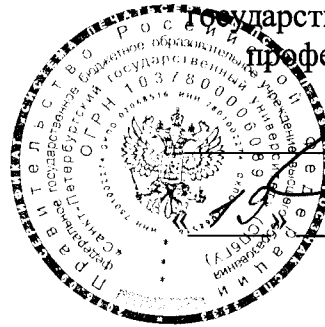


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
государственного университета  
профессор С. П. Туник



2015 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 теоретическому исследованию спектров электронов при надпороговом отрыве от отрицательных ионов и надпороговой ионизации атомов в сильном лазерном поле. Исследования нелинейных явлений в атомах и молекулах под действием коротких (фемтосекундных и субфемтосекундных) импульсов лазерного излучения находятся на переднем крае современной атомно-молекулярной физики и оптики, о чем свидетельствуют многочисленные публикации последних лет в наиболее престижных научных журналах, таких как Nature и Science. Помимо фундаментального научного интереса, эта область имеет большие практические перспективы, связанные с созданием компактных источников когерентного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, новых методов оптической и электронной спектроскопии, а также детектирования и визуализации сверхбыстрых процессов. Таким образом,

**актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений. Целью работы являлось построение аналитической модели для описания особенностей высокоэнергетической части спектра надпороговой ионизации коротким лазерным импульсом и двухчастотным лазерным полем в рамках метода эффективного радиуса и определение границ применимости приближения, когда вероятность ионизации может быть представлена в виде произведения факторов, отдельно зависящих от параметров атома и внешнего поля. Сочетание тематики исследования, формулировки его целей, используемых методов решения задач, области приложения результатов подтверждает, что данная диссертация **соответствует специальности 01.04.02 – теоретическая физика**, по которой она представлена к защите.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация Д. В. Князевой содержит 122 страницы текста, включая 19 рисунков, 5 таблиц и два приложения. Она состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 149 ссылок.

Во Введении формулируется цель диссертации, аргументируется ее актуальность, научная новизна и практическая значимость. Представлены выносимые на защиту научные положения, а также сведения о публикациях автора по теме диссертации и апробации работы. Обзор литературы содержит краткий, но достаточно полный анализ современного состояния рассматриваемой области исследования.

В главе 1 представлено описание используемых в работе различных теоретических методов, прежде всего формализма квазистационарных квазиэнергетических состояний и метода эффективного радиуса. Здесь излагается подход, позволяющий найти спектры электронов при надпороговой ионизации одиночным коротким лазерным импульсом на основе метода квазистационарных квазиэнергетических состояний, применяемого в случае периодического по времени внешнего поля. Для этого рассматривается бесконечная последовательность одинаковых лазерных

импульсов, следующих друг за другом через один и тот же интервал времени. Такое внешнее поле является периодическим, что дает возможность рассматривать квазиэнергетические состояния. Теория позволяет совершить предельный переход к бесконечному интервалу времени между импульсами и получить тем самым результаты для одиночного лазерного импульса.

Глава 2 посвящена детальному исследованию процесса надпороговой ионизации атомной системы под действием короткого лазерного импульса. Вначале в рамках метода эффективного радиуса получены основные выражения для амплитуды и вероятности надпорогового отрыва электрона, связанного с остовом короткодействующими силами, в произвольном периодическом внешнем поле. Произведен квазиклассический анализ полученных выражений, который показывает, что вероятность отрыва в единицу времени может быть представлена в виде суммы прямого и интерференционного вкладов. Прямой вклад, в свою очередь, дается суммой слагаемых, ассоциированных с замкнутыми классическими траекториями, обеспечивающими возврат электрона к атомному остову. Каждое такое слагаемое может быть выражено в виде произведения трех факторов, описывающих процессы отрыва электрона от остова, движения во внешнем поле и упругого рассеяния при возвращении к остову. Интерференционный вклад включает слагаемые, связанные с интерференцией амплитуд, соответствующих различным парам времен ионизации и возврата. Далее в главе 2 рассматривается предельный переход от выражения для надпорогового отрыва в периодическом поле к соответствующему выражению для короткого лазерного импульса, который можно выполнить аналитически. После этого обсуждается обобщение полученных аналитических результатов для вероятности надпорогового отрыва на случай надпороговой ионизации нейтральных атомов, когда потенциал взаимодействия с остовом имеет кулоновское дальное действие. В конце этой главы проводится сравнение аналитических результатов с результатами численного решения нестационарного уравнения Шредингера для модельных

атомов гелия и аргона, отмечается их хорошее согласие для высокоэнергетической области спектра электронов (для энергий, превышающих пять пондеромоторных потенциалов).

В главе 3 рассмотрена задача о надпороговой ионизации в сильном двухчастотном поле, состоящем из поля основной частоты и его второй гармоники, поляризованных в одном направлении. Проведено сравнение свойств классических замкнутых траекторий, дающих основной вклад в формирование высокоэнергетической части спектра надпороговой ионизации, для одночастотного и двухчастотного полей. Показано, что максимальная классическая энергия электрона в случае двухчастотного поля зависит от фазового сдвига между компонентами поля и может превышать соответствующую величину для монохроматического поля. Исследование спектров надпороговой ионизации для различных соотношений между интенсивностями компонент выявило наличие специфических структур, зависящих от фазового сдвига между компонентами, что указывает на возможность контроля процесса надпороговой ионизации с помощью этого параметра.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

**Научная новизна исследования.** Диссертационная работа Д. В. Князевой представляет собой цельное, обладающее новизной, исследование по направлению, широко изучаемому в мировом научном сообществе в последние годы. Новизна наиболее существенных результатов заключается в следующем: в рамках метода эффективного радиуса впервые получены замкнутые аналитические выражения для амплитуды и вероятности надпорогового отрыва электрона коротким лазерным импульсом; предложено феноменологическое обобщение результатов, первоначально полученных для короткодействующего потенциала атомного остова, на реальные атомные системы, где потенциал имеет кулоновское дальное действие; проанализированы основные особенности высокоэнергетической части

спектра электронов при надпороговой ионизации; для двухчастотного лазерного поля обнаружены и проанализированы специфические структуры в энергетическом спектре электронов в зависимости от фазового сдвига между первой и второй гармониками; на основе полученных аналитических соотношений найдены границы применимости приближения, в рамках которого вероятность ионизации представляется в виде произведения факторов, зависящих отдельно от параметров атома и лазерного поля.

**Практическая значимость работы.** Полученные в диссертации аналитические результаты дают возможность исследовать точность существующих теоретических методов. С их помощью можно качественно и количественно описать высокоэнергетическую часть спектра надпороговой ионизации в сильном низкочастотном лазерном поле. Результаты диссертации позволяют также предсказать новые эффекты, возникающие в спектрах надпороговой ионизации в двухчастотном лазерном поле.

**Достоверность результатов и научная обоснованность выводов,** представленных в диссертации, определяется применением апробированных теоретических подходов, а также согласием полученных аналитических результатов с результатами теоретических исследований других авторов и численных расчетов, выполненных в рамках самой диссертации. **Оформление диссертационной работы** не вызывает нареканий. Работа написана хорошим литературным языком, достаточно полно проиллюстрирована, материал работы изложен ясно и последовательно.

По диссертации имеются следующие **замечания:**

1. Приближение эффективного радиуса, определяемое уравнением (1.50), применимо для рассеяния частиц малой энергии короткодействующим потенциалом. В связи с этим возникает вопрос о правомерности использования метода эффективного радиуса для описания

высокоэнергетической части спектра электронов при надпороговом отрыве. В диссертации отмечена эта проблема и указано, что могут использоваться другие аппроксимации для фазы или амплитуды рассеяния. В последнем случае, однако, мы имеем некоторый феноменологический подход, который не следует называть методом эффективного радиуса. Заметим также, что параметры  $a_l$  и  $r_l$ , определяющие фазу рассеяния в формуле (1.50), при ненулевом угловом моменте не имеют размерности длины и простой интерпретации в качестве длины рассеяния и эффективного радиуса.

2. Метод эффективного радиуса, применяемый в диссертации, ограничен использованием значений углового момента 0 и 1. Возникает вопрос, насколько адекватен такой подход для перерассеяния электронов с достаточно большими энергиями (порядка нескольких атомных единиц), и нет ли необходимости в учете высших угловых моментов. Такой учет безусловно важен для перерассеяния в поле остова с дальнедействующим кулоновским хвостом, то есть для надпороговой ионизации нейтральных атомов. В этом случае, однако, задача решается чисто феноменологически, путем подстановки резерфордского сечения рассеяния (уравнение (2.56)).

3. Квазиклассический результат для амплитуды надпорогового отрыва (уравнения (2.33) и (2.37)) выражается через функцию Эйри. Это возможно при разложении фазы подынтегральной функции в уравнении (2.30) в ряд Тейлора в окрестности максимума энергии как функции времени возврата. Можно ожидать, что такое приближение должно быть более точным в высокоэнергетической области плато надпорогового отрыва, а по мере уменьшения энергии электрона его качество должно ухудшаться. Этот факт признается в диссертации на с. 58 при сравнении с результатами численного решения нестационарного уравнения Шредингера. При этом не совсем понятно, почему квазиклассический расчет при меньших энергиях не был произведен по обычному методу стационарной фазы, где вторая производная фазы отлична от нуля и интерференционные осцилляции в амплитуде обусловлены вкладами от двух точек стационарной фазы.

Перечисленные замечания не снижают высокой оценки выполненной работы и не ставят под сомнение достоверность и значимость полученных результатов и сделанных на их основе выводов. Результаты диссертации Д. В. Князевой нашли отражение в пяти публикациях, в том числе в двух статьях в таких авторитетных рецензируемых журналах из списка ВАК, как «Physical Review Letters» и «Physical Review A», а также были доложены на трех международных конференциях. Основные выводы работы полностью соответствуют ее целям и положениям, выносимым на защиту. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте общей физики РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Институте прикладной физики РАН, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Санкт-Петербургском государственном университете, Воронежском государственном университете, Московском физико-техническом институте (государственном университете) и других научных центрах.

Диссертация Д. В. Князевой «Аналитическая модель для описания надпороговой ионизации атомов в сильном лазерном поле» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., в части, касающейся диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Дарья Валентиновна Князева, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

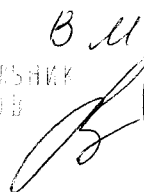
Отзыв подготовил профессор кафедры квантовой механики, доктор физико-математических наук Д. А. Тельнов. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры квантовой механики 16 октября 2015 г. (протокол № 6).

Заведующий кафедрой  
квантовой механики СПбГУ,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



В. М. Шабаев

ПОДПИСАТЕЛЬ  
ЗАВЕРЮЩИЙ  
ОТДЕЛ КАФЕДР  
Н. И. МАТВЕЕВА

В. М.  




Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7-9.

Тел. +7 (812) 328-20-00, эл. почта [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru), сайт <http://spbu.ru>

Кафедра квантовой механики СПбГУ, тел. +7 (812) 428-45-52, эл. почта  
[gmech@spbu.ru](mailto:gmech@spbu.ru), сайт <http://fock.phys.spbu.ru>