

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Киселева Алексея Дониславовича 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 научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа Соловьева Д.А. представляет результаты теоретических исследований автора в области атомной спектроскопии простейших атомных систем, таких как водородоподобные системы и атом гелия. Основная часть этих исследований посвящена изучению нерезонансных (НР) эффектов, возникающих за рамками резонансного приближения. Количественное и качественное понимание таких эффектов, наряду с квантовоэлектродинамическими (КЭД) поправками, играет фундаментально важную роль, в значительной степени, обусловленную рекордно высоким уровнем точности измерений, достигнутым в современной прецизионной экспериментальной спектроскопии атомов.

Важность и актуальность тематики диссертации убедительно иллюстрирует материал первой главы, содержащей детальный обзор литературы, и, на мой взгляд, не вызывает никаких сомнений.

Стартовой точкой второй главы является амплитуда однофотонного рассеяния на одноэлектронном атоме, аналитическое выражение для которой получено стандартными методами КЭД в картине Фарри. Обсуждается регуляризация резонансного слагаемого в однопетлевом приближении для собственной электрона и вычисляется ширина возбужденного резонансного состояния. В нерелятивистском пределе, рассматривается искажение профиля Лоренца за счет частотной зависимости амплитуды перехода и собственной энергии электрона. Полученные результаты для расширенного профиля обсуждаются в контексте анализа переноса излучения в Ly_α линии (α линия Лаймана, $2p_{1/2} - 1s_{1/2}$ переход) в расширяющейся Вселенной, где полученный профиль используется в качестве профиля с большим красным смещением и сравнивается с другими известными профилями.

В третьей главе вычисляются НР поправки для частоты максимума полного сечения однофотонного рассеяния на атоме водорода с резонансным $2p - 1s$ переходом. При этом учитывались как частотная зависимость времени жизни возбужденного состояния, так и эффекты, связанные с наличием тонкой и сверхтонкой структуры. Оценки показали, что НР поправки для этого перехода находятся за пределами точности измерений.

Предметом изучения в четвертой главе являются НР поправки к частоте двухфотонного $1s - 2s$ перехода атома водорода. Рассматривается процесс двухфотонного поглощения (переход в метастабильное $2s$ состояние) с последующим спонтанным распадом. Для описания результатов эксперимента, где возбужденные атомы помещаются в электрическое поле, смешивающее $2s$ и $2p$ состояния, и, в результате, излучается фотон, соответствующий Ly_α переходу. После обсуждения качественных оценок НР поправок, которые оказались на три порядка меньше экспериментальной погрешности, развивается более последовательный теоретический подход в рамках КЭД с различными гамильтонианами \hat{H}_{in} и \hat{H}_{out} , соответствующим случаям отсутствия и наличия внешнего электрического поля. Вычисленные НР поправки, в согласии с качественными оценками, оказались за пределами экспериментальной погрешности.

В пятой главе рассматривается ситуация, когда в сечении рассеяния, помимо основного резонанса, имеется разрешенный, близкий к резонансному, переход. Как следствие, даже если пренебречь остальными НР слагаемыми, из-за наличия интерференционного слагаемого, возникает асимметрия контура контура и сдвиг частоты. Вычисления выполнены для, изученных экспериментально, $2s_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4p_{1/2}^{F=1}$ и $2s_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4p_{3/2}^{F=1}$ переходов атома водорода. Обсуждается зависимость поправок, величины которых оказались существенно больше погрешности измерений, от условий (фиксируется или нет канал распада $4p$ состояния) и геометрии эксперимента (может контролироваться угол между направлением излученного фотона и вектором поляризации (направлением) поглощенного фотона). Показано, что, в случае, когда частота излученного фотона не измеряется, поправки обнаруживают угловую зависимость и для корректного определения частоты перехода поглощения необходимо детальное описание каналов распада, такие как каскадные переходы. Приведены оценки для каскадов $2s + \gamma \rightarrow 4p \rightarrow 3s(3d) + \gamma \rightarrow 2p + \gamma \rightarrow 1s + \gamma$. Интерференционные эффекты из-за наличия квазирезонансных состояния также рассматриваются применительно к мюонному водороду и изотопу гелия.

В шестой главе рассматривается резонансное двухфотонное рассеяние, которое описывается как двухфотонный процесс возбуждения с последующим излучением фотона. Приведены результаты для атомов водорода и гелия. НР поправки оказались в пределах погрешности измерений. Обсуждается метод моментов как метод оценки частоты перехода из экспериментальных данных.

Седьмая глава посвящена сравнительной спектроскопии водорода (H) и антиводорода (\bar{H}) во внешних (электрических и магнитных) полях. Оцениваются линейные по электрическому полю НР поправки к частоте Ly_α линии, которые для H и \bar{H} имеют разный знак, но оказываются меньше экспериментальной погрешности. Рассматриваются возможности различать H и \bar{H} по эффектам, зависящим от магнитного поля, таким как эффект Фарадея.

Восьмая глава начинается с обсуждения общей теории одно- и двухфотонных мультипольных переходов. В нерелятивистском приближении, приведены аналитические результаты для вероятностей переходов. Обсуждаются результаты для вероятности двухфотонных $E1E1$, $E1E2$ и $E1M1$ переходов для $2p$ состояния водорода. Показана невозможность однозначного разделения на чистое и каскадное излучение. Рассмотрены примеры двухфотонного распада в присутствии каскадов (распад $3s$ и $4s$ состояний водорода). Ширина распада изучается как в рамках адиабатического формализма S -матрицы, так с точки зрения оптической теоремы. Ширина двухфотонного распада вычисляется из двухпетлевой радиационной поправки.

Влияние внешнего электрического поля на распад возбужденных состояний водорода и антиводорода изучается в девятой главе. Показано, что даже слабые поля могут привести к существенным изменениям спектров излучения атомов водорода и антиводорода в ридберговских состояниях.

В десятой главе рассматриваются различные трехуровневые атомные системы в бихроматическом поле в качестве моделей, описывающих модификацию профиля поглощения атома водорода внешним полем. При этом используются стационарные решения марковских кинетических уравнений для матрицы плотности, записанные в приближении вращающейся волны. Обсуждается как эти эффекты проявляются в астрофизических исследованиях микроволнового космического излучения.

В целом, полученные в диссертации, результаты, бесспорно, можно охарактеризовать как существенный и весомый вклад в теорию современной прецизионной спектроскопии атомов,

подкрепленный, впечатляющими по числу, объему и уровню, публикациями в журналах международного класса. Их достоверность и обоснованность, помимо публикации статей и апробации результатов на многочисленных конференциях и семинарах, обеспечивается использованием хорошо известных аналитических подходов и методов квантовой электродинамики атомных систем.

Несмотря на общую положительную оценку содержания работы, она не лишена недостатков и мои замечания перечислены ниже.

1. Список замечаний, связанных с формулами и обозначениями:

- Знаменатель во втором слагаемом формулы (2.6) соответствует формуле (49) обзора [84], т.к. $E_n(1 - i0) - E_i + \omega_2 = E_n(1 - i0) - E_f + \omega_1$, и согласуется с (3.1) и (5.11), но не согласуется с формулами (2.19), (5.1), (5.3), где соответствующий знаменатель равен $E_n - E_i - \omega_2$;
 - Суммирование по m_γ в правой части (2.15) не может дать сферическую гармонику, зависящую от m_γ ;
 - Представляется, что, при нерезонансном продолжении (раздел 2.3), $\langle b | \hat{\Sigma}(E_b) | b \rangle$ нужно заменить на $\langle b | \hat{\Sigma}(E_a + \omega) | b \rangle$ (как указано в левой части уравнения (2.33)). Однако в правой части (2.33) и в (2.35) (и, скорее всего, в (2.36)) вместо $E_a + \omega$ написано $E_b + \omega$. Почему?
 - Из соотношения (2.46) следует, что $\phi_R = \phi_L 4(\omega/\omega_0)^4 / (1 + \omega/\omega_0)^2$. Последнее противоречит формуле (2.44);
 - В формуле (4.3), $\Gamma_{2p,1\gamma}$ в знаменателе второго слагаемого, скорее всего, нужно возвести в квадрат;
 - Размерность поправки (4.4) не соответствует частоте;
 - В формуле (8.16) $\mathbf{k} \times \mathbf{s}$ нужно скалярно домножить на \mathbf{e} ;
 - Зачем потребовалось вводить новые обозначения для векторных сферических гармоник (2.12)-(2.14) в разделе 8.1 (формулы (8.1)-(8.4))?
2. На рис. 2.2 сравниваются различные профили для α -линии Лаймана, но содержательное обсуждение результатов сравнения сводится к единственному замечанию, что, полученный как нерезонансное продолжение профиля Лоренца, профиль ϕ_E согласуется с работой [161].
3. Как именно разложение для функции Грина (3.15) с коэффициентами (3.17) использовалось для оценки нерезонансных вкладов?
4. В тексте диссертации много грамматических погрешностей, которые обнаружил бы стандартный спелчекер. В качестве примера, приведу неполный список: «рассматрен» (стр 14), «слудующие» (стр 36), «однопетелевых» (стр 40), «даиагональный» (стр 40), «полноого» (стр 40), «инфитизимальный» (стр 44), «врменем» (стр 64), «вышеуказанными» (стр 75), «множитиле» (стр 88), «соответсвующий» (стр 117), «двухпетелевой» (стр 189), «выскокой» (стр 193).

Указанные замечания не снижают ценность работы. 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 физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Лаборатории квантовых процессов и измерений
Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский университет
ИТМО»



Киселев Алексей Дониславович

3 октября 2024 г.

Подпись Киселева А.Д.
заверено
менеджером ОПС
Шуваевым А.С.

