



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021
Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17
post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>
ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998
ИНН 7802072267, КПП 780201001

Санкт-Петербургский государственный
университет

В Отдел по обеспечению деятельности
диссертационных советов

Санкт-Петербург, Университетская
набережная, 7-9, 199034

Тел. 329 97 88

12.08.2024 № 04.02-12-1809

На № _____ от _____



Утверждаю:

И.о. директора Федерального
государственного
бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им.
А.Ф. Иоффе РАН
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

 С.В. Иванов
« ___ » _____ 2024 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации – Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на диссертацию Соловьева Дмитрия Анатольевича «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

В диссертации Соловьева Д.А. методами квантовой электродинамики проведено теоретическое исследование нерезонансных эффектов и эффектов квантовой интерференции в прецизионной спектроскопии атомов водорода, антиводорода, мюонного водорода, дейтерия и гелия. Актуальность работы связана с ускоренным развитием прецизионных спектроскопических измерений, для интерпретации которых необходим выход за рамки стандартного резонансного приближения. Работа включает фундаментальные исследования нерезонансных эффектов, которые могут влиять на профили спектральных линий. Исследования выполнены на высоком теоретическом уровне и доведены во многих случаях до численных значений.

Заведующий сектором теоретической астрофизики
Иванчик Александр Владимирович
(812)292-71-80, iav.astro@mail.ioffe.ru

33-06-656 от 15.08.2024

Диссертация состоит из введения, 10 глав и заключения, содержит 28 рисунков, 26 таблиц, список сокращений и условных обозначений. Библиография содержит 280 наименований. Отдельно приведен список 39 публикаций по результатам диссертации. Общий объем диссертации – 307 стр.

Во введении обоснована актуальность диссертации, определены ее цели и задачи. Описаны: научная новизна работы, практическая значимость, методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов. Приведен список основных научных результатов и сформулированы положения, выносимые на защиту. Кратко описаны 39 публикаций по результатам диссертации и определен личный вклад автора.

Глава 1 носит вводный характер. В ней описано, как проведение прецизионных спектроскопических экспериментов приводит к необходимости развития теории нерезонансных эффектов при расчетах профилей спектральных линий.

В главе 2 представлен подробный вывод зависимости ширины возбужденного уровня одноэлектронного атома от частоты фотона в окрестности резонанса. Полученный профиль спектральной линии отличается от профиля Лоренца, причем при удалении от резонанса профиль становится асимметричным.

В главе 3 рассмотрены различные нерезонансные поправки, следующие из выражения для полного сечения однофотонного рассеяния на атомах водорода и на водородоподобных ионах. Показано, что для атомов водорода в ряде случаев поправки к резонансной частоте оказываются за пределами достижимого спектрального разрешения. Наибольшие нерезонансные поправки соответствуют интерференционным членам, связанным со сверхтонкими расщеплениями уровней, например уровня основного состояния $1S_{1/2}$ ($F=0$) и $1S_{1/2}$ ($F=1$) при рассеянии фотонов с переходом на возбужденный уровень $2P_{3/2}$ ($F=1$). Отмечено, что использование асимметричного контура линии позволяет увеличить точность экспериментального определения частоты перехода.

В главе 4 оценены нерезонансные поправки к резонансной частоте двухфотонного перехода $1S - 2S$ в атоме водорода, измеряемые в прецизионных экспериментах. Области возбуждения и излучения атомов в этих экспериментах пространственно разделены так, чтобы при излучении на возбужденные атомы действовало слабое электрическое поле, смешивающее состояния $2S$ и $2P$. Получена верхняя граница величины нерезонансных поправок $\sim 10^{-2}$ Гц, что на три порядка меньше погрешности самых точных измерений.

В главе 5 дан детальный анализ эффектов кантовой интерференции между относительно близкими каналами однофотонного рассеяния. Анализ основан на дифференциальном сечении однофотонного рассеяния, учитывающем интерференцию амплитуд резонансного и близкого к резонансному переходов из основного состояния. Найдены аналитические выражения для поправок к резонансной частоте. Подробно исследована зависимость нерезонансных поправок от корреляций между угловыми характеристиками поглощенного и рассеянного фотонов. Показано, что эксперименты, различающиеся способами регистрации рассеянных фотонов, могут приводить к разным измеренным нерезонансным

сдвигам частоты поглощенного фотона. Кроме того установлено, что интерференционные эффекты за счет различных каскадных процессов излучения дополнительно усиливают асимметрию профиля линии поглощения.

В главе 6 приведено последовательное теоретическое рассмотрение эффектов квантовой интерференции, способных влиять на результаты прецизионных измерений частоты двухфотонных переходов в водороде и гелии. Детально рассмотрены угловые корреляции между направлениями и поляризациями трех фотонов (два поглощенных фотона и один излученный). Теория применена к анализу результатов прецизионных экспериментов. При этом влияние нерезонансных процессов, в частности, переходов, интерферирующих с резонансным поглощением (в данной главе – двухфотонным), приводит к необходимости рассмотрения процесса излучения для определения особенностей контура линии поглощения.

В главе 7 проанализированы различия в спектрах излучения и поглощения атомов водорода и антиводорода в присутствии внешних электрического и/или магнитного полей. В частности показано, что линейные по электрическому полю нерезонансные поправки к частоте перехода для атомов водорода и антиводорода различны. Однако этот эффект оказывается на несколько порядков слабее возможностей современных экспериментов. Зеемановское расщепление уровней водорода и антиводорода в магнитном поле отвечает противоположному расположению квантовых магнитных подуровней. Это приводит к разной циркулярной поляризации фотонов, испущенных водородом и антиводородом на одной частоте при фиксированном направлении поля.

В главе 8 представлены результаты особенно сложных квантово-электродинамических расчетов одно- и двух- фотонных переходов, в том числе, при наличии внешнего электрического поля, а также расчеты многофотонных каскадов с выделением в них двухфотонных «звеньев», – стадий каскада с двухфотонными переходами.

В главе 9 детально рассмотрены одно- и двух- фотонные переходы во внешнем электрическом поле. В частности показано, что возможно не только отличие контуров спектральных линий атомов водорода и антиводорода, обсужденное в главе 7, но и отличие вероятностей распадов их возбужденных состояний. Указано на отличие времен жизни ридберговских состояний атомов водорода и антиводорода во внешнем электрическом поле. Показано, что отличие дифференциальных вероятностей переходов этих атомов возникает даже в очень слабых электрических полях и составляет порядка 0.1%.

В главе 10 на уровне оценок рассмотрено взаимодействие атомов водорода с резонансными фотонами в присутствии поля излучения в приложении к астрофизическим и задачам. Использован формализм матрицы плотности в трехуровневом приближении. При учете разных схем трехуровневого взаимодействия атомов водорода с полем излучения оценены искажения коэффициента поглощения или изменения оптической толщи для исследуемых резонансных фотонов.

В заключении указаны области физики и астрофизики, к которым можно приложить полученные результаты.

Научная новизна диссертации состоит в проведенных оригинальных теоретических исследованиях асимметрии профилей спектральных линий и нерезонансных эффектов в приложении к прецизионным спектрометрическим измерениям. Полученные результаты неоднократно докладывались на отечественных и зарубежных научных конференциях. Результаты изложены в 39 научных статьях, опубликованных в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, которые цитируются базами Scopus, Web of Science и ВАК РФ.

К диссертации можно сделать ряд замечаний:

1. Текст недостаточно отредактирован. В нем, и особенно в формулах немало небрежностей. К ним относятся неточности в записи знаков (\pm) и обозначении энергий в знаменателях амплитуд переходов. Например, в формуле (2.19) на стр. 38 в нерезонансном слагаемом частота ω_2 должна входить со знаком плюс, а не минус. То же относится и к знаку перед Ω в знаменателе формулы (2.24) на стр. 40. Далее, из сравнения формул (2.33) и (2.35) на стр. 44 диссертации с аналогичными формулами (50) и (52) оригинальной работы [8] видно, что аргументом собственно-энергетической части является $E_a + \omega$ (E_a – энергия основного состояния), а не $E_b + \omega$ (E_b – энергия возбужденного состояния), как написано в тексте. Это отражается и на последующих формулах. Формулы (10.38) и (10.39) на стр. 244, использованные для численных оценок, которые приведены в таблице 10.9 на стр. 246, неточны. Следовало бы аккуратнее рассмотреть показатели степеней выражений, определяющих зависимость от космологических красных смещений частот излучения между парами объектов: “источник – наблюдатель” и “источник – поглотитель”, а также выражения для сопутствующих расстояний между этими объектами. Список неточностей можно было бы продолжить.

2. В параграфе 6.5 введено понятие теплового уширения резонансных линий, которое рассчитывалось как вероятность переходов, индуцированных чернотельным излучением. В таблице 6.3 на стр. 125 приведены примеры такого уширения для уровней атома водорода при температуре 300 К. В рассмотренных случаях тепловое уширение оказывается значительно меньше естественной ширины уровней. Однако доплеровское уширение уровней атомов из-за теплового движения при той же температуре много больше естественных ширин. Возможность пренебрежения доплеровским уширением уровней в таких случаях сомнительна.

3. Оценки резонансных квантово-электродинамических эффектов для астрофизических приложений, особенно в главе 10, выполнены без учета теплового доплеровского уширения спектральных линий излучающих и/или рассеивающих атомов. Было бы желательно привести более серьезное обоснование применимости такого приближения.

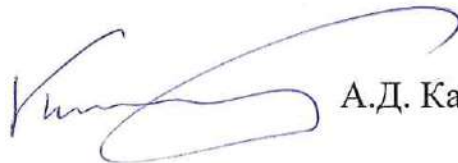
В целом же, несмотря на указанные недостатки, диссертация Соловьева Д.А. представляется законченным, своевременным и очень полезным исследованием, выполненным на высоком теоретическом уровне с виртуозным использованием тонких аспектов квантовой электродинамики. Тем самым развивается новая область

исследований, которую можно назвать теоретической спектроскопией нерезонансных и многофотонных процессов. Она определяет детали профилей сложных спектральных линий, позволяет ставить и интерпретировать новые прецизионные эксперименты. Результаты диссертации могут быть использованы в СПбГУ, ФИАН, МГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ГОИ, и в ряде других научных учреждений.

Диссертация Соловьева Д.А. на тему «Теоретические аспекты процессов фотонного рассеяния в приложениях к прецизионным спектроскопическим экспериментам и астрофизике» удовлетворяет основным требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Соловьев Д.А. несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка не обнаружены.

Результаты диссертации заслушаны на семинаре сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе 26 марта 2024 г. и одобрены единогласно (протокол номер 23).


Ведущий научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
д.ф.-м.н.

 А.Д. Каминкер

Главный научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
член-корр. РАН,
д.ф.-м.н.

 Д.Г. Яковлев

Заведующий сектором теоретической астрофизики
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
член-корр. РАН
д.ф.-м.н.

 А.В. Иванчик

ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, дом 26.

Подпись Сулияури Е.М. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе
Сулияури Е.М.



Подпись Сулияури Е.М. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе
Сулияури Е.М.



Подпись Сулияури Е.М. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе
Сулияури Е.М.



12.08.2024

12.08.2024