

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук,

д.ф.-м.н.  С.Ю. Савинов

« 21 » февраля 2018г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Мохненко Сергея Николаевича «Межатомные и радиационные эффекты на ультрахолодных атомах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Работа С.Н. Мохненко посвящена теоретическому исследованию спектроскопических характеристик межатомного взаимодействия атомов в высоковозбужденных, ридберговских, состояниях. Целью диссертации является теоретическое исследование ван-дер-ваальсовского взаимодействия щелочных атомов в ридберговских состояниях, исследование радиационных свойств высоковозбуждённых атомов в циркулярных состояниях и систематический учет неопределенностей, индуцируемых нелинейно оптическими, мультипольными и ангармоническими эффектами в стандартах частоты.

Информация о таких характеристиках необходима для решения большого числа задач в области атомной физики, квантовой электроники, таких как создание прецизионных оптических стандартов частоты и времени, создание на ридберговских атомах ультрахолодных квантовых устройств для обработки информации и т.д.

Работы по исследованию ридберговских состояний атомов и ионов, начавшиеся более сорока лет назад, в настоящее время получили новый импульс для получения и контроля сильно возбужденных атомных частиц, а возможность их локализации в оптических решетках и ловушках позволила существенно повысить точность измерений спектральных свойств изолированных атомов и создать на их основе ультрапрецизионные стандарты частоты и времени.

Таким образом, тема диссертации С.Н. Мохненко представляется актуальной как с точки зрения решения фундаментальных задач, так и для прикладных исследований.

Диссертация С.Н. Мохненко состоит из введения, обзора проблемы по литературе, 4-х глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах: из них 6 статей в рецензируемых журналах и 8 работ в тезисах конференций.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи, актуальность, новизна и научная значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлен обзор литературы, в котором анализируются основные работы, касающиеся исследований в области взаимодействия ультрахолодных ридберговских атомов.

В **первой** главе **Дисперсионное взаимодействие атомов в ридберговских состояниях** изложена теория возмущений для изолированных состояний, позволяющая описывать

асимптотическое взаимодействие между ридберговскими состояниями атомов. Выполнены численные расчеты энергий вандер-ваальсова взаимодействия щелочных атомов в высоковозбужденных состояниях, а результаты расчетов представлены в виде простых аппроксимационных функций, зависящих от главного квантового числа для неприводимых компонент тензора Ван-дер-Ваальса. Показано, что полученные аппроксимационные формулы справедливы для произвольных главных квантовых чисел n и позволяют получить постоянную Ван-дер-Ваальса C_6 в зависимости от угла между осью квантования и межъядерной осью.

Во второй главе диссертации **Резонансные эффекты в дисперсионном взаимодействии ридберговских атомов** в рамках теории возмущений для вырожденных состояний определены условия перехода зависимости C_6/R^6 для энергии асимптотического межатомного взаимодействия в условиях ферстеровского резонанса в зависимость вида C_3/R^3 . Определены межатомные расстояния, при которых возникает такой переход. Определена постоянная $C_3(\theta, n, l, M)$ магнитного квантового числа M и угла θ между осью квантования и межъядерной осью.

Во третьей главе **Вероятности радиационных переходов из ридберговских состояний атомов** получены асимптотики амплитуд для дискретно-дискретных, дискретно-пороговых и дискретно-непрерывных радиационных переходов из циркулярных состояний ридберговских атомов, т.е. из состояний с $|m| = n-1$, где m и n – магнитное и главное квантовые числа, соответственно. Поскольку амплитуды радиационных переходов экспоненциально убывают с увеличением разности $|n'-n|$ пропорционально $\exp(-|n'-n|)$, основной вклад в скорость спонтанного распада и де-возбуждения, индуцированного излучением черного тела, для состояний с большими орбитальными моментами l , дают переходы на ближайшие верхние и нижние состояния с $n' = n \pm 1$. В главе 3 получена также аналитическая зависимость сечения пороговой и надпороговой фотоионизаций циркулярных состояний от главного квантового числа n . Показано, что ввиду быстрого убывания сечений с ростом n , вклад континуума в сдвиги и уширения состояний с высокими n и l пренебрежимо мал.

В четвертой главе **Эффекты высших порядков во взаимодействии нормальных и метастабильных атомов с полем оптической решетки** представлена теория нелинейных, недипольных и ангармонических эффектов, на основе которой получены оценки неопределенности. На основе численных значений дипольных и мультипольных поляризуемостей атомов магния, рассчитанных ранее в работах с участием автора, предложена стратегия создания и операционного управления стандартом частоты на атомах магния в оптической решетке.

В **Заключении** автор сформулировал основные результаты и выводы диссертации:

1. Получены аналитические выражения для зависимости постоянной ван-дер-ваальсова взаимодействия двух одинаковых ридберговских атомов от ориентации межатомной оси и орбитальных моментов. Тензорные компоненты постоянной Ван-дер-Ваальса для высоковозбужденных щелочных атомов в виде полиномов от главных квантовых чисел. Для S-, P-, D- и F-серий атомов рубидия для полиномов получены численные значения коэффициентов.
2. Определены количественные критерии проявления резонансов Ферстера в энергиях ван-дер-ваальсова взаимодействия ридберговских атомов.
3. Получены аналитические выражения для амплитуд радиационных переходов из циркулярных высоковозбужденных состояний для определения вкладов состояний дискретного и непрерывного спектров в сдвиг и уширение ридберговских уровней под

действием излучения черного тела. Продемонстрировано быстрое уменьшение относительного вклада удаленных дискретных состояний и континуума в термоиндуцированные сдвиги и уширения ридберговских состояний с ростом главного квантового числа.

4. Получены количественные характеристики неопределенностей частоты часового перехода в атомах магния, индуцируемого взаимодействием атомов с оптической решеткой магической частоты.

Наиболее **важными результатами** диссертации С.Н. Мохненко представляются полученные аналитические выражения для компонент тензора постоянной Ван-дер-Ваальса с учетом влияния угла между осью квантования и межъядерной осью. Практический интерес представляют полученные при этом асимптотические полиномиальные выражения для указанных компонент в случае широко используемых в экспериментах по ридберговской блокаде атомов рубидия в состояниях S-F. Новым результатом является также представленное в диссертации исследование зависимости областей преобладания форстеровского механизма дальнедействующего взаимодействия над ван-дер-ваальсовским как функции указанного выше угла.

Наряду с положительными качествами диссертации С.Н. Мохненко следует указать и на ее недостатки.

1. Одним из недостатков **глав 1-3** диссертации является неполное сравнения полученных автором теоретических результатов с данными, известными из литературы, особенно с экспериментальными данными, что частично может быть объяснено наличием небольшого количества работ по измерению коэффициентов ван-дер-ваальсовского взаимодействия между двумя ридберговскими атомами (см., например, экспериментальную работу L. Béguin et al., Phys. Rev. Lett. 110, 263201 (2013)). Отсутствие соответствующего сравнения затрудняет определение точности используемого автором подхода, что, в свою очередь, затрудняет достаточно полно оценить полученные автором результаты.

2. Численные расчеты, выполненные в **1 и 2 главах** диссертации, основаны на применении метода модельного потенциала Фьюса. Помимо того, что в тексте отсутствует явное выражение для потенциала, важно отметить, что указанный потенциал является параметрическим. Было бы естественным сравнить полученные автором результаты с расчётами, выполненными с использованием других модельных потенциалов.

3. Подход, развиваемый автором, основан на представлении волновой функции пары одинаковых ридберговских атомов в виде произведения двух волновых функций изолированных атомов. В этом случае происходит пренебрежение эффектами, связанными с молекулярной природой системы. Такой подход, вероятно, применим при определении величины константы дальнедействующего взаимодействия C_6 , поскольку в рассматриваемых автором системах указанная константа является достаточно большой. Вместе с тем, выполненный автором в главе 2 анализ влияния межъядерного расстояния на характер дальнедействующего взаимодействия в системе (Ван-дер-Ваальсовский или Форстеровский) в значительной мере опирается на точность данных по расстоянию между невозмущенными уровнями системы. С учетом довольно малого исходного дефекта энергии (порядка единиц мегагерц), а также известных из литературы случаев проявления молекулярной природы ридберговских димеров на больших расстояниях (см., например, S. M. Farooqi et al, Phys. Rev. Lett. 91, 183002-1 (2003); J. Stanojevic et al, Phys. Rev. A 78, 052709 (2008)), в диссертации следовало дать оценку вклада соответствующих эффектов.

4. Одним из положений, выносимых на защиту, является выполненное в главе 2 «Определение областей межъядерных расстояний для форстеровского резонансного дисперсионного взаимодействия ридберговских атомов, на которых зависимость от расстояния вида $1/R^6$ превращается в зависимость вида $1/R^3$ ». Следует отметить, что данному вопросу в литературе посвящено довольно много работ (см., в частности, ссылки [1] и [2] из списка литературы к диссертации). Автором по данному вопросу получены новые аналитические формулы, учитывающие, в частности, зависимость характерной области доминирования форстеровского механизма от угла между осью квантования и межъядерной осью, однако формулы для определения характерных величин межъядерных расстояний, соответствующих переходам между указанными механизмами взаимодействия, уже известны в литературе (см. ссылки [1-2], а также работу D. Comparat, P. Pillet, JOSA B 27, A208 (2010)).

5. В главе 3 автором получены аналитические оценки для сечений пороговой и надпороговой однофотонной ионизации атомов в циркулярных состояниях. В связи с этим необходимо отметить, что теория однофотонной ионизации атомов в водородоподобных состояниях создана довольно давно. Используя первый порядок теории возмущений, автор в расчетах оперирует приближенными выражениями для волновых функций атома водорода в связанном и непрерывном состояниях, а также пренебрегает хорошо известными эффектами, связанными с влиянием поляризации атомного остатка внешним электрическим полем (см., например, I.L. Beigman, L.A. Vainshtein, V.P. Shevelko: The effect of polarization of atomic core on oscillator strengths and photoionization cross sections. Opt. Spectr. 28, 425-431 (1970)).

Аналитические результаты, полученные в Главе 3, было бы логично сравнить с хорошо известными точными выражениями для волновых функций водородоподобных состояний (фактор Гаунта, формула Крамерса для сечений фотоионизации, см. K. Omidvar, A.M. McAllister, Evaluation of high-level bound-bound and bound-continuum hydrogenic oscillator strengths by asymptotic expansion. Phys. Rev. A 51, 1063–1066 (1995), M. Pajek, R. Schuch, Radiative recombination in the low-energy regime. Phys. Lett. A 166, 968 235–237 (1992)).

6. Четвертая глава представляет законченную работу, хотя и с недостатком иллюстраций численных расчетов поляризуемостей, в том числе спектров (представлен только один график). Замечания по используемым терминам: "нормальные атомы" - атом в основном состоянии, "лазерная решетка" - оптическая решетка.

Утверждение о возможности наблюдать переходы, свободные от штарковских и доплеровских сдвигов, высказанное в начале главы, некорректно. Этому как раз и посвящена данная глава: можно существенно уменьшить сдвиги, но никак не устранить их полностью. Некоторые утверждения, рисунки (4.1) и формулы (4.15, 4.18, 4.29, 4.30) требуют ссылок и пояснений. Наконец, в списке литературы отсутствуют ссылки на труды отечественных авторов по теме диссертации, например, Б.М. Смирнов, Высоковозбужденные состояния атомов, УФН, 131(4), стр. 577-616 (1980).

Однако эти замечания не влияют на общую положительную оценку представленной диссертации С.Н. Мохненко. Автором были решены поставленные задачи и достигнуты основные цели исследования. Новизна, актуальность и научная ценность полученных результатов не вызывают сомнений. Полученные автором теоретические результаты представляются достоверными. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, докладывались на 8 международных и всероссийских научных конференциях.


Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации представлены в цитируемых работах.

Практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для проектирования и разработки квантовых логических элементов. Оценки эффектов высших порядков во взаимодействии атомов с излучением оптической решетки, могут быть использованы для разработки стандартов частоты и времени нового поколения. Результаты диссертации целесообразно использовать в научно-исследовательских организациях и центрах, занимающихся изучением сильно охлажденных атомов, в том числе атомов в ридберговских состояниях и в оптических решетках: Институт лазерной физики СО РАН, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Санкт-Петербургский государственный университет, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт прикладной физики РАН.

Диссертация С.Н. Мохненко «Межатомные и радиационные эффекты на ультрахолодных атомах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Диссертационная работа С.Н. Мохненко доложена и обсуждена на объединенном семинаре Оптического отдела ФИАН, а отзыв на диссертационную работу С.Н. Мохненко рассмотрен и утвержден на заседании Учёного совета Отделения оптики Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, протокол № 8 от 21 февраля 2018 г.

Руководитель Отделения оптики
Физического института имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук


Лебедев Владимир Сергеевич

Отзыв подготовил:
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории
«Оптика наноструктур и атомно-молекулярных систем»
Отделения Оптике ФИАН


Шевелько Вячеслав Петрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук»,
119991, Москва, Ленинский проспект, д.53,
тел. +7-499-132-69-26, e-mail: shev@sci.lebedev.ru

| |
|--------------------------------|
| Подпись <u>Лебедева В.С. и</u> |
| <u>Шевелько В.П.</u> |
| Зав. канцелярией |
| «21» 02 2018 г. |