

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Климчицкой Г.Л. 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

Диссертация посвящена развитию теории полностью релятивистских атомных систем, для описания которых нерелятивистские выражения нельзя использовать даже в нулевом приближении. Такими системами являются многозарядные ионы с несколькими электронами, интенсивно изучаемые в последние десятилетия как теоретически, так и экспериментально. Работы О.Ю. Андреева внесли значительный теоретический вклад в это изучение.

Квантовая электродинамика атомных систем строится как теория, содержащая три параметра: постоянную тонкой структуры, так называемый релятивистский параметр, равный произведению постоянной тонкой структуры на заряд ядра Z , и величину, обратную заряду ядра $1/Z$. Этот последний параметр характеризует взаимодействие электронов в атоме, которое при больших значениях Z мало по сравнению с взаимодействием электрона с ядром. В нерелятивистской теории, при малых значениях релятивистского параметра, можно учесть все поправки по $1/Z$ – они содержатся в многоэлектронном уравнении Шрёдингера, а релятивистские поправки можно учитывать по теории возмущений. В полностью релятивистских системах, таких, как многозарядные ионы, наоборот, необходимо учитывать все поправки по релятивистскому параметру, а взаимодействие электронов описывать по теории возмущений.

Квантовоэлектродинамические поправки, характеризующиеся степенями постоянной тонкой структуры, нужно в любом случае вычислять с помощью теории возмущений. Квантовоэлектродинамическая (КЭД) теория атомных систем, в которой нет многочастичного уравнения, подобного уравнению Шрёдингера, как известно, формулируется подобно теории свободных электронов, т. е. теории процессов взаимодействия электронов с фотонами, с той лишь разницей, что электроны с самого начала рассматриваются движущимися в поле ядра (картина Фарри). В связи с такой формулировкой вычисление высших поправок к энергии по взаимодействию электронов не является столь простым, как в нерелятивистской квантовой механике. Для этого разработаны несколько специальных подходов, каждый из которых обладает определенными преимуществами и недостатками.

Один из подходов основан на использовании так называемой адиабатической S -матрицы, содержащей в том или ином виде функцию адиабатического включения (выключения) межэлектронного взаимодействия. Это метод наталкивается на некоторые трудности (в принципе, преодолимые) при вычислении поправок, содержащих исходные состояния в качестве промежуточных. Этого недостатка лишён другой общий КЭД метод описания атомных систем, основанный на использовании квантовополевой функции Грина. Третьим независимым общим методом КЭД теории атомных систем является метод контура линии, развиваемый автором рассматриваемой диссертации. В этом методе поправки к энергии (как поправки на взаимодействие электронов, так и квантовоэлектродинамические поправки) вычисляются как сдвиги частоты в резонансных процессах возбуждения атомных уровней. Оказывается, что эти сдвиги в очень хорошем приближении не зависят от типа резонанса (рассеяние фотонов, электронов и пр.). Влияние так называемых нерезонансных поправок, чувствительных к типу резонанса, до последних лет было неощутимо в атомной спектроскопии. С учётом этих поправок частота перехода между атомными уровнями становится неоднозначно определённой, ненаблюдаемой величиной, а

наблюдаемой величиной является лишь форма резонанса, контур спектральной линии. Отсюда и название метода, который как нельзя лучше подходит для описания формы спектральных линий в рамках квантовой электродинамики. Однако метод контура линии, как показано в диссертации О.Ю. Андреева, обладает значительно более широкой областью применимости. Он позволяет также рассчитывать поправки к энергии уровней атомов, вероятности переходов между уровнями и другие атомные характеристики, будучи в вычислительном отношении примерно эквивалентным методу функции Грина. Метод контура линии наиболее естественно использовать для расчёта процессов взаимодействия многозарядных ионов с фотонами, электронами, протонами и различными атомными частицами, поскольку такие процессы уже давно и детально изучены в рамках квантовой электродинамики для свободных электронов. Именно к этой области относятся наиболее оригинальные приложения метода контура линии в работах О.Ю. Андреева, составляющих основу рассматриваемой диссертации.

В первой главе диссертации излагаются основы метода контура линии. Во второй главе описывается применение этого метода к расчётом уровням энергии многозарядных ионов. В частности, описано, как использовать метод контура линии для расчета энергии квазивырожденных (т. е. близколежащих друг к другу) уровней. Это, как известно, представляет проблему для применения теории возмущений в рамках любого метода. Преимущества развивающегося в диссертации метода продемонстрированы конкретными расчётами

В третьей главе диссертации метод контура линии применяется для расчёта вероятностей переходов. Все выводы проделаны в компактной матричной форме, что позволяет лучше улавливать смысл, скрывающийся за матричными обозначениями громоздких выражений.

Важные новые результаты представлены в четвёртой главе, где рассмотрены процессы радиационной и диэлектронной рекомбинации

электронов с многозарядными ионами. Особенno интересен последний процесс, когда налетающий электрон образует с электронами многозарядного иона возбуждённое (автоионизационное) состояние, которое затем распадается с испусканием фотона. Благодаря быстрому развитию экспериментальной техники, такой, как накопительные кольца и ионные ловушки, процессы рекомбинации стали доступны непосредственному наблюдению и широко исследуются экспериментально. Из сравнения данных, полученных в таких экспериментах, с теорией можно извлечь информацию фундаментального характера, например, о роли брейтовского взаимодействия по сравнению с кулоновским в условиях сильного релятивизма. Это делает расчёты, выполненные О.Ю. Андреевым, весьма востребованными и актуальными.

В пятой, последней, главе диссертации с помощью метода контура линии рассматриваются и рассчитываются процессы ионизации, обратные к процессам рекомбинации (захвата электронов в многозарядных ионах). В частности, рассмотрены процессы обратные к диэлектронной рекомбинации – ионизация с образованием возбуждённых автоионизационных состояний, которые затем распадаются с вылетом электрона в сплошной спектр. Эти процессы столь же интенсивно исследуются экспериментально и представляют столь же большой интерес, как и описанные в четвёртой главе процессы рекомбинации.

Подводя итоги, можно сказать что в работах О.Ю. Андреева новый, оригинальный КЭД подход – метод контура линии – применён для описания широкого круга явлений, связанных с многозарядными ионами. Особый интерес представляет материал четвёртой и пятой глав диссертации, где полномасштабный квантовоэлектродинамический подход впервые применён к описанию весьма широкого круга явлений – взаимодействию многозарядных ионов с электронами и фотонами. Выявлен ряд явлений, представляющих фундаментальный характер, в первую очередь резкое

усиление роли брейтовского взаимодействия в процессах столкновения многозарядных ионов с электронами.

Диссертация представляет собой значительный шаг вперёд в развитии квантовоэлектродинамической теории атомных систем и обозначает новое направление в рамках этой теории – широкое исследование процессов взаимодействия многозарядных ионов с электронами, фотонами и другими частицами.

Основные результаты диссертации представлены в многочисленных работах автора, опубликованных в высокорейтинговых научных журналах, и доложены на нескольких международных конференциях по тематике работы, так что в их достоверности можно не сомневаться. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Необходимо отметить, однако, что диссертация не свободна от некоторых недостатков. Процессы взаимодействия электронов и фотонов с многозарядными ионами изучались теоретически и ранее с применением нерелятивистских методов либо с использованием уравнения Дирака, но с учётом только кулоновского взаимодействия. Существует мнение, что электроны в сплошном спектре менее чувствительны к релятивистским эффектам, чем электроны в дискретных состояниях. В общем это, видимо, так и есть, но работы О.Ю. Андреева показывают, что существуют и важные исключения – всё тот же пример с брейтовским взаимодействием. В диссертации фактически отсутствует подробное сравнение квантовоэлектродинамических и нерелятивистских методов, которое было бы ценным для понимания улучшений, вносимых теорией, базирующейся на квантовой электродинамике.

Указанный недостаток не является принципиальным и не снижает высокого уровня диссертации О.Ю. Андреева. Эта диссертация представляет собой законченный труд, выполненный на высоком научном уровне и открывающий новое направление в квантовоэлектродинамической теории атомных систем.

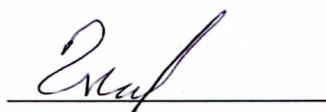
Диссертация О.Ю. Андреева удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика», а её автор Олег Юрьевич Андреев несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник

ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика»

16.05.2018



Климчицкая Галина Леонидовна

Почтовый адрес: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе д. 65

Телефон: (812)363-7207

E-mail: g.klimchitskaya@gmail.com

Подпись Климчицкой Г.Л. заверена.
Ученый секретарь ГАРАНТ 

