

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Киселева Максима Дмитриевича «Моделирование нелинейных и сверхбыстрых ионизационных процессов в атомах в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа М.Д. Киселева и публикации, на которых она основана, появились в крайне подходящее время. Именно сейчас один за другим вводятся в эксплуатацию линии рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ), в том числе предназначенные для экспериментов с атомарными мишенями: на EuXFEL (Германия), на FERMI (Италия), на SACLA (Япония), на LCLS (США), на SwissFEL (Швейцария), на PAL (Республика Корея), на SXFEL (Китай). Параллельно идёт постоянный прогресс в технике генераторов высоких гармоник, длительность импульсов которых сокращена до десятков аттосекунд. Излучение РЛСЭ обладает уникальной комбинацией свойств, вследствие чего его взаимодействие с веществом обладает яркой спецификой. Например, высокая интенсивность позволила впервые наблюдать повторную фотоионизацию глубокой электронной оболочки иона в условиях конкуренции с оже-распадом первичной вакансии. Новые явления, наблюдение которых стало доступным для экспериментального изучения, дают простор для развития новых теоретических подходов и требуют их разработки.

Диссертационная работа М.Д. Киселева посвящена теоретическому моделированию процессов, происходящих в полях высокоинтенсивного излучения в областях экстремального ультрафиолета и мягкого рентгена. Актуальность выбранной тематики диссертации в первую очередь обусловлена фундаментальным интересом к вопросам, связанным с динамикой образования и распада экзотических конфигураций атомов и ионов в данной области энергий. Прикладной аспект диссертации обусловлен острой необходимостью в результатах высококачественного моделирования для планирования будущих экспериментов, а также интерпретации уже имеющихся и непрерывно появляющихся новых данных. Так, например, к М.Д. Киселеву обратились с просьбой об интерпретации сложных фотоэлектронных спектров криптона, измеренных с угловым разрешением, международной группой экспериментаторов, работающих на синхротронном источнике MAX IV (г. Лунд, Швеция). Эта просьба была с успехом удовлетворена, а результаты удостоены приглашённого доклада на 33rd MAX IV User Meeting (2021) и вошли в одну из глав диссертационного исследования.

Показательно также, что первые расчёты по образованию двойных вакансий в К-оболочке в ионе неона, описанные в оригинальных разделах диссертации М.Д. Киселева, совпали по времени с первыми экспериментами по соответствующей тематике, проведёнными на только введённом тогда в эксплуатацию EuXFEL. При этом со стороны теории не было уверенности, что R-матричный подход, подразумевающий разбиение конфигурационного пространства на внутреннюю (область реакции) и внешнюю (асимптотическую) области, будет хорошо работать для описания процессов в многоэлектронных атомах, когда в реакцию вовлечены одновременно электроны глубоких и валентных оболочек, как это происходит в резонансном оже-эффекте: $\hbar\omega + \text{Ne}^+(1s^1 2s^2 2p^6) \rightarrow \text{Ne}^{*+}(1s^0 2s^2 2p^6 np) \rightarrow \text{Ne}^{2+} + e^-$. Опыт подобных расчётов практически отсутствовал. Однако, серия работ М.Д. Киселева по неону показала отличное согласие между теоретическим прогнозом и экспериментальными данными, что позволяет теперь с уверенностью применять R-матричный метод к подобным процессам.

Кроме того, Киселев М.Д. провёл серию расчётов процессов фотоионизации криптона и, в частности, показал, что учёт промежуточных автоионизационных состояний ти-

па $4s^2 4p^4(^1D)ns/nd$ важен при описании угловых распределений фотоэлектронов, образующихся в процессе двухфотонной двойной ионизации (2PDI). Предсказанный результат был с успехом подтверждён экспериментом, проведённым на ЛСЭ FLASH (Германия).

Важным научным результатом является разработанный Киселевым М.Д. формализм для расчёта угловых распределений фотоэлектронов (УРФ), образованных под действием закрученного бесселева излучения. Им доказано оригинальное утверждение (теорема), позволяющее получать новые выражения из хорошо известных УРФ в случае ионизации плоской волной путём введения дополнительных геометрических факторов, зависящих от параметров бесселева пучка. Этот результат, в частности, позволил предложить методику диагностики бесселевых пучков.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре общей ядерной физики физического факультета МГУ. В течение всего периода работы над диссертацией М.Д. Киселев проявил себя инициативным, аккуратным, вдумчивым и работоспособным сотрудником научного коллектива. Он неоднократно работал совместно с экспериментальными группами, помогая в планировании экспериментов и делая теоретические прогнозы, что требовало от него высокой ответственности и дисциплины. В ходе выполнения диссертационной работы М.Д. Киселев продемонстрировал высокую квалификацию физика-теоретика, способного самостоятельно решать фундаментальные задачи в области теоретической атомной физики, а также владеющего методами квантовой теории углового момента, методами расчёта атомной структуры, методом R-матрицы и численного моделирования различных наблюдаемых величин.

Полученные в диссертации результаты обладают всеми признаками научной новизны. Высокое качество работ Киселева М.Д. подтверждается присуждением ему стипендий им. М.И. Панасюка (2020, 2021, 2022, 2023), стипендии Президента РФ (2021), стипендии им. академика А.Д. Сахарова (2023), а также победой в конкурсе по программе развития МГУ в номинации «Выдающиеся научные статьи» (2023). М.Д. Киселев в настоящий момент является уникальным специалистом по использованию R-матричного метода с B-сплайнами в задаче атомной фотоионизации. Эта компетенция является стратегически важной для физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. В процессе написания диссертации М.Д. Киселев внёс важнейший вклад в выполнение задач в рамках 5 проектов, поддержанных грантами: РФФИ, РНФ, Министерства Науки и высшего образования РФ, Фонда развития теоретической физики и математики «Базис». Киселев М.Д. неоднократно выступал с докладами и презентациями на российских и международных научных конференциях, а также семинарах экспериментальных и теоретических групп. Результаты его работы опубликованы в ведущих научных журналах, в том числе из Q1, таких как: *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* (3 статьи), *Physical Review X* (1 статья). Результаты Киселева М.Д., без сомнений, являются ценным вкладом автора в понимание динамики образования и распада экзотических конфигураций атомов и ионов с кратными глубокими вакансиями под действием высокоинтенсивного излучения, в том числе сверхкороткой длительности. Разработанная Киселевым М.Д. теория взаимодействия закрученного бесселева излучения с многоэлектронными атомами открывает широкие возможности для дальнейших теоретических исследований, например, обобщения на случай фотопроцессов с молекулами и планирования экспериментов нового поколения. Личный вклад автора является определяющим в получении всех теоретических результатов (рабочие формулы, численное моделирование, анализ и интерпретация результатов) и в построении моделей, их описывающих. Диссертация оформлена надлежащим образом, автореферат полностью отражает её содержание. Квалификация М.Д. Киселева, безусловно, соответствует степени кандидата физико-математических наук.

Считаю, что диссертационная работа Киселева М.Д. «Моделирование нелинейных и сверхбыстрых ионизационных процессов в атомах в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне» выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченное научное исследование, полностью соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Рекомендую диссертационную работу «Моделирование нелинейных и сверхбыстрых ионизационных процессов в атомах в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне» Киселева Максима Дмитриевича к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Научный руководитель:
ведущий научный сотрудник
отдела электромагнитных процессов
и взаимодействия атомных ядер
Научно-исследовательского института
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук

А.Н. Грум-Гржимайло

Дата составления отзыва: 8 февраля 2024 года

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
Телефон: +7 (495) 939-47-76
E-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись Грум-Гржимайло Алексея Николаевича УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета
НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ имени М.В. Ломоносова,
кандидат физико-математических наук

Е.А. Сигаева