

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Попова Александра Михайловича о диссертационной работе Поповой Марии Михайловны «Когерентный контроль при ионизации атомов электромагнитными полями кратных частот», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа М.М. Поповой посвящена исследованию процессов фотовозбуждения и фотоионизации атомов в интенсивных когерентных полях в диапазоне частот вакуумного ультрафиолета, как в присутствии дополнительного ИК поля, так и без него. Особое внимание в диссертации уделяется описанию угловых распределений фотоэлектронов, их зависимости от поляризации полей и вопросу возможности осуществления над ними когерентного (фазового) контроля.

Проведение исследований было простимулировано появлением мощных источников когерентного излучения в высокочастотной области спектра (~ 10 эВ) и необходимостью теоретической поддержки экспериментов, проводимых с этими источниками. В настоящее время существующие источники делятся на два основных типа: это лазеры на свободных электронах и установки, основанные на генерации гармоник высокого порядка. Эксперименты с обоими типами источников рассматриваются в диссертации в рамках единого подхода, основанного на нестационарной теории возмущений в дипольном приближении на основе алгебры углового момента и метода статистических тензоров с применением современных спектроскопических пакетов для расчёты матричных элементов переходов.

Актуальность проводимых исследований дополнительно подтверждается тем, что за основополагающие работы в этом направлении в 2023 году Пьеру Агостини, Ференцу Краусу и Анн Л'Юилье была присуждена Нобелевская премия по физике.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 120 страниц, включая 27 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 147 библиографических ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

В **первой главе** приводится обзор современного состояния исследований в области аттосекундной интерферометрии, к которой и относится диссертация, причем особое внимание уделено прогрессу в

областях “ $\omega + 2\omega$ ” когерентного контроля и RABBITT-спектроскопии — двум направлениям, которые рассматриваются в последующих главах.

Во **второй главе** описываются используемые методы: вводится необходимый математический аппарат, обсуждаются его достоинства и недостатки. В диссертации для выкладок используется формализм статистических тензоров, который позволил факторизовать часть, связанную со спектроскопическими характеристиками атома, энергией, интенсивностью и длительностью электромагнитного полей, от части, связанной с поляризацией последних, то есть их геометрическими характеристиками, что позволило аккуратно изучить влияние поляризации излучения на угловое распределение и поляризацию спина фотоэлектронов. Еще одно преимущество развитого метода состоит в возможности единым образом описывать амплитуды переходов, вызванных различным числом фотонов, что является удобным для описания интерференции между этими амплитудами.

В **третьей главе** обсуждаются используемые спектроскопические модели. Для описания атома неона (выбор этого атома для моделирования объясняется тем, что он наиболее часто используется в качестве мишени при проведении экспериментов) было применено три подхода: многоконфигурационный метод Хартри-Фока, метод R-матрицы и метод устранения расходимости (для переходов между состояниями континуума). Для описания атома гелия был использован метод устойчивой вариации в одноэлектронном приближении.

Четвертая глава посвящена обсуждению конкретных результатов моделирования. В первой ее части обсуждается схема “ $\omega + 2\omega$ ” и исследуется вопрос о возможности осуществления когерентного контроля в такой постановке эксперимента. Часть полученных результатов используется для описания известных из литературы экспериментов. В этой главе показано, что для некоторых комбинаций поляризаций полей (а именно, когда обе компоненты обладают круговой поляризацией и когда одно из компонент имеет круговую поляризацию, а другая — линейную в перпендикулярной плоскости) понятие когерентного контроля вырождается, так как угловые распределения сохраняют свою форму при изменении фазы между гармониками ω и 2ω . Для линейно же поляризованных полей степень когерентного контроля, определяемая по формуле 4.7, может достигать 100 процентов. Большое внимание уделено также поляризации спина фотоэлектронов в этом процессе. Предсказано появление компонент, появляющихся исключительно за счет интерференции однофотонной ионизации фотоном 2ω и двухфотонной ионизации $\omega + \omega$.

Во второй части четвертой главы обсуждаются вопросы аттосекундной метрологии в методе RABBITT (Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon Transitions) у порога фотоионизации

и обсуждаются эффекты переходов через связанные возбужденные состояния при проведении подобных экспериментов. Представлены результаты расчетов методом решения скоростных уравнений и методом нестационарной теории возмущений и показана применимость последней для интенсивностей, характерных для подобных экспериментов. Показано, что величина боковых линий и осцилляций в них (возникающих в результате переходов, например, $15\omega + \omega$ и $17\omega - \omega$) у порога растет с ростом энергии. Рассчитаны угловые распределения фотоэлектронов и влияние на них переходов через дискретные состояния.

В заключении приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне. Результаты исследований опубликованы в авторитетных научных журналах, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях.

В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

1. Наличие совместных теоретико-экспериментальных работ, экспериментальная часть которых была выполнена на ЛСЭ Ферми, что показывает высокую заинтересованность ведущими мировыми группами в исследованиях, рассматриваемых в диссертации;
2. Подробный вывод используемых выражений в наиболее общем виде позволяет использовать результаты диссертации при рассмотрении других систем в сходных процессах ионизации атомов;
3. Расчеты выполнены при параметрах полей, доступных на современных установках, и для наиболее часто использующихся мишеней, что делает результаты практичными для планирования/описания будущих экспериментов.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. Основная часть аналитических расчетов в диссертационной работе выполнена в dE-калибровке, что не эквивалентно проведению расчетов в pA-калибровке. Эти калибровки дают идентичные ответы лишь в случае точного решения нестационарного уравнения Шредингера для квантовой системы в поле электромагнитной волны. Расчеты, приведенные в тексте, показывают, что при приближенных аналитических расчетах результаты оказываются различными, иногда довольно значительно (см. рис.3.1–3.4 в тексте). В тексте диссертации отсутствует обсуждение того, какой из калибровок (длины или скорости) следует отдать предпочтение в том или ином случае.

2. Неясно, учитывался ли при расчетах в рА-калибровке член с A^2 , определяющий, в частности, штарковский сдвиг состояний континуума.
3. В реальных экспериментах имеется некоторое распределение излучения по фокальному объему, которое не учитывалось в расчетах. Остается без внимания вопрос, насколько важен учет таких распределений при сравнении теоретических и экспериментальных данных.
4. На с.66 утверждается, что при сравнении экспериментальных данных, полученных на ЛСЭ, интенсивности излучения на первой и второй гармониках составляли 10^{13} и $2 \cdot 10^{10}$ Вт/см², т.е. отличались в 500 раз. В то же время расчеты проводились для напряженностей полей, отличающихся лишь в 5 раз, т.е. в 25 раз по интенсивности, хотя, казалось бы, следовало взять отношение полей, соответствующее условиям эксперимента.
5. Количественная формулировка степени когерентного контроля в процентах должна фигурировать непосредственно в защищаемых положениях (см. пункты 2 и 5 на с.11-12), иначе сделанные утверждения могут трактоваться неоднозначно.
6. Имеется также ряд неточностей и опечаток:
 - а) На с.17 утверждается, что при $\gamma \ll 1$ (γ — параметр Келдыша) реализуется многофотонный режим ионизации).
 - б) Разложение (2.10)–(2.11) волновой функции задачи по полному набору собственных функций атомного гамильтониана формально возможно всегда, а не только в слабых полях по сравнению с внутриатомным, как это утверждается на с.24. А вот физически осмысленно такое разложение лишь в достаточно слабых полях.
 - в) Под собственной системой отсчета в релятивистской физике обычно понимают систему, в которой исследуемый объект неподвижен. В этом смысле такой системы отсчета для фотона не существует, а терминология в тексте диссертации (см. с.29) не вполне удачна.

Указанные замечания носят скорее методический характер и не умаляют заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и высокой оценки диссертации.

Общее впечатление о диссертационной работе М.М. Поповой положительное. Считаю, что диссертация «Когерентный контроль при ионизации атомов электромагнитными полями кратных частот» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим

наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Попова Мария Михайловна — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники
физического факультета Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Попов Александр Михайлович

«10» сентября 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-49-54

e-mail: kaf-affp-mics@physics.msu.ru; affp.phys@org.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.08 — «Физика плазмы»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Телефон: +7 (495) 939-16-82

e-mail: info@physics.msu.ru; kaf-affp-mics@physics.msu.ru

Подпись Попова Александра Михайловича ЗАВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., доцент

Стремоухов С.Ю.