

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
государственного университета



С. В. Микушев

2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Мининой Анастасии Александровны  
«Адиабатическое приближение для процессов нелинейной ионизации и  
генерации высших гармоник в интенсивных лазерных полях»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.02 – теоретическая физика

Диссертация А. А. Мининой посвящена разработке и применению аналитической модели для описания процессов надпороговой ионизации и генерации гармоник в сильном низкочастотном лазерном поле. **Актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений и обусловлена следующими факторами. Исследования нелинейных явлений в атомах и молекулах под действием импульсов сильного лазерного излучения находятся на переднем крае современной атомно-молекулярной физики и оптики, о чем свидетельствуют многочисленные публикации последних лет в наиболее престижных научных журналах. 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. В основе практического использования индуцированных лазерным полем нелинейных процессов в атомах и молекулах лежит теоретическое исследование основных явлений, таких как надпороговая ионизация и генерация гармоник высокого порядка. Несмотря на значительный прогресс компьютерной техники и вычислительных методов в последние годы, роль аналитических моделей в исследовании этих явлений не ослабевает. Целью работы являлось построение учитывающей эффекты атомной структуры аналитической модели для описания процесса генерации гармоник высокого порядка в сильном низкочастотном лазерном поле с произвольной зависимостью от времени и её применение к задаче о генерации гармоник в импульсном бициркулярном лазерном поле. Для достижения поставленной цели в работе с применением апробированных методов теоретической и математической физики был решён ряд конкретных задач, включая задачи об обобщении метода эффективного радиуса на случай лазерного поля с произвольной пространственной и временной формой, о вычислении амплитуды генерации гармоник в поле с произвольной огибающей, о кулоновских факторах в амплитудах ионизации и генерации гармоник и некоторые другие. 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 А. А. Мининой содержит 130 страниц, включая 21 рисунок и одну таблицу. Она состоит из Введения, обзора литературы, четырёх глав, Заключения и списка литературы, включающего 172 ссылки.

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

В главе 1 представлено описание метода эффективного радиуса для нестационарных задач, который в рамках формализма квазистационарных квазиэнергетических состояний позволяет получать аналитические приближения для комплексной квазиэнергии. Здесь же излагается подход, позволяющий найти наведённый дипольный момент квантовой системы без явного использования волновых функций. Этот подход основан на теореме Гельмана — Фейнмана; коэффициенты разложения зависящего от времени дипольного момента в ряд Фурье при этом выражаются через производную квазиэнергии по амплитуде пробного поля с соответствующей частотой.

В главе 2 адиабатическое приближение применяется для вычисления амплитуды фотоотрыва. В случае потенциала взаимодействия с кулоновским хвостом найдено аналитическое приближение для кулоновского фактора парциальной амплитуды фотоотрыва в сильном низкочастотном лазерном поле. При аналитических вычислениях используются методы теории функций комплексной переменной.

В главе 3 представлено адиабатическое приближение в задаче о генерации гармоник высокого порядка. Амплитуда генерации гармоник выражается в виде суммы парциальных амплитуд, каждая из которых ассоциирована с классическими замкнутыми траекториями.

В главе 4 адиабатическое приближение применяется для описания генерации гармоник высокого порядка в бициркулярном лазерном поле. Анализируются особенности спектров гармоник и их трансформация при изменении временной задержки между двумя компонентами импульсного

бициркулярного поля, несущие частоты которых отличаются в два раза. Предложен механизм контроля степени циркулярной поляризации гармоник посредством изменения этой временной задержки. Аналитические результаты сравниваются с численными расчётами на основе нестационарного уравнения Шредингера.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

**Научная новизна исследования.** Диссертационная работа А. А. Мининой 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 аналитической модели взаимодействия атомной системы с лазерным излучением, основанной на формализме квазистационарных квазиэнергетических состояний и методе эффективного радиуса, впервые предложено обобщение на случай лазерного импульса с произвольной временной огибающей; в рамках адиабатического приближения разработан теоретический подход для вычисления кулоновских факторов в амплитудах фотоотрыва и амплитудах генерации гармоник высокого порядка; разработана обобщённая модель генерации гармоник нейтральными атомами с валентным  $s$ -электроном в сильном низкочастотном поле; предложены новые механизмы управления поляризационными свойствами и интенсивностью гармоник при генерации в импульсном бициркулярном поле.

**Научная и практическая значимость работы.** Разработанная аналитическая модель генерации гармоник в сильном низкочастотном поле с произвольной временной структурой является существенным вкладом в теорию взаимодействия лазерного излучения с веществом. Полученные в диссертации аналитические результаты позволяют предсказать ряд новых

эффектов в процессе генерации гармоник высокого порядка, которые могут иметь практическое применение. В частности, изменение амплитуды и поляризации гармоник при изменении временной задержки между компонентами бициркулярного может быть использовано для генерации коротких импульсов с циркулярной и эллиптической поляризацией. Это напрямую связано с возможностью создания компактных источников интенсивного когерентного излучения высокой частоты и аттосекундных импульсов, которые могут найти применение в визуализации и спектроскопии сверхбыстрых процессов.

**Достоверность** результатов и **научная обоснованность** выводов, представленных в диссертации, подтверждается применением апробированных теоретических подходов, известных методов высшей математики и математической физики, а также сравнением полученных аналитических результатов с результатами других теоретических методов и численными расчётами. **Оформление диссертационной работы** в целом не вызывает нареканий. Работа хорошо структурирована, достаточно полно проиллюстрирована, материал работы изложен ясно и последовательно.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Обзор литературы был бы более полным, если бы автор упомянула цикл работ В. Н. Островского и Д. А. Тельнова по адиабатической теории многофотонной ионизации [V. N. Ostrovsky and D. A. Telnov, J. Phys. B **20**, 2397 (1987); J. Phys. B **20**, 2421 (1987); D. A. Telnov, J. Phys. B **24**, 2967 (1991)]. Предложенный в этих работах подход основан на малости частоты внешнего поля (квазистатический режим), что имеет непосредственное отношение к теме диссертации А. А. Мининой.
2. Название главы 1 содержит упоминание двухуровневой системы. О наличии двух связанных состояний также говорится в разделе 1.3, где

подводятся итоги этой главы. Найти какое-либо обсуждение специфики двухуровневой системы в других разделах этой главы не удаётся.

3. В связи с методом эффективного радиуса, который описывается в главе 1, возникает вопрос, насколько обоснованно ограничение только двумя угловыми моментами (0 и 1) для процессов нелинейной ионизации и генерации гармоник. При этих процессах оптический электрон может приобретать достаточно большие энергии (порядка нескольких атомных единиц), что ведёт к необходимости учёта высших угловых моментов при перерассеянии. Обсуждение этого вопроса в диссертации отсутствует.

4. Анализ зависимости выхода гармоник от временной задержки между компонентами бициркулярного лазерного поля в главе 4 выявил, что наиболее эффективно процесс генерации гармоник происходит при ненулевом и достаточно большом значении этой задержки, порядка 1.5 периодов основной частоты (рис. 4.6 на с. 89), при том, что длительность самих компонент составляет 3 и 2 периода соответственно. Этот результат противоречит интуиции, так как генерация высших гармоник отдельными импульсами циркулярно-поляризованного излучения невозможна, и только существенное перекрывание во времени и пространстве двух импульсов с противоположным направлением вращения векторов поляризации открывает такую возможность. Представляется, что данный результат требует более тщательного анализа, чем тот, что содержится в диссертации. Следует отметить, что независимый численный расчёт [J. Heslar et al., Phys. Rev. A **99**, 023419 (2019)] даёт максимум выхода гармоник в области энергий фотона от 1 а.е. до 2.3 а.е. как раз при нулевой временной задержке.

5. Хотя стиль изложения материала в диссертации в целом не вызывает нареканий, излишняя краткость в ряде случаев может затруднить понимание. Так, на с. 22 приводится уравнение (1.1) с граничными условиями для волновой функции «на малых расстояниях». Формула содержит члены, которые расходятся при  $r \rightarrow 0$ ; их присутствие в волновой функции в этом

пределе недопустимо, поэтому необходимо уточнить понятие «малых расстояний». Имеются в диссертации и неудачные выражения, например, «борноподобный ряд» (с. 16) или «удовлетворим волновую функцию» (с. 24).

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 А. А. Мининой опубликованы в четырёх научных статьях, причём три из них напечатаны в таких авторитетных рецензируемых журналах из списка ВАК, как «Physical Review Letters» и «Physical Review A». Результаты диссертации были также доложены на трёх международных и российских конференциях. 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.

**Заключение по работе.** Диссертация А. А. Мининой «Адиабатическое приближение для процессов нелинейной ионизации и генерации высших гармоник в интенсивных лазерных полях» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 74 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), в части, касающейся диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук. Основные выводы работы полностью

соответствуют её целям и положениям, выносимым на защиту. Указанные в диссертации публикации автора по теме исследования соответствуют содержанию диссертационной работы. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты. Автор диссертационной работы Анастасия Александровна Минина заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв подготовил профессор кафедры квантовой механики, доктор физико-математических наук (01.04.02 — теоретическая физика) Д. А. Тельнов. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры квантовой механики 18 июня 2019 г. (протокол № 17).

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



В. М. Шабаев

