20) для атомов ^{87}Rb (оптический переход $Fg = 2 \rightarrow Fe = 3$) в МОЛ. Параметр отдачи для рассматриваемого перехода атомов ^{87}Rb $\varepsilon_R = \hbar k^2 / (2M \gamma) = 6 \cdot 10^{-4}$. Градиент магнитного поля $\partial B / \partial z = 1 \text{ Gs/cm}$ (a,b,c) и $\partial B / \partial z = 10 \text{ Gs/cm}$ (d,e,f). Частота раби встречных волн $\Omega = \gamma$, отстройка $\delta = -5\gamma$. (a,d) Функция распределения в фазовом пространстве $\mathcal{A}(z, p)$. (b,e) Импульсное распределение атомов в МОЛ $\mathcal{A}(p) = \int \mathcal{A}(z, p) dz$. (c,f) Координатное распределение атомов в МОЛ $\mathcal{A}(z) = \int \mathcal{A}(z, p) dp$.

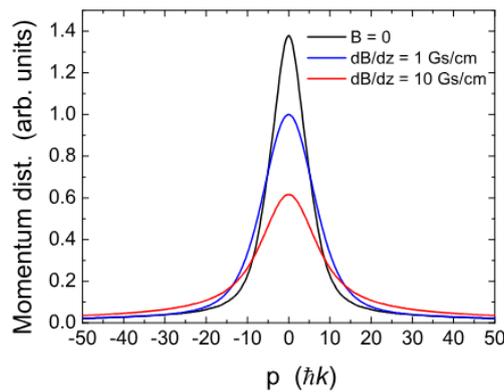


Рис. 2: Импульсное распределение атомов для задачи лазерного охлаждения в оптическом моласисе в поле $\sigma^+ - \sigma^-$ конфигурации (черная линия), в МОЛ при градиенте магнитного поля $\partial B / \partial z = 1 \text{ Gs/cm}$ (синяя линия) и $\partial B / \partial z = 10 \text{ Gs/cm}$ (красная линия). Рассмотрено охлаждение атомов ^{87}Rb (оптический переход $Fg = 2 \rightarrow Fe = 3$). Частота раби встречных волн $\Omega = \gamma$, отстройка $\delta = -5\gamma$.

Показано, что стационарное состояние атомов в магнитооптической ловушке имеет существенно неравновесный характер Рис.1 и, в целом, не описывается гауссовой функцией для импульсного распределения. Фактически выделяются две фракции атомов с температурами, соответствующими субдоплеровскому и доплеровскому режимам

лазерного охлаждения. Влияние магнитного поля на кинетику атомов в области их локализации, т.е. вблизи минимума магнитооптического потенциала приводит к отличиям в температуре холодных атомов от результатов, полученных для задачи лазерного охлаждения в оптическом моласисе.

Таким образом, даже в температурном режиме МОЛ возникает зависимость температуры от градиента магнитного поля Рис.2, определяющего размер облака холодных атомов в ловушке. При больших градиентах магнитного поля наблюдается двухкомпонентное распределение атомов в координатном пространстве определяемое нелинейной зависимостью магнитооптической силы от координаты. Таким образом, представленные результаты указывают на то, что простые модели, использующие для оценки температуры атомов в МОТ результаты модели оптического моласиса и, соответственно, для размера облака холодных атомов неприменимы для МОТ с большим градиентом магнитного поля и требуют коррекции.

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. О.Н. Прудников, Д.С. Крысенко, А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, С.В. Чепуров, Н.С. Лапин, С.Н. Багаев «Лазерное охлаждение иона иттербия-171 без использования магнитного поля» ЖЭТФ, т.166, вып.4, стр. 556 (2024)
2. А.А. Кирпичникова, Р.Я. Ильенков, О.Н. Прудников, «Двухтемпературное распределение атомов в условиях субдоплеровского охлаждения» ЖЭТФ, Том 166, Вып. 4, стр. 517 (2024)
3. R.Y. Ilenkov, O.N. Prudnikov, A.V. Taichenachev, et al. “Limits of Laser Cooling of Light Alkali Metals in a Polychromatic Light Field”, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., v.88, 1034–1040 (2024).
4. V. I. Yudin, A. V. Taichenachev, M. Yu. BasalaeV, et al. “Theory of nonlinear sub-doppler spectroscopy taking into account atomic-motion-induced density-dependent effects in a gas” Phys. Rev. A 109, 043504 (2024)
5. D. S. Krysenko, O. N. Prudnikov, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, S. V. Chepurov, and S. N. Bagaev, “Ground-state electromagnetically-induced-transparency cooling of 171Yb^+ ions in a polychromatic field” Phys. Rev. A 108, 043114 (2023)
6. O. N. Prudnikov, R. Ya. Ilenkov, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, and S. N. Bagaev, “Deep macroscopic pure-optical potential for laser cooling and trapping of neutral atoms” Phys. Rev. A 108, 043107 (2023)