

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Тельнова Дмитрия Александровича 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 Д. А. Соловьева посвящена теоретическому исследованию процессов рассеяния, излучения и поглощения фотонов атомами водорода и гелия, а также лёгкими водородоподобными ионами и мюонным водородом. Эти процессы описываются в рамках квантовоэлектродинамической (КЭД) теории и формализма S-матрицы. Точность расчётов, выполненных в диссертации на основе разработанных теоретических методов, позволяет проводить сравнение с наиболее прецизионными на сегодняшний день измерениями частот переходов, что имеет непосредственное отношение к проверке Стандартной модели физики элементарных частиц и уточнению значений фундаментальных физических постоянных. Таким образом, тема диссертации вне всякого сомнения **актуальна**, что подчёркивается, в том числе, рассмотрением приложений к астрофизическим задачам.

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографии и списка из 39 публикаций автора по теме диссертации. Во **введении** формулируются цели и задачи работы, кратко излагаются методы исследования, отмечается, в чем состоит научная новизна и практическая значимость исследования, а также даётся обоснование достоверности полученных результатов. **Первая глава** диссертации является обзорной; в ней содержится общее описание проблемы и методов её решения. В частности, подчёркивается важная роль асимметрии профиля спектральной линии в прецизионных спектроскопических экспериментах. Во **второй главе** обсуждается асимметрия контура спектральной линии за счёт включения нерезонансных поправок в рамках КЭД-теории. Показано, что красное крыло профиля линии с учётом этих поправок лежит значительно выше, чем в предложенных ранее моделях. В **третьей главе** исследуются нерезонансные эффекты в полном сечении однофотонного рассеяния для случая  $L\alpha$  перехода в атоме водорода, в том числе за счёт тонкой и сверхтонкой структуры уровней энергии. Отмечается, что за рамками резонансного приближения профиль спектральной линии становится несимметричным и частота перехода определяется неоднозначно. Только сам профиль линии, а не частота перехода, является наблюдаемой величиной. **Четвёртая глава** диссертации посвящена обсуждению нерезонансных эффектов применительно к экспериментам по измерению частоты перехода  $1s \rightarrow 2s$  в атоме водорода. В эксперименте области поглощения и излучения фотонов пространственно разделены, так как в области излучения присутствует постоянное электрическое поле. При теоретическом описании эта схема моделируется зависимостью гамильтониана от времени с разными пределами в далёком прошлом и далёком будущем. По итогам рассмотрения делается вывод об отсутствии существенной асимметрии спектральной линии в данном переходе. В **пятой главе** изучается эффект квантовой интерференции в дифференциальных сечениях рассеяния фотонов. Представлено конкретное приложение теории к спектроскопии атома водорода. Оказывается, что нерезонансные поправки для фиксированного сверхтонкого

подуровня не зависят от геометрии эксперимента, а определяются только квантовыми числами конечного состояния. В этой же главе проводится анализ связи между двумя определениями частоты перехода. Показано, что определение частоты как «центра линии» или как «максимума линии» являются, по сути, идентичными в рамках установленной экспериментальной погрешности. В **шестой главе** проводится анализ профиля линии, наблюдаемого при определении частот двухфотонных переходов. Обсуждаются нерезонансные эффекты при поглощении двух фотонов с последующим излучением одного фотона для переходов  $2s \rightarrow ns/nd$  в атоме водорода. Как и в случае однофотонных переходов, здесь существуют «магические» углы, при излучении под которыми сдвиг максимума профиля линии в дифференциальном сечении равен нулю. Проведён также анализ нерезонансных эффектов для двухфотонных переходов в атоме гелия. **Седьмая глава** посвящена сравнительному анализу спектров атомов водорода и антиводорода во внешних полях. При наличии линейного по внешнему электрическому полю вклада в дифференциальное сечение рассеяния фотона можно ожидать различия частот перехода для водорода и антиводорода. Оценка разности частот приводит к величине порядка  $10^{-4}$  Гц, что говорит о невозможности её прямого наблюдения в настоящее время. В этой же главе представлен сравнительный анализ спектральных характеристик водорода и антиводорода во внешнем магнитном поле. **Восьмая глава** содержит расчёты одно- и двухфотонных переходов как в отсутствие внешних полей, так и во внешнем электрическом поле. Помимо вычисления одно- и двухфотонных вероятностей переходов в приложении к атомам водорода и антиводорода, рассматриваются задачи, связанные с астрофизическими исследованиями микроволнового космического излучения. Детальный анализ двухфотонных переходов с наличием в них канала каскадного распада приводит к выводу о невозможности разделения прямого и каскадного вкладов. В **девятой главе** представлены расчёты одно- и двухфотонных вероятностей излучения во внешнем электрическом поле. Показано, вероятности распада для атомов водорода и антиводорода могут различаться. Это различие возникает за счёт линейных по полю вкладов, как и в случае нерезонансных поправок. Установлено, что различие вероятностей излучения атомов водорода и антиводорода для дифференциальных вероятностей перехода возникает в очень слабых электрических полях и составляет порядка 0.1%. Эта разница исчезает после интегрирования по направлениям испускания фотонов. **Десятая глава** исследует искажение профиля линии за счёт многофотонных процессов с приложением к теоретическому описанию микроволнового космического фона, обсуждается также влияние искажения профиля линии на определение параметров межзвёздной среды. Теоретический метод решения задач в этой главе основан на формализме матрицы плотности. В рамках приближения трёхуровневого атома анализируются различные схемы расположения уровней и переходов между ними. В **заключении** кратко подводятся итоги выполненной работы. В частности, отмечается, что полученные результаты могут иметь приложение в трёх важных областях современной физики, каковыми являются спектроскопия атома водорода и прецизионное измерение частот переходов; эффекты, возникающие во внешних полях и приводящие к разнице спектральных характеристик водорода и антиводорода, что, в свою очередь, может быть использовано для поиска антиматерии во Вселенной; астрофизические исследования микроволнового космического фона и межзвёздной среды.

Диссертация Д. А. Соловьева является результатом многолетней плодотворной научной работы талантливого и высококвалифицированного специалиста в одной из самых востребованных областей современной теоретической физики. Большинство результатов, полученных в диссертации, являются **новыми**. Особо могу отметить вывод зависимости от частоты для ширины атомного уровня (естественная асимметрия линии) из первых принципов КЭД, а также исследование каскадных процессов излучения в контексте астрофизических исследований, в рамках которого был сделан вывод о невозможности разделения прямого и каскадного излучения. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих теоретических методов и высокоточных вычислений; подтверждением служит сравнение с результатами других авторов там, где это возможно.

Существенных **замечаний** по содержанию диссертационной работы Д. А. Соловьева у меня нет, однако могу отметить следующие моменты, которые вызвали вопросы или возражения.

1. На с. 7 приводится список монографий по квантовой электродинамике [1-4]. Все ссылки даны на англоязычные издания. Я считаю, что в русском тексте диссертации следует по возможности давать ссылки на русские издания, тем более, если такие издания являются оригинальными.

2. Представляется, что формула (2.2) на с. 35 не согласуется с формулой (2.4) на с. 36, если иметь в виду стандартные определения скалярного произведения в трёхмерном евклидовом пространстве и четырехмерном пространстве Минковского. Чтобы избежать возможной путаницы, следовало бы привести определения скалярных произведений непосредственно в тексте диссертации.

3. На с. 45 содержится утверждение, что «мнимая добавка в знаменателе амплитуды (2.28) определяется линейным и кубическим по частоте вкладами». Возникает вопрос, насколько общим является этот результат и каким может быть вклад более высоких степеней частоты?

4. Обращает на себя внимание несколько нестандартное определение функции Грина в уравнении (3.13) на с. 54; я имею в виду знак и комплексное сопряжение в правой части (3.13).

5. На с. 68 присутствует следующее утверждение: «... в случае слабого поля, если пренебречь штарковскими сдвигами, сохранение энергии фактически осуществляется. Тогда можно сохранить стандартную формулировку (4.11) для оценки вероятностей перехода и стандартную диаграммную технику Фейнмана, используя, однако, волновые функции, возмущенные электрическим полем». Эти рассуждения представляются весьма приближенными и неубедительными, желательно было бы привести здесь какое-то обоснование или ссылку на литературу.

6. На с. 71-72 имеется формула  $E_{a'} - E_a - 2\omega = E_{a'} - E_a - 2\omega \pm E_{a'}$ . Может ли выполняться это равенство, кроме случая, когда  $E_{a'} = 0$ ?



7. На с.108 название раздела 6.1 «Амплитуда и сечение двухфотонного рассеяния с последующим излучением одного фотона» несколько неточное, правильнее было бы говорить о поглощении двух фотонов с последующим излучением одного фотона.

8. Возможно ли обращение в ноль знаменателя во втором слагаемом в правой части формулы (7.8) на с. 142?

9. С сожалением должен констатировать, что в тексте диссертации имеются многочисленные опечатки и грамматические ошибки. Это тем более удивительно, что компьютерные средства проверки правописания в настоящее время широко доступны.

Перечисленные замечания не снижают высокой оценки диссертации Д. А. Соловьева, которая в целом представляет собой серьёзное и глубокое научное исследование в одной из наиболее интересных научных областей на стыке теоретической атомной физики и астрофизики. Научная ценность полученных в диссертации результатов и их достоверность не вызывают сомнений. По теме диссертации опубликовано 39 статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах, в том числе таких престижных, как Physical Review Letters и Physics Reports. Результаты докладывались на многочисленных конференциях и хорошо известны специалистам.

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.

Председатель диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, доцент,  
профессор кафедры квантовой механики  
СПбГУ



Тельнов Дмитрий Александрович

Дата

30.08.2024



30.08.2024

