

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Мирошниченко Георгия Петровича 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

Диссертация Соловьева Дмитрия Анатольевича на тему «Теоретические аспекты процессов фотонного рассеяния в приложениях к прецизионным спектроскопическим экспериментам и астрофизике» хорошо структурирована, состоит из 10-и глав. Автореферат кратко отражает содержание диссертации. Цель работы – теоретическое описание и расчеты тонких эффектов, которые можно наблюдать методами прецизионной спектроскопии. Эти эксперименты позволяют уточнять значения универсальных констант, таких, как постоянная тонкой структуры, постоянная Ридберга и другие. Здесь необходима теория спектрального контура линии, параметризованная этими константами. Следует отметить, что точность современных спектроскопических экспериментов по измерениям частот переходов в водороде достигают относительной погрешности 10^{-15} и в атомных часах до 10^{-17} . Частота перехода $1s-2s$ известна с результирующей абсолютной погрешностью около 10 Гц. Как правило, обработка спектроскопических измерений основана на использовании резонансного профиля спектральной линии. Было предсказано теоретически и экспериментально обнаружено большое влияние на форму линии эффектов, возникающих за пределами резонансного приближения. Особое место в диссертации уделено асимметрии спектрального профиля линии рассеяния фотонов на простых атомах. В диссертации особо отмечено, что профиль спектральной линии не может быть описан двумя параметрами – резонансной частотой и шириной линии - только сам профиль линии остается наблюдаемой величиной, которую следует сравнивать с соответствующими теоретическими расчетами. В диссертации выявлен ряд эффектов вызывающих эту асимметрию. Работа выполнена в группе Леонтия Нахимовича Лабзовского, где данная тематика является одной из приоритетных. Описание процессов

одно - и многофотонного рассеяния проводится в рамках квантово-электродинамической теории связанных состояний и формализма релятивистской адиабатической S -матрицы. Приведенные результаты расчетов некоторых эффектов достигают долей герц. В главе 2 и 8 внимание уделяется как резонансному приближению линии рассеяния, так и нерезонансным поправкам к контуру линии. Для их расчета диаграммы Фейнмана амплитуд процессов рассеяния вычисляются в картине Фарри для связанного электрона с учетом однопетлевых поправок на собственную энергию. Нерезонансные поправки возникают, когда частотная зависимость в выражении для амплитуды учитывается как для вероятности перехода, так и для естественной ширины. Важность красного крыла линии рассеяния, куда дают вклад нерезонансные поправки, имеет особое значение для простых атомов, которые участвуют, согласно модели горячей Вселенной, в процессе космологической рекомбинации атомов водорода в ранней Вселенной, а также в проблеме формирования реликтового излучения. В этом смысле расчеты, проведенные в диссертации для красного крыла линии Лаймана атома водорода, имеют особое значение. Особенно показателен в этом смысле Рис.2.2, демонстрирующий, что красное крыло линии лежит значительно выше чем в предложенных ранее моделях. В главе 3 развита теория нерезонансных поправок в полное сечение рассеяния фотонов на линиях Лаймана с учетом сверхтонкой структуры подуровней. Для расчета использован весьма эффективный метод редуцированной кулоновской функции Грина. В 4, 6, 8 и 9 главах развита теория двухфотонных процессов в рассеянии фотонов на $1s-2s$ переходе в атоме водорода, а также двухфотонной спектроскопии гелия. Здесь предложен In Out квантовоэлектродинамический формализм расчета времяпролетных экспериментов по изучению двухфотонных процессов в присутствии внешнего электрического поля. Важность изучения двухфотонных процессов в атоме водорода было отмечено Я.Б. Зельдовичем еще в 70-х годах прошлого века в связи с построением теории космологической рекомбинации водорода в горячей модели Вселенной. Как было им отмечено, в эпоху красных смещений порядка 1500 единиц любая прямая рекомбинация электронов в основное состояние водорода немедленно сопровождается ионизацией соседнего нейтрального атома из-за повторного поглощения испущенного фотона Лайман-континуума. Из-за огромной разницы в скорости дипольного перехода $2p - 1s$ и скорости расширения Хаббла, фотоны, испускаемые вблизи центра линии Лайман- α , рассеиваются 10^9 раз, прежде чем они смогут избежать дальнейшего взаимодействия со средой и обеспечить успешное заселение электронов в основное состояние водорода. Благодаря этим обстоятельствам двухфотонный

процесс распада $2s - 1s$, который на 10^8 порядков медленнее, чем резонансный переход Лаймана- α , способен существенно контролировать динамику космологической рекомбинации водорода. Среди нерезонансных поправок к контуру линии особо отмечен вклад эффекта квантовой интерференции, описанный в 5 главе. Этот вклад в контур возникает из-за состояний, близко расположенных с резонансным уровнем. Эффекты квантовой интерференции зависят от процессов возбуждения и девозбуждения атомного уровня, типа эксперимента и способа извлечения значения частоты перехода из экспериментальных данных. Как отмечено в диссертации, неопределенность измерений спектров тонкой и сверхтонкой структуры на переходах Лаймана на много меньше, чем наблюдаемые эффекты квантовой интерференции. Для достижения точности на уровне нескольких кГц учет этих эффектов необходим. В этой главе представлены выражения для сечения резонансного однофотонного рассеяния на атоме водорода с учетом тонкой и сверхтонкой структуры атомных уровней. Выведенные выражения для амплитуд содержат зависимости от направлений и поляризаций падающих (поглощенных) и вылетающих (испускаемых) фотонов. В главе 7 обсуждаются интересные приложения прецизионной спектроскопии по получению информации о возможном нарушении СРТ и Лоренц-инвариантности. СРТ теорема устанавливает идентичность спектров вещества и антивещества. Как отмечено в этой главе, в связи с достижениями по получению атомов антиводорода, появляется возможность детального сопоставления указанных спектров. В этой связи интересны результаты расчетов амплитуд рассеяния фотонов на частоте Лаймана на атомах водорода и антиводорода в присутствии постоянного слабого электрического поля. Расчеты показали сдвиг максимумов профилей линий Лаймана в водороде и антиводороде на величину $2 \cdot 10^{-4}$ герц, что, как отмечено в диссертации, вряд ли наблюдаемо в настоящее время из-за малой точности эксперимента в антиводороде (точность порядка нескольких мегагерц). Но эффект Зеемана показывает, что схема расщепления одинакова для атомов водорода и антиводорода, но верхняя и нижняя зеемановские компоненты соответствуют разным значениям проекций углового момента электронов. Это наиболее простое спектроскопическое различие между атомами водорода и антиводорода во внешних полях. Представляется реалистичным наблюдение эффекта Зеемана на сверхтонкой структуре основного состояния атомов водорода и антиводорода на частоте 21 сантиметра. Соответствующие оценки выполнены по синему и красному крыльям линии. Как отмечено, круговая поляризация в этих крыльях противоположна для водорода и антиводорода. В главе 10 с использованием метода квантовомеханической матрицы плотности исследованы

трехуровневые схемы в разных конфигурациях, управляемые двумя околорезонансными полями в стационарном приближении. Выбранные связанные состояния Лаймана и Бальмера моделируют атом водорода. Цель исследования - получение коэффициента поглощения среды, модифицированного эффектом ЭМИП, для оценки возможного вклада этого эффекта в уравнения переноса излучения, описывающие космологическую рекомбинацию вещества в ранней Вселенной. Как показано в работе, искажение профиля линии возможно до одного процента, что, по мысли автора, может дать наблюдаемый вклад в спектральную анизотропию реликтового излучения.

По моему мнению работа в целом заслуживает очень высокой оценки, тем не менее сделаем несколько замечаний.

1. В работе Сара Сигер, Димитар Д. Сасселов, Дуглас Скотт (Sara Seager, Dimitar D. Sasselov, Douglas Scott) 2000 отмечено, что в уравнении переноса излучения, которое описывает космологическую рекомбинацию водорода в ранней Вселенной, атом водорода можно моделировать трехуровневой схемой при условии, что верхний уровень должен принадлежать сплошному спектру. Вопрос автору диссертации: как изменится эффект ЭМИП, если учесть разлетное состояние в атоме водорода?
2. Проверка столь громоздких формул диссертации осложнена, и тем не менее некоторые формулы ошибочны по размерности. В частности, формула (5.6).
3. В диссертации имеются опечатки и стилистические ошибки. Это затрудняет чтение. В качестве примера приведем выражение на стр. 8, которое мне до сих пор не понятно: “В качестве примера успеха КЭД теории можно привести работыпозволивших уточнить массу электрона в 13 раз.”

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», представленную диссертацию следует рассматривать, как научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность

которых можно квалифицировать как высокое научное достижение в спектроскопии сверхвысокого разрешения, достоверность результатов, их новизна и актуальность не вызывают сомнений, и, как следствие, 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

Мирошниченко Георгий Петрович

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор института «Высшая инженерно-техническая школа»
Университет ИТМО

3.10.2024

Мирошниченко Г.П.

Подпись Мирошниченко Г.П.
Удостоверено
Лавочкин О.А.
Величанин В.А.

