

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Д.В. Князевой
«Аналитическая модель для описания надпороговой ионизации атомов в сильном
лазерном поле»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Диссертационная работа Д.В. Князевой посвящена теоретическому исследованию эффекта надпороговой ионизации отрицательных ионов и атомов в поле интенсивного лазерного излучения. Основной целью работы является обобщение известных ранее аналитических выражений для спектрально-угловых распределений фотоэлектронов в поле сильной монохроматической волны в области высокоэнергетического плато на случай лазерного импульса конечной длительности и произвольной формы и на случай бихроматического излучения. В течение последних примерно 15 лет, прошедших со времени получения ультракоротких – состоящих из нескольких оптических периодов – мощных лазерных импульсов со стабилизированной фазой (G.G. Paulus, F. Grasbon, H. Walther et al., Nature **414** (2001)), исследования взаимодействия таких импульсов с атомными системами, плазмой и твердым телом остаются одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений лазерной физики. Исследование нелинейных квантовых эффектов в сильном бихроматическом поле также вызывает большой интерес, связанный, в частности, с разнообразными приложениями, включая генерацию импульсов терагерцового излучения, излучение циркулярно поляризованных гармоник лазерной волны, фазовый контроль ионизации и др. Поэтому тема диссертационного исследования безусловно является актуальной.

Среди теоретических подходов, используемых в физике взаимодействия интенсивного лазерного излучения с атомными системами, важное место занимают точно решаемые модели, основанные на методе потенциала нулевого радиуса (или на методе эффективного радиуса – МЭР) и на методе комплексных квазиэнергий (ККЭС). Сочетание этих методов позволяет получить замкнутое аналитическое

выражение для амплитуды нелинейной ионизации отрицательно заряженного иона с произвольным значением углового момента начального состояния (M.V. Frolov, N.L. Manakov, E.A. Pronin and A.F. Starace, Phys. Rev. Lett. 91 (2003)). Это точное аналитическое решение представляет собой мощный инструмент исследования квантовой динамики атомных систем, дополняющий квазиклассические приближенные методы (из которых наиболее известным является метод Келдыша или приближение сильного поля) с одной стороны и численные решения уравнения Шредингера с другой. В диссертационной работе область применения МЭР и ККЭС расширяется на случай некогерентного излучения – бихроматического поля и поля короткого лазерного импульса.

Диссертация Д.В. Князевой состоит из введения, обзора литературы, трех основных глав, заключения, двух приложений и списка литературы, содержащего 149 наименований. Общий объем диссертации составляет 122 стр.

Во введении сформулирована цель диссертационной работы, обоснована актуальность исследования, приведены положения, выносимые на защиту. Перечислены полученные результаты, дано краткое обоснование их достоверности, практической значимости и научной новизны; обсуждаются также возможности их использования.

В обзоре литературы дан краткий экскурс в историю исследования эффекта нелинейной ионизации. Перечислены основные результаты, полученные при помощи непertурбативных методов описания лазер-атомного взаимодействия. Дано краткое описание современного состояния эксперимента по ионизации атомов ультракороткими лазерными импульсами.

Первая глава посвящена описанию формализма квазистационарных квазиэнергетических состояний и метода эффективного радиуса, которые используются для решения поставленных в диссертационной работе задач. Приведены основные уравнения теории, включая общие выражения для амплитуды и вероятности надпороговой ионизации (полученные ранее в работах Н.Л. Манакова и М.В. Фролова с соавторами). Сформулирован подход, позволяющий вычислить, в рамках формализма ККЭС, спектрально-угловые распределения

фотоэлектронов при ионизации коротким лазерным импульсом заданной формы. Получено общее выражение для дифференциальной вероятности ионизации как функционала формы короткого лазерного импульса.

Основные результаты диссертации изложены во второй главе, посвященной квазиклассическому анализу выражений для вероятности ионизации в поле короткого импульса, использованию полученных упрощенных формул для исследования особенностей спектрально-угловых распределений в области высокоэнергетического плато и сравнению с результатами точных численных расчетов. Показано, что парциальные амплитуды ионизации факторизуются на три сомножителя, каждый из которых может быть обобщен на случай реальных атомов. Выполнены сравнения рассчитанных спектрально-угловых распределений с результатами численного интегрирования уравнения Шредингера в одночастичных потенциалах, моделирующих валентные электроны в аргоне и гелии и с результатами, полученными в рамках т.н. количественной теории перерасеяния (T. Morishita et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 013903 (2008)). В последнем случае установлены условия, при которых оправдана используемая в этой теории факторизация вероятности фотоионизации на лазерные и атомные параметры. Проанализированы качественные эффекты, наблюдающиеся в области плато, и связанные с длительностью и формой импульса. Исследованы обусловленные величиной относительной фазы особенности траекторий с многократным возвращением к атому.

Третья глава посвящена приложению теории нелинейной ионизации в произвольном периодическом поле к описанию надпороговой ионизации атомов бихроматическим излучением, состоящем из основной и второй гармоники линейно поляризованных в одном направлении лазерных волн. Подробно исследован наиболее интересный и сложный случай соизмеримых по величине амплитуд гармоник. Показано, что при этом, в зависимости от значения относительной фазы полей, доминирующий вклад в высокоэнергетическую часть спектра вблизи отсечки плато могут давать как траектории с однократным возвращением к атому, так и траектории с многими возвратами. Обнаружены и проанализированы интерференционные структуры в спектре фотоионизации,

возникающие при добавлении к полю удвоенной частоты малой примеси основной гармоники.

В заключении сформулированы полученные в диссертационной работе результаты. Все перечисленные результаты являются новыми. Их практическая значимость определяется возможностью их использования для расчетов спектрально-угловых распределений электронной компоненты плазмы, образующейся при взаимодействии коротких и бихроматических лазерных импульсов с атомарными газами. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с данными численных расчетов, а их научная обоснованность – использованием широко апробированных методов расчета.

При изучении диссертационной работы у меня возникло несколько вопросов и замечаний:

1. Во второй главе диссертации проводится квазиклассический анализ амплитуды фотоионизации. При этом возникает понятие о моментах ионизации и возврата, определяемых уравнениями (2.31a) и (2.31b). Эти уравнения не содержат потенциала ионизации системы и не зависят от импульса электрона. Первое, скорее всего, означает пренебрежение параметром Келдыша, который считается малым. Отсутствие зависимости от импульса связано, по-видимому, с тем, что рассматривается траектория, отвечающая отсечке плато. На каком основании тогда решения этих уравнений используются в области всего плато?
2. В разделе 2.5.1, посвященном сравнению с результатами численного решения уравнения Шредингера указывается на то, что хорошее согласие этих результатов с аналитическими наблюдается в области энергий фотоэлектрона выше $5u_p$. Ухудшение согласия при меньших энергиях объясняется снижением точности кубической аппроксимации при отходе от края плато. Если принять это объяснение, то кажется странным тот факт, что далеко от края плато, вплоть до $5u_p$, согласие остается очень хорошим, а затем резко ухудшается (кстати, полезно было бы привести графики в области энергий меньше $5u_p$, иначе масштаб и характер расхождений остается неясным читателю). Возможно, причина расхождений другая – при

таких энергиях начинает доминировать прямая ионизация, на форму спектра которой существенно влияет кулоновское взаимодействие, не учитываемое в уравнениях для амплитуды ионизации.

3. В работе широко используется факторизация амплитуды надпороговой ионизации на три сомножителя – амплитуду туннелирования, фактор распространения и амплитуду рассеяния. Это важное свойство амплитуды позволяет обобщить аналитические формулы для спектрально-угловых распределений, полученные для отрицательно заряженных ионов, на случай нейтральных атомов. Из текста мне осталось неясным, почему автор ограничивает область применимости такого приема туннельной ионизацией. На самом деле, фаза подынтегрального выражения в (2.30) остается большой по величине и быстро осциллирующей функцией также в многофотонном режиме, поэтому, казалось бы, метод перевала применим для вычисления интеграла и в этом случае.
4. В тексте диссертации встречаются неточные утверждения. Так, в обзоре литературы, на стр. 13 сказано «Более детальное развитие идея Келдыша получила в классических работах Никишова и Ритуса [24,25], а также Попова, Переломова и Терентьева [26-28]...». Но работа [24] (А.И. Никишов, В.И. Ритус, ЖЭТФ 46, 776 (1964)), во-первых, была опубликована раньше работы Келдыша (Л.В. Келдыш, ЖЭТФ 47, 1945 (1964)), а, во-вторых, посвящена она не ионизации, а элементарным квантовоэлектродинамическим процессам в сильном электромагнитном поле. Далее, работа Аммосова, Делоне и Крайнова [31] опубликована не в УФН, как указано в списке литературы, а в ЖЭТФ. На стр. 42 в обоснование использования квазиклассического приближения приводится следующий аргумент: «Эти приближения верны в туннельном пределе, а именно, амплитуда лазерного поля мала по сравнению с характерной напряженностью атомного (в тексте опечатка – лазерного) поля, а несущая частота лазерного импульса меньше, чем атомная, при этом лазерные параметры обеспечивают малость параметра Келдыша». Несложно убедиться, однако, что при выполнении перечисленных неравенств параметр Келдыша может принимать произвольные значения.

Сформулированные выше замечания не снижают общей высокой оценки представленной работы.

Диссертационная работа Д.В. Князевой представляет собой законченное исследование, результаты которого вносят существенный вклад в развитие теории нелинейной ионизации атомных систем интенсивным лазерным излучением. Основные результаты диссертации представлены на нескольких международных конференциях и опубликованы в виде 5 печатных работ, в том числе 2 статей в ведущих физических журналах из перечня ВАК РФ, включая Physical Review Letters. Тематика диссертационной работы соответствует специальности 01.04.02 «Теоретическая физика», а представленный текст диссертационной работы – положению правительства РФ о присуждении ученых степеней. Автореферат полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что за разработку аналитической модели надпороговой ионизации в поле ультракоротких и бихроматических лазерных импульсов и ее применение к описанию особенностей высокоэнергетической части спектра фотоэлектронов Д.В. Князева заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук

10 ноября 2015г.



С.В. Попруженко

Попруженко Сергей Васильевич,
профессор кафедры теоретической ядерной физики,
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, 115409, Каширское шоссе 31
тел. +74957885699(9376)
email: sergey.popruzenko@gmail.com

