

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физ.-мат. наук Рябикина Михаила Юрьевича на диссертацию Князевой Дарьи Валентиновны «Аналитическая модель для описания надпороговой ионизации атомов в сильном лазерном поле», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Диссертация Д.В. Князевой посвящена проблеме аналитического описания процесса надпороговой ионизации атомных систем для случаев ультракороткого лазерного импульса и двухчастотного лазерного поля. Тема представляется несомненно актуальной ввиду значительного интереса в современной физике явлений в сильных лазерных полях к ионизационным процессам в короткоимпульсных и многоцветных лазерных полях с управляемым профилем электрического поля. Эксперименты демонстрируют сильную чувствительность таких процессов к фазе заполнения импульса относительно огибающей (в случае импульсов длительностью в несколько периодов лазерного поля) и к относительной фазе между компонентами поля (в случае двухчастотного поля). В частности, в обоих случаях, в отличие от случая квазимонохроматического лазерного поля, наблюдаются фазозависимые эффекты асимметрии угловых распределений электронов, что нашло практическое применение в таких областях, как аттосекундная метрология и генерация терагерцового излучения. Развита в диссертации аналитическая модель дает возможность описания этих и других особенностей спектров надпороговой ионизации, что представляет несомненный научный и прикладной интерес.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и списка литературы из 149 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются ее цели, обсуждаются научная новизна, практическая значимость и степень достоверности полученных результатов, излагаются основные защищаемые положения и результаты, приводятся сведения об апробации результатов, их публикации, личном вкладе диссертанта, структуре и объеме диссертации.

В обзорной главе приводятся краткие сведения об имеющихся в литературе данных, относящихся к затрагиваемым в диссертации вопросам.

В первой главе изложены теоретические основы методов, используемых в диссертации для построения описания взаимодействия интенсивного лазерного излучения с атомными системами - формализма квазистационарных квазиэнергетических состояний (ККЭС) и теории эффективного радиуса. Особое внимание уделено применению метода ККЭС к описанию надпороговой ионизации

под действием короткого лазерного импульса; для этого случая предложена процедура, позволяющая получить решение задачи в рамках подхода, развитого ранее для случая периодического во времени лазерного поля.

Во второй главе на основе подхода, представленного в первой главе, подробно рассмотрена задача о надпороговой ионизации атомных систем в поле интенсивного линейно поляризованного сверхкороткого лазерного импульса. Получено замкнутое аналитическое выражение для дифференциальной вероятности надпороговой ионизации для случая электрона, связанного короткодействующим потенциалом. Показано, что для высокоэнергетической области плато выражение для амплитуды надпороговой ионизации в коротком импульсе задается когерентной суммой парциальных амплитуд, каждая из которых факторизуется на три сомножителя. Показано, что каждый из этих трех сомножителей соответствует одному из шагов хорошо известного классического трехшагового сценария процесса надпороговой ионизации. Сформулировано предложение об обобщении полученного результата для рассмотренной модельной системы на случай надпороговой ионизации реальных атомов в коротком импульсе. Выполнено сравнение аналитических результатов с результатами численного решения уравнений Шредингера для атомов гелия и аргона; продемонстрировано хорошее согласие этих результатов в широком диапазоне энергий перерассеянных электронов и телесных углов. Выполнено также сравнение результатов развитой в диссертации аналитической теории с результатами так называемой количественной теории перерассеяния (КТП); дана оценка точности КТП в зависимости от энергии электрона и количества осцилляций в сверхкоротком лазерном импульсе. На основе построенной аналитической теории выявлен и подробно исследован ряд особенностей высокоэнергетической части спектра надпороговой ионизации в коротком лазерном импульсе, таких как асимметрия угловых распределений электронов, возникновение нескольких платообразных структур, а также крупно- и мелкомасштабные осцилляции в спектрах надпороговой ионизации, обусловленные квантовой интерференцией вкладов различных электронных траекторий. Проанализирован вклад различных электронных траекторий в различные области спектра надпороговой ионизации; в частности, показано, что траектории электронов с многократными возвращениями к атомному остову дают существенный вклад в формирование средней части высокоэнергетического плато надпороговой ионизации, обуславливая чувствительность этой части спектра к симметрии начального связанного состояния.

В третьей главе формализм, развитый во второй главе, применен к задаче о надпороговой ионизации в интенсивном двухчастотном лазерном поле. Рассмотрение проведено на простейшем примере бихроматического лазерного поля, содержащего компоненты на основной и удвоенной частоте, линейно

поляризованные вдоль одной и той же оси. Исследованы вклады различных типов электронных траекторий в формирование спектра надпороговой ионизации при различных соотношениях между интенсивностями спектральных компонент двухчастотного поля. В частности, обнаружено, что в случае соизмеримых интенсивностей обеих компонент в некотором интервале относительных фаз между ними основной вклад в формирование спектра надпороговой ионизации в области вблизи отсечки плато определяется траекториями с многократными возвращениями к атомному остову. Показано, что такая особенность приводит к возникновению провалообразных структур в фазовой зависимости спектра надпороговой ионизации, что может быть использовано для осуществления контроля над выходом электронов и шириной их энергетического спектра путем варьирования относительной фазы при прочих неизменных параметрах поля. Обнаружены и интерпретированы интерференционные особенности, возникающие в фазовой зависимости спектра надпороговой ионизации в случае доминирования компоненты поля с удвоенной частотой.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Переходя к оценке работы в целом, следует подчеркнуть, что автором получен ряд новых результатов, вносящих заметный вклад в теорию надпороговой ионизации. Наряду с рядом обнаруженных физических эффектов, интересных как с фундаментальной, так и, в ряде случаев, с практической точки зрения, следует отметить и важный аспект проделанной работы, связанный с верификацией количественной теории перерасеяния, получившей в последнее время широкое распространение как основа новых спектроскопических методов, использующих процессы перерасеяния электронов на родительских ионах. Проведенный в работе детальный анализ представляется очень важным для понимания границ применимости КТП. Следует подчеркнуть и тот важный аспект работы Д.В. Князевой, что полученные ей аналитические соотношения позволяют проводить расчеты спектров надпороговой ионизации в высокоэнергетической области для широкого диапазона параметров лазерного излучения. Эта возможность становится особенно важной в связи с созданием фемтосекундных лазерных источников среднего ИК диапазона, использование которых позволяет получать значительно более высокоэнергетичные электроны в процессе надпороговой ионизации. Объем требуемых вычислений при численном интегрировании уравнения Шредингера для описания данного процесса катастрофически растет с ростом длины волны лазерного излучения, что делает аналитические расчеты чрезвычайно востребованными. Результаты диссертации, несомненно, являются новыми, физически интересными и весьма перспективными в плане возможных приложений. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, представляются полностью обоснованными. Их

получение в значительной мере основано на использовании известных и апробированных методов, применяемых в квантовой механике, атомной и лазерной физике. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается их хорошим согласием с имеющимися экспериментальными данными, а также согласием между результатами аналитических и численных расчетов.

По работе имеются некоторые замечания.

1. В тексте диссертации имеются не вполне физически корректные утверждения. Так, на страницах 15-16 при описании трехшагового механизма формирования плато в спектре надпороговой ионизации утверждается, что электрон, туннелирующий из атомной системы в момент максимального значения электрического поля, после распространения в континууме возвращается к атомному остову в момент максимального значения векторного потенциала (формируя, в результате упругого рассеяния на атомном остове, высокоэнергетический пик в спектре НПИ). В действительности же анализ классических электронных траекторий показывает, что электрон, туннелирующий в момент максимального значения электрического поля, возвращается к атомному остову ровно через период поля, т.е. в момент нулевого значения векторного потенциала, что является фазой, крайне неблагоприятной для получения приращения поступательной энергии. В наиболее благоприятных условиях с этой точки зрения оказывается электрон, отрываемый примерно через 0.05 периода после максимума электрического поля; именно для такого электрона рассеяние назад дает максимальную энергию, определяющую высокоэнергетическую отсечку в спектре НПИ. Другой пример неточного утверждения встречается на страницах 21-22, где применимость электродипольного приближения обосновывается следующим образом: «Если полагать, что энергия фотона лазерного поля ... меньше или порядка энергии связи ... рассматриваемой атомной системы, то с хорошей точностью описание взаимодействия электрона с лазерным полем возможно в дипольном приближении». Можно привести много примеров, когда, в зависимости от интенсивности лазерного излучения, при выполнении указанного условия электродипольное приближение оказывается непригодным (см., напр., [N.J. Kylstra et al., J. Phys. B 34, L55 (2001)]) и, наоборот, когда невыполнение этого условия не приводит к несправедливости электродипольного приближения (см., напр., [N.J. Kylstra et al., Phys. Rev. Lett. 85, 1835 (2000)]).

2. Вызывает возражение то, каким образом повсюду в диссертации, в том числе в формулировке основных положений, диссертант использует термины «лазерные параметры» и «атомные параметры». Пример тому – четвертое выносимое на защиту положение: «Определение границ применимости факторизации выхода высокоэнергетических фотоэлектронов на лазерные и атомные параметры». Лазерными параметрами обычно принято называть амплитуду, частоту, длительность, эллиптичность поляризации и другие величины,

характеризующие лазерный импульс, а атомными параметрами – энергию ионизации, сродство к электрону, массу и размер атома, заряд ядра и другие величины, характеризующие атомную систему. То, что в диссертации называется «лазерными и атомными параметрами» – это вообще не параметры, а функции от импульса или энергии электрона; эти функции в одном случае зависят в основном только от параметров лазерного излучения, а в другом – от электронной структуры атомов. Произведение этих функций, согласно полученному в диссертации результату, и определяет выход фотоэлектрона с той или иной энергией или импульсом. Было бы более уместным называть эти функции не «параметрами», а «факторами», как это и делалось в опубликованных диссертантом статьях.

3. В тексте диссертации встречается ряд опечаток и мелких неточностей. Так, на странице 14 указывается, что в работах Файсала и Риса [43, 44] «оператор дипольного взаимодействия выбирался в калибровке *длины*», в то время как в действительности в указанных работах, в отличие от работы Келдыша, использовалась калибровка *скорости*. Под упоминаемым на странице 16 «закрытием *порогов* многофотонной ионизации» следует, видимо, понимать закрытие *каналов*. На странице 17 дважды упоминается «распад слабосвязанного *электрона*», в то время как речь, очевидно, идет о распаде слабосвязанного *состояния*. Есть и стилистические огрехи, такие как «... в *классических работах* Никишова и Ритуса, ... которые впоследствии стали *классическими работами* по нелинейной ионизации».

4. Встречаются и опечатки в формулах. Так, в формуле (1.32) скорость V_0 необходимо умножить на время t . В формуле (1.52) во второй строке перед квадратной скобкой пропущен знак суммирования по номеру гармоники n . В первом абзаце раздела 2.2.2, где обсуждаются условия реализации туннельного предела, характерная частота, с которой нужно сравнивать частоту лазерного поля, записана как отношение постоянной Планка к энергии связи; в действительности же нужно проводить сравнение с величиной, обратной указанной (эта же опечатка имеется и в статье [16] в Phys. Rev. A).

Отмеченные замечания не касаются принципиальных сторон проведенного в работе теоретического исследования и не снижают высокой оценки уровня проделанной диссертантом работы и значимости полученных результатов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, докладывались на представительных российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам в области, к которой относится данное исследование. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Работа полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, Д.В. Князева, несомненно заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент



Рябикин Михаил Юрьевич

17.11.2015

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИПФ РАН

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»
603950 Россия, г. Нижний Новгород. ГСП - 120, ул. Ульянова, 46
Тел.: 7(831)4164953; email: mike@ufp.appl.sci-nnov.ru

Подпись Рябикина Михаила Юрьевича заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН
кандидат физ.-мат. наук



И.В. Корюкин