

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию А.А. Мининой

«Адиабатическое приближение для процессов нелинейной ионизации и генерации высших гармоник в интенсивных лазерных полях»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Диссертационная работа А.А. Мининой посвящена теоретическому исследованию процессов надпороговой ионизации атомов и излучения ими высших гармоник в интенсивном лазерном поле. Исследования по этой тематике в настоящее время сохраняют свою актуальность, несмотря на то, что сами эффекты нелинейной ионизации и излучения гармоник активно изучаются экспериментально и теоретически уже около 40 лет. Причина неослабевающего интереса к высшим гармоникам лазерного излучения заключается, в первую очередь, в возможности их использования как источника когерентных, достаточно мощных и очень коротких импульсов в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах длин волн. В последние два десятилетия быстро развивается область исследований, известная как аттосекундная физика и основанная на использовании в эксперименте импульсов электромагнитного излучения длительностью менее одной фемтосекунды. Такие импульсы, как правило, получают путем когерентного сложения нескольких высоких гармоник и используют для исследования широкого круга эффектов взаимодействия лазерного излучения с веществом с субфемтосекундным временным разрешением. Термины «аттосекундная спектроскопия» и «аттосекундная метрология» в настоящее время являются устоявшимися понятиями, хорошо известными каждому, кто работает в области взаимодействия интенсивного лазерного излучения с атомами, молекулами, аморфными телами и кристаллами.

Получение аттосекундных импульсов электромагнитного излучения и контроль их характеристик, включая поляризацию, фазовые свойства и временной профиль,

требует детального понимания физики процесса генерации высших гармоник и умения рассчитывать их свойства с высокой количественной точностью. Хотя теория нелинейных явлений в атомах под воздействием мощного лазерного излучения в настоящее время хорошо разработана, применение все более сложных экспериментальных схем, в том числе с использованием лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона длин волн, бихроматических (то есть, состоящих из двух компонент с сильно отличающимися несущими частотами) импульсов и полей с произвольной поляризацией, требует соответствующих доработки и расширения теоретического аппарата, что далеко не всегда является тривиальной задачей. Представленные в диссертационной работе исследования заполняют именно такую нишу в существующей на данный момент теории: в них получены новые аналитические формулы, позволяющие количественно описать процессы нелинейной ионизации в сильных лазерных импульсах среднего инфракрасного диапазона длин волн и развита теория генерации высших гармоник в поле инфракрасного лазерного излучения, состоящего из двух частотных компонент, поляризованных по кругу в противоположных направлениях (бициркулярные импульсы). За последние десять лет в ведущих мировых лазерных центрах выполнены многочисленные эксперименты как по ионизации атомов и молекул импульсами среднего инфракрасного диапазона, так и по генерации высоких гармоник в бициркулярных лазерных полях. Поэтому тема исследования безусловно является актуальной, а полученные результаты должны иметь широкое поле для применения.

Цель диссертационной работы А.А. Мининой состоит в развитии аналитической модельной теории, описывающей процесс генерации высших гармоник (а) с учетом эффектов атомной структуры и (б) под воздействием бициркулярного лазерного излучения с большой длиной волны. Поскольку эффект нелинейной ионизации является составной частью процесса генерации гармоник, для достижения поставленной цели необходимо было получить удобные аналитические формулы, описывающие амплитуду нелинейной ионизации в таких лазерных полях. В работе были поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Модель фотоионизации атома, описываемого в приближении эффективного радиуса с двумя связанными состояниями, была обобщена на случай интенсивного лазерного импульса произвольной формы. В рамках такой модели были получены уравнения, определяющие значение квазиэнергии.
2. В адиабатическом пределе получены аналитические выражения для кулоновских факторов, входящих в выражения для амплитуды нелинейной ионизации и для дипольного момента, определяющего спектр высших гармоник в интенсивном лазерном поле.
3. Модельные выражения, полученные пп.1 и 2, обобщены на случай реальных атомных систем. Корректность и количественная точность такого обобщения протестированы путем сравнения аналитических результатов с численным решением нестационарного уравнения Шрёдингера.
4. С использованием развитых аналитических подходов рассчитаны спектры и поляризация высших гармоник, излучаемых в бициркулярном лазерном поле и исследована зависимость их характеристик от величины временной задержки между двумя частотными компонентами импульса.

Диссертация А.А. Мининой состоит из введения, обзора литературы, четырех основных глав, заключения и списка литературы, содержащего 172 наименования. Общий объем диссертации составляет 130 стр.

**Во введении** сформулирована цель диссертационной работы, обоснована актуальность исследования, приведены положения, выносимые на защиту. Перечислены полученные результаты, дано обоснование их достоверности, практической значимости и научной новизны. Указано, в чем заключается личный вклад соискателя в их получение. Приведен список публикаций по теме диссертации.

**В обзоре литературы** кратко описаны основные теоретические методы расчета спектра и поляризации высших гармоник, излучаемых атомами в поле интенсивной лазерной волны. Конспективно изложены результаты, полученные ранее другими авторами и непосредственно относящиеся к теме диссертации. Приведена подробная библиография и дан обзор экспериментальных данных по генерации высших гармоник в бициркулярных лазерных полях.

**Первая глава** диссертации посвящена развитию метода эффективного радиуса для двухуровневой системы, моделирующей атом в условиях, когда при его взаимодействии с интенсивным лазерным излучением существенную роль играет не только внешняя орбиталь, заселенная электронами, но и возбужденные состояния. Получено уравнение для комплексной квазиэнергии в лазерном поле с произвольной огибающей. В низкочастотном пределе получено общее выражение для амплитуды излучения высших гармоник в бициркулярном лазерном поле.

**Во второй главе** вычислены кулоновские факторы в амплитуде фотоионизации низкочастотным полем с произвольной поляризацией и получены явные аналитические формулы, описывающие зависимость этих факторов от импульса фотоэлектрона. Выполнен топологический анализ положения точек ветвления кулоновской потенциальной энергии электрон-ионного взаимодействия как функции комплексного времени и указан алгоритм выбора контура интегрирования, используемого при вычислении кулоновских факторов методом мнимого времени. Проведено сравнение экспериментально измеренных спектров фотоэлектронов в сильном низкочастотном линейно поляризованном лазерном поле с результатами расчетов и показано, что учет кулоновских факторов улучшает согласие теории с экспериментом.

**Третья глава** посвящена развитию адиабатического приближения в теории генерации высших гармоник. Общие выражения для спектра дипольного момента и других величин, описывающих излучение гармоник, полученные в первой главе, здесь упрощаются в пределе низких частот, то есть при малых значениях параметра Келдыша. Найдены простые аналитические выражения, определяющие спектр гармоник. Полученный результат интерпретирован на языке «квантовых орбит», то есть классических траекторий, подчиняющихся уравнениям Ньютона и распространяющихся в комплексном времени. Приводится подробный анализ поведения спектра в области каустик, где две квантовые орбиты, отвечающие одной и той же гармонике, сливаются в одну. С использованием результатов, полученных в главе 2, вычислен кулоновский фактор в спектре гармоник. В случае бициркулярного лазерного поля исследована зависимость кулоновского фактора от энергии гармоники.

**Четвертая глава** диссертации является ключевой. В ней с использованием техник, развитых в предыдущих главах, исследован эффект генерации высших гармоник бициркулярным лазерным полем. Подробно рассмотрен важный случай монохроматических импульсов. Исследована эволюция спектров и поляризации гармоник, возникающая при изменении временной задержки между компонентами бициркулярного импульса. Проанализированы нетривиальные двумерные замкнутые квантовые орбиты, вносящие основной вклад в амплитуду излучения гармоник. Сформулирована элегантная модель двух диполей, качественно объясняющая свойства спектров излучения в случае небольшой величины задержки между двумя импульсами. Полученные результаты в целом демонстрируют очень хорошее согласие с численным решением нестационарного уравнения Шрёдингера.

**В заключении** подытожены полученные в диссертационной работе результаты. Все они являются новыми. Их практическая значимость определяется возможностью использования для анализа современных экспериментальных результатов и планирования новых экспериментов по генерации высших гармоник в бициркулярных лазерных полях. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с данными численных расчетов и – в тех случаях, когда это возможно – также с экспериментальными данными. Развитый теоретический аппарат основан на известных и широко апробированных в физике сильных лазерных полей концепциях и методах, что позволяет считать результаты, полученные в работе, надежно обоснованными.

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

1. Уравнения (1.7a) и (1.7b), определяющие величину комплексной квазиэнергии двухуровневого атома, в адиабатическом приближении существенно упрощаются, переходя в (1.8a) и (1.8b) соответственно. Этот результат получен при условии отсутствия резонанса между уровнями. Можно ли получить аналогичные упрощенные выражения для коэффициентов  $f_n$  в случае, одно- или многофотонного резонанса? Такой

результат был бы особенно интересен, учитывая, что именно в резонансном случае приближение двухуровневого атома обретает физический смысл.

2. Представленные на Рис.2.4 сравнения спектров фотоэлектронов, рассчитанных с учетом кулоновского фактора, с экспериментальными данными, показывает, что учет кулоновского взаимодействия действительно улучшает согласие теории и эксперимента, однако использованная на рисунке форма представления результата не позволяет понять, насколько значительно это улучшение. Следовало бы показать графики в более узком интервале импульсов или энергий (скажем,  $p=1.0...1.5$  а.е. на рис. (а) и  $p^2/2=0.5...1.2$  а.е. на рис. (b)) и, соответственно, в большем масштабе, чтобы представленные на них три кривые были ясно различимы по отдельности и давали бы возможность выполнить количественное сравнение. Для нескольких выделенных значений импульсов и энергий такое сравнение представлено в Таблице 1. Возникает также вопрос: при каких параметрах поля и атома кулоновский фактор будет значительно менять угол наклона спектра, или же эффект всегда будет оставаться примерно таким, как показано на рисунке?
3. Результаты расчетов, представленных в Главе 4, показывают, что в бициркулярном поле отсутствует плато гармоник, а спектр спадает степенным образом. В этом случае, гармоники, начиная с какого-то номера, перестанут быть экспериментально наблюдаемыми из-за своей слишком малой интенсивности. Поучительно было бы сравнить спектры в бициркулярном поле со спектрами, которые получались бы в линейно поляризованном поле при тех же условиях. Насколько больше (если больше) будет при этом энергия, излученная в виде гармоник в случае линейно поляризованного поля?
4. Показанные на Рис.4.13 спектры гармоник демонстрируют ярко выраженное плато с резкой отсечкой для случаев  $T_d=2T$  и  $T_d=-2T$ . Что является физической причиной появления отсечки, полностью отсутствующей при других значениях сдвига?

Сформулированные выше замечания не снижают общей высокой оценки представленной работы.

Диссертационная работа А.А. Мининой представляет собой законченное исследование, результаты которого вносят существенный вклад в развитие теории нелинейной ионизации атомов и генерации высших гармоник в сильном двухчастотном лазерном поле с произвольной поляризацией. Основные результаты диссертации представлены на нескольких международных конференциях и опубликованы в виде 4 печатных работ в изданиях из перечня ВАК РФ, включая такие ведущие физические журналы, как Physical Review Letters и Physical Review A. 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 развитие приближенных методов расчета вероятностей нелинейной ионизации атомов и спектров высших гармоник лазерного излучения в адиабатическом приближении и применение этих методов для исследования эффекта генерации высших гармоник бициркулярным лазерным полем А.А. Минина заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент  
доктор физ.-мат. наук, профессор

19 августа 2019г.

Гореславский Сергей Павлович,  
профессор кафедры теоретической ядерной физики,  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Москва, 115409, Каширское шоссе 31  
тел. +74957885699(9376)  
email: sgoreslavski@mtu-net.ru

С.П. Гореславский



ЗАВЕРЯЮ  
ПОДПИСЬ  
ДИРЕКТОРА ПО  
ПЕРСОНАЛУ  
ЦЫСАНОВ ВГ



Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ  
А.А. Абатурова