

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Шевелько В.П. на диссертационную работу Андреева Олега Юрьевича «Квантовоэлектродинамическая теория контура спектральной линии и её приложения к изучению атомных систем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Диссертационная работа Андреева Олега Юрьевича посвящена теоретическому исследованию радиационных и столкновительных характеристик многозарядных ионов на основе квантовой электродинамики (КЭД): уровней энергий, вероятностей переходов, диэлектронной рекомбинации, ионизации многозарядных ионов голыми ядрами и нейтральными атомами. Тема диссертации представляется весьма актуальной как для теории атомных столкновений, релятивистской физики тяжёлых многозарядных ионов, физики ускорителей, так и для большого круга прикладных задач, связанных с ускорением и обтиркой тяжёлых ионов в широкой области кинетических энергий ионов, включая релятивистские энергии. Интенсивные исследования атомных процессов с участием тяжёлых ионов находятся в центре внимания мировых центров таких, как ОИЯИ (Дубна, Россия), GSI (Дармштадт, Германия), GANIL (Каен, Франция), RIKEN (Япония), IMP (Ланьчжоу, Китай) и др., с целью вывести физику многозарядных ионов на новый качественный уровень.

В диссертации разработан новый метод Метод контура линии (МКЛ) на базе квантовоэлектродинамического (КЭД) описания указанных характеристик многозарядных ионов (МЗИ), где КЭД эффекты особенно существенны. В настоящее время существуют ряд таких методов: Метод адиабатической S-матрицы, предложенный М. Гелл-Манном и Ф. Лоу в 1951, и развитый Дж. Сьючером в 1957 г. Позднее в работе Л.Н. Лабзовского [Л.Н. Лабзовский, ЖЭТФ 167 (1970)] на основе работы Сьючера была развита теория сдвига уровней энергий МЗИ. В настоящее время наиболее развитыми являются Метод двухвременной функции Грина (группа В.М. Шабаева, СПбГУ), Метод ковариантного оператора эволюции (группа И. Линдгрена, Швеция), Метод оператора эволюции (группа Воронежского ГУ: С. Запрягаев, Н. Манаков, В. Пальчиков) и Метод контура линии, представленный в настоящей диссертации.

Метод контура линии (МКЛ), развитый в диссертации, основан на исследовании контура спектральной линии, возникающей при резонансном рассеянии фотона на ионе. Контур такой спектральной линии в рамках КЭД впервые был описан Ф. Лоу в 1952 г., а позднее этот метод был обобщен для исследования МЗИ с двумя и более электронами Л.Н. Лабзовским. В МКЛ уровни энергии ассоциируются с положениями резонанса в процессе

рассеяния. В общем случае контур спектральной линии зависит от деталей процесса рассеяния.

В настоящей диссертационной работе развит удобный, относительно простой математический аппарат МКЛ, позволяющий исследовать радиационные и столкновительные характеристики МЗИ в рамках КЭД. Наряду с описанием теоретического подхода в рамках МКЛ, в диссертации представлены результаты численных расчётов КЭД-поправок к уровням энергии МЗИ и вероятностям переходов между уровнями энергии, а также сечений процессов электронной рекомбинации и ионизации МЗИ. Следует отметить, что полученные в диссертации формулы для КЭД поправок, полностью совпадают с результатами указанных выше альтернативных методов.

МКЛ является одним из немногих методов, позволяющих описывать МЗИ в рамках КЭД. Математической аппарат МКЛ сильно отличается от аппарата альтернативных методов, совпадение аналитических результатов МКЛ с результатами других методов является проверкой КЭД теории в сильных полях. Преимуществом МКЛ является то, что МКЛ и используемое в нем резонансное приближение имеют относительно простой физический смысл, что создаёт надёжные предпосылки для дальнейшего развития КЭД теории в сильных полях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы включает 120 наименований и достаточно полно отражает основные научные публикации по данной тематике.

В введении обсуждаются актуальность темы исследования, сформулированы основные цели работы и приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации сформулированы основные идеи МКЛ. Обсуждается резонансное приближение и возможный выход за рамки резонансного приближения. Для каждого процесса рассеяния контур линии является сложной функцией, характеризующей процесс. Для описания уровня энергии двумя основными параметрами (энергией и шириной) вводится резонансное приближение, в котором контур линии интерполируется лоренцевским контуром. Учёт различных поправок в рамках КЭД теории возмущений приводит к сдвигу положения резонанса. Сдвиг положения резонанса определяет поправки к соответствующему уровню энергии.

Во второй главе представлено применение МКЛ для расчёта различных КЭД поправок к уровням энергии многозарядных ионов. На основе процедуры, описанной в работе Ф. Лоу [Phys. Rev. **88**, 53 (1952)], показано как в рамках КЭД получается выражение для вероятности перехода иона из основного состояния в возбуждённое с поглощением фотона. На примере

одноэлектронных ионов введено резонансное приближение и определены понятия энергии и ширин энергетических уровней. Таким образом, продемонстрировано применение МКЛ для одноэлектронных ионов. Далее приводится обобщение МКЛ для ионов с двумя и более электронами. Отдельно рассматриваются случаи невырожденных и квазивырожденных уровней. Результаты численных расчётов уровней энергии двух- и трёхэлектронных МЗИ, полученные автором, подтверждены результатами расчётов другими авторами. Вклад трёхфотонного обмена в уровни энергии He- и Li-подобных МЗИ в рамках брейтовского приближения обнаружен автором впервые. Также надо отметить, что работы с участием автора диссертации [О.Ю. Андреев, Л.Н. Лабзовский, Опт.и Спектр. 89, 181, (2000)], [O.Yu. Andreev et al., Phys. Rev. A 64, 042513 (2001); Phys. Rev. A 67, 012503 (2003); Phys. Rev. A 69, 062505 (2004); Phys. Rev. Lett. 94, 243002 (2005)] на момент выхода работ определяли мировой уровень точности расчёта энергий He- и Li-подобных МЗИ.

В третьей главе диссертации описано применение МКЛ для исследования вероятностей переходов между уровнями энергии МЗИ. Сначала МКЛ формулируется для одноэлектронных ионов, и затем обобщается на случай многоэлектронных ионов. Представлен подробный вывод поправок нулевого и первого порядка КЭД теории возмущений к вероятностям переходов. Для двух- и более электронных ионов показано появление в операторе испускания (поглощения) фотона членов с производной от оператора однофотонного обмена. Учёт этих членов необходим для обеспечения калибровочной инвариантности, которая должна иметь место в каждом порядке теории (невырожденной) возмущений. В конце главы приведены результаты численных расчётов вероятностей переходов. Результаты расчётов находятся в согласии с результатами других авторов. Для переходов из состояния (1s2s) 3S1 в основное состояние согласие с результатами работы П. Инделикато [P. Indelicato et al., Phys. Rev. A 69, 062506 (2004)] составляет 0.01%, с работы В. Джонсона [W.R. Johnson Adv. At. Vjk. Opt. Phys. 35, 255 (1995)] 0.3%, для Z=90. Для переходов из квазивырожденных (1s2p) 3P1 и 1P1 конфигураций в основное состояние совпадение составляет 0.5% и 0.8%, соответственно, для Z=92.

В четвёртой главе рассматриваются процессы электронной рекомбинации с МЗИ. Особое внимание уделяется резонансному каналу рекомбинации – диэлектронной рекомбинации. Присутствие в процессе рекомбинации электрона в сплошном спектре потребовало обобщения МКЛ, который изначально был сформулирован только для связанных электронов. Это обобщение подробно описано в этой главе. В качестве примера в диссертации рассматривается процесс резонансной рекомбинации электрона с одноэлектронными и двухэлектронными ионами урана. В диссертации подробно исследован вклад брейтовского взаимодействия в сечения рекомбинации. Брейтовское взаимодействие даёт большой вклад в сечение и для некоторых резонансов увеличивает сечение в два раза. Для электронной

рекомбинации с Н-подобным ионом урана имеются экспериментальные данные, которые подтверждают значимость брейтовского взаимодействия, что хорошо согласуется с результатами диссертации. Диэлектронная рекомбинация с Не-подобным ураном в рамках КЭД исследовалась впервые. В диссертации также изучается поляризация излучения (параметры Стокса) и вклады высших мультиполей, которые могут достигать 30% для случая диэлектронной рекомбинации с ионами урана в энергетических областях между резонансами. Результаты численного расчёта находятся в согласии с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными. Положения диэлектронных резонансов для рекомбинации Н-подобных ионов урана, представленное в диссертации [Andreev et al., Phys. Rev. A **80**, 042514 (2009)], с высокой точностью совпадают с расчётами Бернхардта [Bernhardt et al., Phys. Rev. A **83**, 020701 (2011)], и составляют порядка 1 эВ.

В пятой главе диссертации рассматривается процесс резонансной ионизации двухэлектронных МЗИ в столкновениях с атомными частицами (голыми ядрами и нейтральными атомами). Как и в случае диэлектронной рекомбинации, рассмотренной в предыдущей главе, резонансный канал ионизации идёт через формирование дважды возбуждённых (автоионизационных) состояний. В работе отмечено, что формирование таких состояний может идти как за счёт межэлектронного взаимодействия (при взаимодействии только одного из электронов с налетающей частицей), так и без межэлектронного взаимодействия (при взаимодействии обоих электронов с налетающей частицей). Соответственно, для описания процесса резонансной ионизации учитывался первый и частично более высокие порядки теории возмущений по межэлектронному взаимодействию и первый и второй порядки теории возмущений по взаимодействию с налетающей частицей. В диссертации приведены результаты численного расчёта сечений резонансной ионизации. Также в работе обсуждается возможность экспериментального исследования этого процесса на ускорителях тяжёлых ионов, в частности в GSI (Дармштадт, Германия).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

По результатам диссертации необходимо сделать следующее замечания.

1. В диссертации исследуются специфичные процессы, где КЭД эффекты могут быть особенно значительны. Следовало бы также исследовать, насколько важным является КЭД описание по сравнению с квантовомеханическим в разных конкретных ситуациях, т. е. установить пределы, при которых КЭД эффекты действительно необходимо учитывать.

2. В диссертации рассматриваются поправки второго порядка КЭД теории возмущений, такие как обмен двумя фотонами и даже в брейтовском приближении рассматривается обмен тремя фотонами. Однако автор не обсуждает другие поправки второго порядка, такие как поправки на экранирование собственной энергии электрона и поляризации вакуума.
3. Рассматривая процессы диэлектронной рекомбинации и резонансного рассеяния в суммировании по промежуточным состояниям в соответствующих фейнмановских графиках выделяются состояния, отвечающие автоионизационным состояниям, которые определяют резонансную структуру. В диссертации не обсуждаются вклады промежуточных состояний, совпадающих с начальным состоянием, включающие одноэлектронные состояния непрерывного спектра.
4. Метод контура линии, разработанный в диссертации, основывается на КЭД теории возмущений. В работе не обсуждаются вклады высших порядков, которые могут быть важными для квазивырожденных уровней и в случае лёгких ионов.
5. В ряде мест диссертации имеются неточности и опечатки. Так, например, они имеют место в конце подписи к таблице 3.1. На Рис. 2.1 надписи (N) не соответствуют рисунку. Ссылки на рис. 2.2 – 2.6 приведены на стр. 25–34, а сами рисунки приведены на стр. 63–65, что затрудняет понимание вопроса.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации. В целом, работа выполнена на высоком научном уровне. В диссертации О.Ю. Андреева решены важные научные задачи. Полученные автором результаты являются новыми и важными, материалы диссертации могут быть использованы для дальнейших теоретических исследований в СПбГУ, ПИЯФ им. Б.П. Константина РАН и других научных центрах. Достоверность результатов основывается на использовании стандартной КЭД теории, аналитические выражения и результаты численных расчётов находятся в хорошем согласии с имеющимися результатами других авторов. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Выводы диссертации в полной мере обоснованы результатами, представленными в опубликованных работах. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Андреев

Олег Юрьевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник Отделения оптики
Физического института имени П.Н. Лебедева РАН
доктор физико-математических наук

Шевелько Вячеслав Петрович

15 мая 2018 г.

Шифр специальности оппонента – 01.04.05 «Оптика»

Адрес: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Ленинский проспект 53, 119991 Москва, РФ

Телефон: +7 499 132 69 26; E-mail: shev@sci.lebedev.ru

Подпись д.ф.-м.н. Шевелько Вячеслава Петровича заверяю:

Ученый секретарь ФИАН
кандидат физ.-мат. наук

А.В. Колобов

