

ОТЗЫВ члена диссертационного совета Тупицына Ильи Игоревича на диссертацию Соловьева Дмитрия Анатольевича на тему «Теоретические аспекты процессов фотонного рассеяния в приложениях к прецизионным спектроскопическим экспериментам и астрофизике», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа Соловьева Дмитрия Анатольевича посвящена созданию теории, описывающей процессы излучения, поглощения и рассеяния фотонов на простых атомных системах, таких как водородоподобные ионы, мюонный водород, антиводород и атом гелия, путем обобщения *метода контура линии* для учета нерезонансных поправок к частоте и профилю спектральной линии.

Сравнение теоретических данных с результатами прецизионных спектроскопических измерений частот и вероятностей переходов в простых атомных системах дает возможность аккуратного определения фундаментальных физических констант, изучения процессов возможного нарушения глобальной СРТ-симметрии, интерпретации результатов астрофизических исследований и т. д. Зачастую рассчитанные автором нерезонансные поправки оказываются гораздо меньшими, чем погрешности экспериментальных данных. Однако, полученные в работе теоретические результаты могут быть востребованными в будущем, по мере повышения экспериментальной точности. В связи с этим, я считаю, что тема диссертационной работы Соловьева Д. А. является **важной и актуальной**.

Диссертация Соловьева Д. А. состоит из введения, 10 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, 28 рисунков, 26 таблиц, библиографии из 280 наименований и списка публикаций автора, выносимых на защиту, состоящего из 39 наименований. Объем диссертации составляет 307 страниц.

В **первой главе диссертации**, которая представляет собой литературный обзор, рассмотрены существующие подходы к формулировке КЭД теории профиля линии, в том числе теоретические методы исследования за рамками резонансного приближения зависимость нерезонансных поправок от условий эксперимента, а также асимметрия профиля линии, многофотонные процессы рассеяния и др.

**Во второй, третьей и четвертой главах** представлены теоретические КЭД выводы нерезонансных поправок к профилю спектральной линии, к полному сечению процесса однофотонного рассеяния для Лайман-альфа ( $2p - 1s$ ) перехода и к частоте двухфотонного  $1s-2s$  перехода во внешнем электрическом поле.

**Пятая глава** диссертации посвящена изучению нерезонансных поправок, возникающих за счет эффекта квантовой интерференции переходов в близлежащие (с резонансным) состояния. В качестве примера вычислены поправки к переходам между компонентами тонкой структуры  $2s - 4p_{1/2}$  перехода в атоме водорода. Обсуждается также проблема определения частоты перехода, связанная с асимметрией профиля линии. Отмечается, что доступны два способа определения частоты перехода: в первом подходе используется положение максимума профиля линии, с последующей оценкой нерезонансных поправок;

во втором - процедура "симметризации" профиля линии. В связи с этим возникает вопрос, почему не используется стандартный подход, согласно которому частота перехода определяется как «центр тяжести» линии, подобно тому, как определяется мат. ожидание плотности функции распределения случайной величины? Кроме того, в пятой главе рассмотрены также нерезонансные поправки к частоте переходов в мюонном водороде и в атоме гелия.

**В шестой главе** диссертации рассмотрены нерезонансные поправки в двухфотонных процессах рассеяния в атомах водорода и гелия. В частности, отмечается, что рассчитанные в работе поправки к двухфотонным переходам в атоме He оказались на том же или превышающем уровень экспериментальной погрешности в определении частот  $2s$ - $nd$  переходов. Представленные данные свидетельствуют о необходимости учета нерезонансных поправок. Однако их учет не устраняет наблюдаемое расхождение между экспериментальными и теоретическими данными, которое требует последующего внимательного изучения.

**Седьмая глава** посвящена оценке нерезонансных поправок к частоте Лайман-альфа ( $2p-1s$ ) в антиводороде во внешнем электрическом поле и сравнению с аналогичными данными для атома водорода. Это сравнение может представлять интерес для изучения  $T$ -инвариантности в нестабильных системах, хотя порядок величины этого эффекта показывает, что он вряд ли будет наблюдаться в ближайшее время. Кроме того, в этой главе вычислены нерезонансные поправки к частоте  $1s-2s$  двухфотонного перехода в водороде и антиводороде во внешнем электрическом поле и проведено сравнение полученных данных. Получен важный результат о том, что линейные по полю эффекты асимметрии спектральных линий приводят к противоположным искажениям профиля линии. Это свидетельствует о важности данных результатов для исследования, в частности, СРТ-симметрии при условии повышения точности экспериментальных данных. В этой же главе рассмотрены эффекты, которые позволяют различать атомы водорода и антиводорода в магнитном поле.

**В восьмой главе** рассмотрены вероятности одно- и двухфотонных переходов в атоме водорода в различных калибровках. Получены выражения для вероятностей двухфотонного распада с наличием каскадов. Рассмотрен вопрос о неразделимости каскадного и «чистого» двухфотонного излучения в атоме водорода. Установлена связь ширины двухфотонного распада и мнимой части двухпетлевой радиационной поправки.

**В девятой главе** диссертации представлены результаты расчетов вероятностей распадов  $2s$  и  $2p$  состояний, а также высоковозбужденных состояний в атоме водорода во внешнем электрическом поле. Показано, что линейный по полю вклад, возникающий в дифференциальной вероятности перехода, приводит к существенному различию спектров водорода и антиводорода. Установлено существенное сокращение времени жизни ридберговских состояний в слабом электрическом поле. Отмечается также, что даже очень слабые электрические поля могут привести к существенным изменениям спектров излучения атомов водорода и антиводорода в ридберговских состояниях.

**В последней десятой главе** диссертации исследован вопрос искажения профиля линии в многофотонных процессах, важный в астрофизических приложениях. В этой главе, в

частности, рассмотрен многофотонный процесс *электромагнитной индуцированной прозрачности*, который приводит к существенной модификации профиля линии поглощения в атоме водорода.

**Существенных замечаний**, которые бы могли поставить под сомнение основные выводы данной работы, у меня не имеется. Однако, после чтения текста диссертации у меня возникло несколько вопросов и ряд мелких замечаний.

### Вопросы

- 1) Почему во второй главе при рассмотрении нерезонансного расширения контура Лоренца (Брейта-Вигнера) Лайман-альфа линии не учитывается тонкое расщепление, которое может исказить профиль линии. Каков порядок нерезонансных вкладов по сравнению с величиной спин-орбиты в атоме водорода?
- 2) Одним из основных положений, выносимых на защиту, является нерезонансное искажение контура Лоренца. Согласно теореме Фока-Крылова, лоренцево распределение по энергии связано с экспоненциальным распадом квазистационарного состояния. Можно ли оценить, как мог бы модифицироваться закон распада с учетом нерезонансных поправок?
- 3) Почему при вычислении зависимости ширины от частоты (формула 2.37)  $\sin(\omega r)$  можно разложить в ряд Тейлора во всей области изменения  $r$ . Интервал частот, как я понял, ограничен величиной  $Z$  в атомных единицах и это совсем немалая величина.
- 4) Почему можно отбросить интерференционные слагаемые в выражении (3.1)
- 5) В четвертой главе обсуждаются нерезонансные поправки к частоте двухфотонного  $1s-2s$  перехода (экспериментальная погрешность -  $10 \text{ Гц} = 4.1 \cdot 10^{-14} \text{ eV}$ ). Хотелось бы здесь увидеть, чему равны наиболее точные на данный момент экспериментальное и теоретическое значения частоты  $1s-2s$  перехода.

### Мелкие замечания

Диссертационная работа представляет большой объем материала, который содержит опечатки и неточности, например,

- 1) В русском тексте диссертации ссылки на книги, изданные в России, должны быть на русском языке. Тем более это касается литературы неизданной за рубежом, например, см. ссылку [91].
- 2) В формуле (2.29) амплитуда перехода должна быть в квадрате.
- 3) В формуле (2.31) пропущен дифференциал  $d\omega$ .
- 4) Разложение функции Грина (3.15) это, строго говоря, является разложением не по полиномам Лагерра, а по кулоновским функциям Штурма. Кстати фамилия Лагерра пишется с двумя "р", а не с двумя буквами "г".
- 5) В формуле (2.39) пропущен знак равенства.
- 6) На стр. 139, в 7-ой главе написано, что  $2p'(3/2)$  тождественно равно  $2p(3/2)$ . Что это значит? Возможно, что считается, что равны энергии и волновые функции этих состояний?

7) В формуле (7.3) не определена нерезонансная поправка  $x_{NR}$ . Она является поправкой к энергии, ширине или сечению? Возможно, это поправка к частоте. В ф-ле (7,1)  $x$  это сдвиг частоты.

8) Формула (7.5). Что означает  $W_{2p}=W_{2s}$  при  $E=0$ ?

и т.д.

**Остановливаясь на диссертационной работе в целом**, я бы отметил, что несмотря на наличие опечаток и неточностей, работа написана понятным языком, достаточно полно проиллюстрирована, материал работы изложен ясно и последовательно. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и содержит целый ряд новых интересных результатов, достоверность и научная новизна которых не вызывает сомнений. Полученные Соловьевым Д.А. научные результаты достаточно полно отражены в публикациях в высокорейтинговых международных журналах и неоднократно докладывались на научных конференциях и семинарах. Сделанные выше мелкие замечания не влияют на высокую оценку, которую заслуживает данная диссертационная работа.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием надежных теоретических методов, в том числе обобщенным методом контура линии, а также точным совпадением с теми результатами, которые представлены в научной литературе, и которые получили экспериментальное подтверждение.

**Научная новизна**, диссертационной работы Соловьева Д.А. обусловлена получением очень большого количества новых результатов важных для спектроскопии простых атомных систем и, в том числе, для астрофизики.

**Заключение.** Диссертация Соловьева Дмитрия Анатольевича на тему: «Теоретические аспекты процессов фотонного рассеяния в приложениях к прецизионным спектроскопическим экспериментам и астрофизике» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Соловьев Дмитрий Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.мат. наук, ст.н.сотр.,  
профессор кафедры квантовой механики  
физического факультета СПбГУ

/И.И. Тупицын/

Дата: 03.10.2024