

УТВЕРЖДАЮ

Главный ученый секретарь
НИИ «Курчатовский институт»
И.И. БРЕМИН

« 06 » 12 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации
на диссертационную работу Вильшанской Евгении Владимировны
«Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Представленная на отзыв диссертация Вильшанской Е.В. является примером фундаментальных исследований в области физики неидеальной низкотемпературной плазмы, нацеленных на создание ультрахолодной плазмы и диагностику ее свойств.

Актуальность темы.

Основной целью диссертационной работы было экспериментальное исследование свойств ультрахолодной неидеальной плазмы кальция-40 в стационарном режиме, полученной надпороговой ионизацией атомов, охлажденных в магнитооптической ловушке. Хотя основной предмет работы является довольно узким, специфическим сектором на общем поле физики плазмы, имеется целый ряд аспектов работы, которые далеко выходят за рамки ультрахолодной плазмы. Во-первых, процесс создания такой плазмы с помощью ионизации лазерным излучением является актуальной задачей атомной физики в части создания высоковозбужденных атомных систем,

ридберговских состояний и анализа их устойчивости. Уместно вспомнить, что сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», профессор Э.А. Маныкин предложил идею ридберговской материи, являющейся конденсированным состоянием ансамбля ридберговских атомов и представляющей практический интерес как возможная форма долгоживущих плазменно-газовых сред. Во-вторых, другой сотрудник нашего Центра, академик РАН Ю.М. Каган с коллегами активно изучал квантовые свойства газовых и конденсированных сред при очень низких температурах. И наконец, излучение ионов в ридберговских состояниях широко используется в диагностике термоядерной плазмы с помощью рекомбинационно-перезарядочной спектроскопии (Charge-eXchange Recombination Spectroscopy, CXRS). Диссертацию Е.В. Вильшанской является работой на указанных тематических полях.

Анализ содержания диссертации

Диссертация Е.В. Вильшанской состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 108 страниц текста с 35 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 82 наименования.

Во Введении Е.В. Вильшанская обосновывает актуальность диссертационной работы, формулирует её цели и задачи, кратко излагает полученные результаты.

Первая глава «Лазерное охлаждение атомов кальция-40» посвящена описанию экспериментальной установки по лазерному охлаждению атомов кальция-40, захваченных в магнитооптическую ловушку (МОЛ). Эта установка создана в рамках диссертационной работы и является первой установкой такого типа в России. В работе подробно описан весь цикл, проходимый атомами кальция – от формирования коллимированного атомного пучка на выходе из горячей (~500°C) печки до многоступенчатого лазерного охлаждения медленных атомов до сверхнизких температур в МОЛ.

Сначала в этой главе приведен краткий обзор основных принципов лазерного охлаждения и пленения атомов в МОЛ. Далее приведено подробное описание конструкции зеемановского замедлителя и собранной вакуумной системы, описаны методы стабилизации частоты лазерных источников, показана возможность захвата в МОЛ порядка 10^7 атомов при их плотности порядка 10^9 см⁻³. Далее исследованы основные характеристики захваченного в МОЛ облака охлажденных атомов. Оказалось, что температура захваченных атомов, определенная методом баллистического разлета облака атомов кальция в пустоту, составила величину в диапазоне 4 – 10 мК.

Вторая глава «Реализация высоковозбужденных состояний атомов кальция-40» посвящена описанию проведенных экспериментов по возбуждению атомов кальция в ридберговские состояния с большим значением главного квантового числа. Сначала описана схема регистрации ридберговских переходов в атоме кальция с энергетического уровня $4s4p\ ^1P_1$ в высоколежащие состояния $n\ ^1S_0$ для главного квантового числа n от 40 до 120 с помощью резонансной флуоресценции атомов в МОЛ. Измерения энергии этих переходов позволили найти потенциал ионизации атома ^{40}Ca , равный $49305,91966(4)$ см⁻¹, что в настоящий момент, как утверждается, является наиболее точным значением и позволяет более точно отстраивать частоту ионизирующего лазерного излучения выше порога ионизации для получения неидеальной ультрахолодной плазмы ^{40}Ca и таким образом контролировать начальную температуру электронов в создаваемой плазме. Другим важным результатом этой главы является то, что измерение температуры облака атомов ^{40}Ca с помощью метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии в непрерывно работающей МОЛ по спектральным ширинам ридберговских переходов показало значения температуры порядка 5 мК, которые близки к описанным в главе 1 результатам измерения с помощью баллистического разлета атомов в пустоту.

Третья глава «Ультрахолодная плазма кальция-40» посвящена описанию методики получения и регистрации ультрахолодной стационарной плазмы кальция-40. Основные параметры созданной плазмы следующие: плотность ионов вплоть до $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$, их температура 0,05 К, параметр неидеальности ~ 2 . Отметим такие достоинства разработанной экспериментальной методики по сравнению с существующими: (а) ультрахолодная плазма создается и поддерживается в стационарном режиме, что позволяет проводить исследования, недоступные для плазмы, создаваемой при помощи лазерных импульсов наносекундной длительности; (б) возможность точно регулировать начальную температуру электронов путем отстройки длины волны ионизирующего лазера выше потенциала ионизации в больших пределах от 0,05 до 100 К; (в) высокая чувствительность метода детектирования разреженной ультрахолодной плазмы на основе автоионизационных резонансов ридберговских атомов ^{40}Ca в непрерывно работающей МОЛ (а именно, детектирование плазмы с очень низкой плотностью, $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, что примерно соответствует напряженности плазменного электрического микрополя $\sim 10^{-2} \text{ В/м}$). В Заключение Е.В. Вильшанская приводит основные результаты диссертационной работы.

Оценка новизны исследования

Отметим следующие три результата диссертационной работы, которые являются принципиально новыми.

1. Создание установки по лазерному охлаждению атомов кальция-40 с непрерывным режимом работы фотоионизирующих лазеров, что дало возможность создавать, поддерживать и диагностировать ультрахолодную неидеальную плазму в стационарном режиме с плотностью вплоть до 10^6 см^{-3} благодаря надпороговой ионизации атомов кальция-40, охлажденных в МОЛ.

2. Измерение энергии ридберговских переходов в $n \ ^1S_0$ -состояния атомов ^{40}Ca для $n = 40 - 120$, проведенное методом двухфотонной

спектроскопии, и достижение рекордной точности измерения потенциала ионизации, равного $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$.

3. Новый метод диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция-40, позволяющий детектировать плазму с низкой плотностью ионов $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, что соответствует значению напряженности плазменного электрического микрополя $\sim 10^{-2} \text{ В/м}$.

Оценка практической значимости результатов диссертационной работы

Практическая значимость работы непосредственно связана с указанной выше новизной полученных результатов.

1. Разработанная экспериментальная установка является уникальной, но при этом имеет ресурс (при ее некоторой модификации) использования для таких направлений исследований как метрология и квантовая информатика.

2. Достижение рекордной точности измерения потенциала ионизации представляет интерес для баз атомных данных в аспекте энергии ридберговских переходов атомов кальция-40.

3. Новый метод лазерной спектроскопической диагностики на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов можно использовать для диагностики различных сред типа ридберговской материи в широком диапазоне степени конденсированности такой среды.

Результаты работы могут быть применены в различных организациях при исследовании сред с высоковозбужденными атомами и ионами, включая Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт спектроскопии РАН, Объединенный Институт высоких температур РАН, Российский научный центр «Курчатовский институт».

Оценка достоверности и обоснованности научных положений, результатов и выводов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием различных методов измерения основных параметров, например, метода баллистического разлета атомов в пустоту и метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии для оценки температуры атомов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень наукометрической базы данных Web of Science. Результаты приведенных исследований обсуждались соискателем на конференциях, симпозиумах и научных семинарах в России и за рубежом.

Личный вклад автора

Е.В. Вильшанская выполнила основной объем экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе. Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично или при ее непосредственном участии: она активно участвовала в расчете и создании вакуумной и оптической частей установки, реализации режима стационарного удержания плазмы кальция высокой плотности (по меркам долгоживущей ультрахолодной плазмы), а также в анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации и автореферате указано, что исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до 10^6 см^{-3} дают представление о физике плазмы с более высокой плотностью и энергией, так как неидеальная плазма различной природы с одинаковым параметром неидеальности является подобной и имеет одинаковые кинетические и

переносные свойства. Однако конкретная иллюстрация этого тезиса в диссертации отсутствует. Следовало бы пояснить этот тезис.

2. Такое же пожелание следует адресовать автору в связи с утверждением о том, что результаты опытов с ультрахолодной плазмой можно использовать для улучшения разрешающей способности ионных просвечивающих микроскопов путем создания плазмы с упорядоченной структурой.

3. На рисунках 1.11 и 3.5 было бы желательно указать ошибку измерений (аналогично тому, как это сделано, напр., на рис. 1.12, 1.16, 2.6, 3.4, 3.12).

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы.

Тема и содержание диссертации Е.В. Вильшанской соответствуют паспорту специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Он дает достаточно полное представление о содержании диссертации, содержит необходимые формулировки цели и задач исследования, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация «Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), а ее автор Вильшанская Евгения Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – физика плазмы.

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв на работу рассмотрены, обсуждены и одобрены открытым голосованием (единогласно) на заседании Ученого совета по физике токамаков КЯТК Курчатовского комплекса

термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» 11 ноября 2021 года (протокол от 11 ноября 2021 года №93).

Отзыв подготовил:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отдела теории плазмы
Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

Кукушкин Александр Борисович

Адрес: 123182, г. Москва, пл. академика Курчатова, д. 1

Тел.: 8-(495)-196-73-34

Электронный адрес: Kukushkin_AB@nrcki.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Руководитель Курчатовского комплекса
термоядерной энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»



А.В. Лутченко

Научный руководитель Курчатовского комплекса
термоядерной энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
доктор технических наук



П.П. Хвостенко

Учёный секретарь
Учёного совета по физике токамаков
КЯТК НИЦ «Курчатовский институт»,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Л.К. Кузнецова

Подписи А.Б. Кукушкина, А.В. Лутченко, П.П. Хвостенко, Л.К. Кузнецовой
заверяю.

Главный учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



И.И. Еремин