



"УТВЕРЖДАЮ"
директор ИАиЭ СО РАН

* академик А.М. Шалагин

" 13 " марта 2014 года

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации ЕСЕЕВА Марата Каналбековича «Экзотические атомы и ионы в интенсивных электромагнитных полях», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Исследование поведения атомов в интенсивных электромагнитных полях — основа современной атомной физики. Особый интерес вызывают так называемые «экзотические» атомы: позитроний (e^+e^-), антиводород ($\bar{p}e^+$), мюоний ($e^-\mu^+$), мезоатомы ($\mu d, \mu t$) и т.п. Измерение их сечений, спектров, вероятностей распада важно не только для атомной физики, но и для проверки фундаментальных законов природы, поисков нарушений свойств симметрии. Для экспериментов с короткоживущими атомами требуются специальные электромагнитные ловушки, описанные в первой части работы. Вторая часть посвящена атомам и ионам в сильных электромагнитных полях. Таким образом, в диссертационной работе М.К. Есеева представлено комплексное исследование накопления экзотических атомов и их взаимодействия с ультракороткими импульсами, поэтому *актуальность* тематики не вызывает сомнений.

Работа состоит из 6 глав, занимает 248 страниц и содержит 246 ссылок в списке литературы. Глава 1 посвящена электромагнитным ловушкам. На основе уравнений движения в ловушке с постоянным

продольным магнитным полем и вращающимся поперечным электрическим полем приведены оценки характерных частот колебаний заряженной частицы. Подробно проанализирована релаксация из-за столкновений позитрона с остаточным газом. При малых энергиях аннигиляция позитрона оказалась не слишком вероятным процессом из-за отсутствия свободных электронов. Показано, что потери энергии позитрона происходят в основном за счет возбуждения вращательных и колебательных уровней молекул остаточного азота. В разделе 1.4 приведено и обосновано простое физическое объяснение влияния вращающегося электрического поля на радиальный размер сгустка. Причиной влияния является параметрический резонанс, возникающий при совпадении частоты поля с циклотронной или магнетронной частотой. Таким образом предложена трехмерная модель ловушки, позволяющая оптимизировать ее параметры.

Глава 2 описывает эксперименты по накоплению электронных и позитронных сгустков в ловушке Сурко на установке LEPTA. Важной задачей было достижение достаточно большого времени циркуляции позитронов. Удалось значительно продвинуться в решении этой задачи за счет коррекции продольного магнитного поля и улучшения вакуума. Следующими важными этапами подготовки эксперимента с позитронием являются электронное охлаждение позитронов и повышение эффективности генерации атомов позитрония. Для измерения времени жизни парапозитрония с рекордной на сегодняшний день точностью необходимо обеспечить разброс скоростей, не превышающий 0.01%. Поэтому охлаждение является важной частью работы. Для моделирования поведения позитронов в ловушке Сурко численно решались уравнения движения заряженной частицы в скрещенных полях, а начальные условия выбирались с помощью датчика случай-

ных чисел с известным из эксперимента распределением. На основе такой простой модели проведена оптимизация параметров ловушки, в частности, подобрана оптимальная частота вращающегося поля 650 кГц. Следует особенно отметить результаты, приведенные на стр. 65 и 68, где показано неплохое согласие модели с экспериментом на примерах зависимостей количества накопленных в ловушке частиц от времени и поперечного размера сгустка от давления буферного газа.

Чтобы знать, как происходит аннигиляция позитронов в остаточном или буферном газе, в главе 3 построена теория столкновений в приближении мгновенных возмущений. Выбранная форма записи эволюционного оператора (представление Магнуса) удобно для расчета по сравнению с другими вариантами разложения теории возмущений (например, борновским приближением), потому что сохраняет условие унитарности оператора и не требует предположения о слабости взаимодействия. В этом приближении вычислено сечение «стряхивания» мюона из мезоатома при столкновении с молекулой дейтерия. Способы увеличения именно этого сечения жизненно важны для термоядерного синтеза на основе мюонного катализа. Показано, что главным процессом является ионизация мезоатома, а сечение этого процесса можно радикально увеличить, если молекулы дейтерия выстроить вдоль некоторой оси с точностью 10^{-3} . Как показано на рис. 3.4, сечение получается больше чем в эксперименте и во всех предыдущих теориях. В разделе 3.4 приводится теория метастабильности антипротонного гелия. Предполагается, что антипротон в гелии образует ион $\bar{p}\alpha e e$, один из электронов которого является слабо связанным и удерживается на далекой орбите только заряд-дипольным взаимодействием. В рамках предложенной модели удается объяснить, почему метастабильность наблюдается только в чистом гелии, и рас-

считать сечения тушения.

В главе 4 строится теория ионизации и возбуждения атомов аттосекундными электромагнитным импульсом. Такие импульсы могут быть не только лазерными, но и создаваться ультрарелятивистскими тяжелыми ионами, которые получаются в современных ускорителях. Расчет выполнен в приближении внезапного возмущения. На первом этапе выполнено сравнение 7 различных аналитических выражений для волновой функции гелия и отобраны те из них, которые дают правильную вероятность неупругих процессов. Показано, что в расчете неупругих процессов следует учитывать корреляции электронов, тогда как при расчете энергии основного состояния можно пользоваться и более простыми выражениями. В разделе 4.5 найдена вероятность возбуждения и фотоионизации позитрония коротким импульсом гауссовой формы. Показано, что при не слишком малых и не слишком больших переданных импульсах вероятность неупругих процессов в позитронии выше, чем в атоме водорода (см. рис. 4.7). Это объясняется большим размером позитрония и относительно малой энергией связи. В разделе 4.6 обсуждается фотоионизация мезоатома периодической последовательностью ультракоротких импульсов. Найден интервал величины переданного импульса, в котором вероятность существенно возрастает за счет ступенчатых процессов возбуждения с последующей ионизацией из возбужденного состояния.

Процесс рассеяния ультракоротких импульсов изучен в главе 5. Расчет выполнен в приближении внезапного возмущения, когда во время действия мощного импульса можно пренебречь собственным гамильтонианом атома. В разделе 5.3 найдены парциальные спектры переизлучения атомом водорода и наглядно демонстрируется, как узнать конечное состояние атома по диаграмме направленности

излучения. Раздел 5.4 содержит расчет рассеяния на атоме гелия с учетом корреляции электронов из-за их кулоновского отталкивания. Показано, что учет корреляции увеличивает относительное количество некогерентного излучения в спектре. Кроме того проведена еще одна динамическая проверка упрощенных аналитических формул для волновых функций гелия. Показано, что более разумные результаты дают те же функции, что и в предыдущей главе, учитывающие корреляции электронов. В следующем разделе приведен анализ рассеяния электромагнитного импульса на атоме позитрония. Переизлучение на электроне и позитроне сопровождается интерференцией. Показано, что интерференционные эффекты получаются меньшей величины, чем в атоме гелия, за счет сравнительно большого расстояния между электроном и позитроном.

Вклад ориентационных эффектов в процессе фотоотрыва электрона от отрицательного молекулярного иона под действием аттосекундного импульса исследован в главе 6. Показано, что ориентационная зависимость сечения фотоионизации становится слабой при больших переданных импульсах. При малых переданных импульсах вероятность ионизации имеет сильную зависимость от угла между переданным импульсом и направлением межядерной оси, как показано на рис. 6.1. Вероятность фотоотрыва минимальна, если переданный импульс перпендикулярен указанной оси. Расчет производится в приближении двухцентрового потенциала нулевого радиуса, которое сравнительно хорошо работает в отрицательных ионах, где расстояние до электрона много больше радиуса его взаимодействия с ядрами. Переизлучения на положительном молекулярном ионе водорода рассмотрено в разделе 6.3. Показано, что спектр переизлучения меняется сильно, когда направление вектора электрического поля падающего импуль-

са совпадает с направлением межъядерной оси. Отрицательные ионы других двух атомных молекул рассмотрены в разделе 6.4. Получены сечения, которые оказались заметно больше, чем для свободного электрона. Показано, что сечение зависит также от энергии связи электрона. Если связь слабая, электрон испытывает большие ускорения и поэтому сечение возрастает.

Таким образом, в работе получен целый ряд *новых научных результатов*: предложена трехмерная модель ловушки Сурко, найдены оптимальные параметры накопления, рассчитаны сечения «стряхивания» мюона из мезоатома в поле лазерного импульса и тушения метастабильного антипротонного гелия на примесях, получены спектры переизлучения и ионизации атомов при взаимодействии с аттосекундными импульсами.

Имеется несколько замечаний:

1. На стр. 49 приводится список 8 предлагаемых уникальных экспериментов на направленных потоках позитронов. Перспектива использования позитронов для фундаментальных измерений очень важна и в диссертации следовало бы подробнее написать о них, привести оценки необходимой точности измерений для наблюдения каждого эффекта, а не ограничиваться простым перечислением.
2. На рис. 4.5 изображен короткий импульс с гауссовой огибающей. В диссертации предполагается, что точка максимума электрического поля и максимум огибающей совпадают. Однако относительная фаза поля и огибающей может быть разной, а проанализирован только частный случай нулевой разности фаз. Следовало бы изучить зависимость вероятности фотоионизации не только от количества осцилляций налетающего поля, но и от относитель-

ной фазы.

3. Следует подробнее обсудить в тексте применимость приближения внезапных возмущений в поле мощного электромагнитного импульса, энергия взаимодействия электрона с которым много больше его энергии взаимодействия с ядром.
4. В рукописи имеются отпечатки и повторы. В частности, на стр. 77, вместо «стряхивания» написано «страхования». Под рис. 2.12 не указана частота вращающегося поля. Предпоследнее уравнение в отдельной строке перед уравнением (5.5) на стр. 152 совпадает с первым уравнением стр. 150. То же самое уравнение под номером (5.32) фигурирует также на стр. 185, а четвертый раз встречается на стр. 202.

Однако эти замечания носят частный характер, относятся в основном к оформлению, а не к содержанию диссертации, и поэтому не влияют на общую положительную оценку работы.

Достоверность выводов подтверждается не только согласием с экспериментом, но и глубоким теоретическим анализом использованных приближений, а также совпадением в предельных случаях с известными результатами других авторов. О *научной новизне* свидетельствуют 21 статья автора в УФН, ЖЭТФ, ЖТФ, Вестнике Поморского университета и др. рецензируемых журналах, а также доклады на отечественных и международных конференциях. Автореферат полно и правильно отражает основные идеи и выводы диссертации.

Таким образом, диссертация М.К. Есеева представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований экзотических атомов в интенсивных электромагнитных полях разработаны теоретические положения, сово-

купность которых можно квалифицировать как научное достижение. Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов и достоверность выводов, можно заключить, что работа М.К. Есеева вполне удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а автор заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Результаты исследований можно рекомендовать для применения в ряде организаций: в Объединенном Институте ядерных исследований, Курчатовском институте, Институте ядерной физики СО РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева.

Заведующий лабораторией

Института автоматки и электрoметрии СО РАН

д.ф.-м.н., профессор



Д.А.Шапиро

Подпись д.ф.-м.н. Д.А.Шапиро з а в е р я ю:

Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН

д.т.н.



С.В. Михляев

отзыв составил (а): Шапиро Давид Абрамович,
д.ф.-м.н., профессор,
заведующий Лабораторией фотоники, ФГБУН «Институт
автоматики и электрoметрии» Сибирского отделения
Российской академии наук,
адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Коптюга, д. 1
тел: 8 (383) 3309021 e-mail: shapiro@iae.nsk.su