

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физ.-мат. наук Магунова Александра Ивановича на диссертацию Мохненко Сергея Николаевича «Межатомные и радиационные эффекты на ультрахолодных атомах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертация С.Н. Мохненко посвящена теоретическому исследованию малых поправок к энергии атома, учет которых является необходимым для корректного описания взаимодействия в ансамбле атомов, охлажденных до сверхнизких температур при использовании разработанных в последние два десятилетия лазерных методов. В частности, в диссертации рассмотрены две задачи, связанные с указанной проблемой: 1) - определение сдвигов энергетических уровней при дальнедействующем (ван-дер-ваальсовском) взаимодействии атомов рубидия в высоких ридберговских состояниях, и 2) - учет поправок к энергии атома магния в основном и метастабильном состояниях в поле оптической решетки при учете нелинейных, мультипольных и ангармоничных эффектов.

Актуальность первой задачи связана с использованием подобных атомных систем для обработки квантовой информации на основе эффекта ридберговской блокады. Полученные диссертантом результаты имеют универсальный характер и могут быть использованы для любых двухатомных систем.

Вторая задача, решаемая в диссертации, актуальна в связи с тем, что атом магния является одним из признанных кандидатов для реализации «часового» перехода между основным и метастабильным состояниями атомов, локализованных полем оптической решетки, в оптических стандартах частоты нового поколения с относительной погрешностью до  $10^{-18}$ . Полученные С.Н. Мохненко результаты предназначены для оптимального выбора параметров лазерного излучения, формирующего оптическую решетку, для минимизации его влияния на точностные характеристики часового перехода.

Практическая ценность диссертационного исследования определяется применением его результатов для развития новейших квантовых технологий.

Диссертация общим объемом в 100 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 88 источников.

Во введении приведено обоснование актуальности исследований взаимодействия между ридберговскими атомами, и атомов магния, локализованных в оптической решетке, с создаваемым ее лазерным полем. Сформулированы цель диссертации и задачи для ее

достижения, научная новизна и практическая значимость. Указаны выносимые на защиту положения. Охарактеризована степень апробация полученных результатов и пределен личный вклад автора в публикациях. Приведены краткое содержание работы и её структура.

В первой главе диссертации дано описание основных особенностей дальнедействующего взаимодействия атомов в ридберговских состояниях. Сформулированы теоретические подходы и условия их применимости для определения взаимного влияния на адиабатическое изменение энергий двух тождественных атомов в одинаковых ридберговских состояниях в зависимости от межатомного расстояния и ориентации оси квантования проекции углового момента. Получены выражения для сдвига энергии за счет ван-дер-ваальсовского взаимодействия в первом и более высоких порядках теории возмущения и из соотношений. Дана относительная оценка «пеннинговской» ионизации одного из атомов во втором порядке теории возмущения. Получены параметрические зависимости от ориентации оси квантования проекции углового момента атомов относительно межатомной оси для потенциала ван-дер-ваальсовского взаимодействия. Приведены результаты расчетов параметров и угловых зависимостей для некоторых ридберговских состояний с использованием модельного потенциала Фьюса для атомных радиальных орбиталей. С использованием разложения по обратным степеням главного квантового числа получены асимптотические выражения параметров потенциала ван-дер-ваальсовского взаимодействия для различных ридберговских серий атома рубидия. Построена аппроксимация коэффициентов асимптотических зависимостей, учитывающая наличие резонансов Ферстера.

Во второй главе диссертации теоретический подход, основанный на втором порядке теории возмущения для диполь-дипольного взаимодействия атомов, адаптирован на случай существования ферстовского резонанса. Исследовано происхождение качественной модификации зависимости потенциала взаимодействия от межатомного расстояния при резонансе Ферстера, как следствие изменения соотношения величин матричного элемента прямого диполь-дипольного перехода между почти вырожденными уровнями серий противоположной четности и изменением расстройки их энергий во втором порядке. Показаны результаты расчета угловых зависимостей для матричного элемента диполь-дипольного прямого перехода и зависимости от межатомного расстояния для отношения этой величины к расстройке энергий при различных направлениях оси квантования относительно межатомной оси для ферстеровских резонансов в состояниях  $n=38^2P_{3/2, M=\pm 1/2}$  и  $n=43^2D_{5/2, M=\pm 1/2}$  атомов рубидия.

В третьей главе исследованы радиационные характеристики атомов в ридберговских циркулярных состояниях с максимальными значениями орбитального момента и его проекции  $|m|=l=n-1$ . Для этих состояний получены асимптотические выражения для радиальных интегралов связанно-связанных дипольных переходов в более высокие состояния и связанно-свободных переходов в континуум. С использованием этих величин получены аналитические выражения для пороговых значений сечений ионизации и их частотной зависимости, используемых для определения сдвига и уширения ридберговских уровней тепловым излучением.

Четвертая глава посвящена теоретическому анализу эффектов, связанных с взаимодействием атомов, локализованных в оптической решетке на нижних колебательных состояниях, с формирующим ее лазерным полем. Эта проблема связана с созданием стандартов частоты оптического диапазона на сильно запрещенном «часовом» переходе с уровнем относительной погрешности до  $10^{-18}$ . В начале главы дан краткий обзор по разработке оптических стандартов частоты на атомах, охлажденных до сверхнизких температур. Использование так называемой «магической» длины волны для поля решетки позволяет избавиться от ведущего вклада динамической дипольной поляризуемости в сдвиг частоты «часового» перехода. Учет поправок следующих порядков, связанных с нелинейными, недипольными и ангармоническими эффектами для атома магния, является предметом диссертационного исследования. Основным результатом является определение стратегии выбора «магической» длины волны оптической решетки для минимизации суммарного сдвига частоты «часового» перехода следующего порядка малости до значения относительной погрешности на уровне  $10^{-18}$ .

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

При определении оценки работы в целом следует отметить, что большая часть результатов для ридберговских атомов получена автором в аналитическом виде. Результаты расчетов энергии ван-дер-ваальсовского взаимодействия щелочных атомов на основе установленных зависимостей от межатомного расстояния и ориентации оси симметрии двухатомной системы относительно оси квантования проекции углового момента атома выполнены впервые. Особого внимания заслуживает возможность определения области межатомных расстояний для наблюдения резонанса Ферстера. Несомненный интерес представляют полученные диссертантом количественные характеристики влияния нелинейных и недипольных эффектов при взаимодействии атомов магния с полем оптической решетки на неопределенность частоты «часового» перехода.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием с известными расчётами в других подходах и с имеющимися экспериментальными данными.

Вместе с этим, имеются следующие замечания к содержанию диссертации:

1) При определении условий применимости статического представления ван-дер-ваальсовского взаимодействия для ридберговских состояний было бы полезно оценить значение максимального межатомного расстояния для пренебрежения эффектом запаздывания (H.V.G. Casimir and D. Polder, Phys. Rev. **73**, 360 (1948))

2) Для определения угловой зависимости энергетических сдвигов при взаимодействии двух одинаковых атомов естественно использовать симметрию системы выбором оси квантования проекции углового момента в направлении межатомной оси, поскольку соответствующие величины для произвольного направления находятся с помощью известных  $D$ -функций Вигнера поворота на соответствующий угол. Насколько такой способ упростил бы или, наоборот, усложнил решение задачи?

3) В тексте диссертации обсуждается сопоставление полученных результатов с имеющимися другими теоретическими и экспериментальными данными, однако, не приводится прямого сравнения.

4) При оценке сдвига частоты на «часовом» переходе в атоме магния  $3s^2\ ^1S_0 - 2s2p\ ^3P_0$  учитываются поправки к энергии уровней за счет M1 и E2 переходов (линейные по интенсивности поля решетки и на шесть порядков меньшие дипольного сдвига) и более высокие порядки за счет гиперполяризуемостей. При этом, однако, не рассматривается возможный вклад в сдвиг и уширение линии «часового» перехода за счет спонтанных процессов упругого и рамановского рассеяния фотонов решетки на «часовых» уровнях атома, линейный по интенсивности поля. Было бы полезным оценить величину этого вклада по сравнению с учитываемыми.

5) Замечания по оформлению:

А) Некоторые рисунки (1.2, 1.3, 2.1, 2.3 и 2.4) расположены через несколько страниц после ссылок на них. Данные на рисунках 2.3 (страница 55) и 2.4 (страница 58) выглядели бы нагляднее в логарифмическом масштабе.

Б) Некоторые вводимые в формулах величины определяются лишь в последующем выражении (величина  $C_{L\mu}$  в (1.2) на странице 13) или даже подразделе (величина  $g_{l_1, J_1, J_2, J_2}$  в (1.21) на странице 25).

В) В тексте содержится ряд опечаток: на странице 70 в обозначении основного состояния атома магния, на странице 84 в верхнем выражении формулы (4.32) вместо  $n$  указана 1, имеются пропущенные и лишние запятые и опечатки в некоторых словах.

Указанные замечания не умаляют сколько-либо важность проведенного в диссертации теоретического исследования и не снижают положительной оценки выполненной диссертантом работы. Полученные автором результаты свидетельствуют о его высокой квалификации физика-теоретика. Основные результаты изложены в 14 публикациях, в том числе 5 статей опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, докладывались на представительных российских и международных конференциях, получив известность у специалистов.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Диссертационная работа полностью соответствует критериям ВАК, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а также паспорту специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика». Считаю, что Мохненко Сергей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент

кандидат физ.-мат. наук  
старший научный сотрудник ИОФ РАН  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Российская федерация, 119991 г. Москва, ул. Вавилова, д. 38  
Тел.: 7(499)503-8335; e-mail: magunov@fpl.gpi.ru

А. И. Магунов

22 февраля 2018 г.

Подпись Магунова Александра Ивановича заверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН,  
доктор физ.-мат. наук



С.Н. Андреев