

ОТЗЫВ

**официального оппонента Вишняковой Гульнары Александровны на
диссертационную работу Вильшанской Евгении Владимировны
«Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40» на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.9 – физика плазмы**

Холодные атомы и ионы являются мощнейшим инструментом широкого класса современных фундаментальных и прикладных исследований. Лазерное охлаждение и захват атомов в магнито-оптическую ловушку (МОЛ) является основой большинства экспериментов по созданию оптических стандартов частоты, квантовых гравиметров, квантовых симуляторов, квантовых вычислителей, Бозе-Эйнштейновского конденсата. Представленная работа Евгении Владимировны Вильшанской посвящена экспериментальному получению облака холодных атомов кальция-40, возбуждению ридберговских состояний в полученном ансамбле атомов, созданию и исследованию свойств ультрахолодной плазмы, полученной путём надпороговой фотоионизации, и демонстрации нового метода детектирования плазмы низкой плотности. Отличительной особенностью эксперимента является получение плазмы в стационарном режиме за счёт обеспечения непрерывной дозагрузки новых ионов, компенсирующих потери неустойчивых в потенциале МОЛ ионов. Также достоинством работы является возможность контролировать начальную температуру электронов путём выбора отстройки ионизирующего излучения.

Текст диссертации изложен на 108 страницах и состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 82 наименования, и одного приложения.

Во введении Евгения обосновывает актуальность представленной к защите работы, формулирует цель и задачи, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, описывает личный вклад автора, приводит научные положения, выносимые на защиту, перечисляет конференции, на которых были представлены результаты работы, и публикации, в которых они опубликованы.

В первой главе автор подробно описывает первую в России экспериментальную установку по лазерному охлаждению и захвату в магнито-оптическую ловушку атомов кальция-40. Детальное описание является несомненным достоинством диссертации, так как позволит использовать её как руководство по созданию других установок. Также приводятся результаты по исследованию важнейших характеристик полученного облака холодных атомов: температура, число атомов, концентрация.

Вторая глава посвящена описанию экспериментов по возбуждению холодных атомов кальция-40 в ридберговские состояния с большим главным квантовым числом (от 40 до 120). Крайне важным результатом является уточнение потенциала ионизации кальция-40, значение которого, считаю, должно учитываться базой данных NIST. Также приведено описание измерения температуры методом дифференциальной двухфотонной спектроскопии.

В третьей главе соискатель описывает процесс получения ультрахолодной плазмы и результаты исследования её характеристик: концентрации, температуры электронов и ионов, параметра неидеальности. Предложен и реализован новый метод регистрации разреженной плазмы, основанный на высокой чувствительности автоионизационных процессов к электрическому полю.

В заключении автор подытоживает описание проделанной работы, перечисляя основные научные результаты.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Текст диссертации написан простым понятным языком, однако не лишён некоторых недостатков, к которым можно отнести следующие:

1) Считаю, что в диссертации не хватает обзора литературы о современном состоянии области, исследованию которой посвящена работа, в частности, различным методам создания плазмы в целом и особенно ультрахолодной плазмы. Является ли ионизация холодных атомов, захваченных в МОЛ, единственным способом получения ультрахолодной плазмы?

2) В параграфе 2.2 «Калибровка измерителя длины волны» описано использование ячейки с парами рубидия для точного определения частоты лазерного излучения. Автор заявляет довольно высокую точность, в связи с чем целесообразно было бы в явном виде указать верхнюю оценку для систематических сдвигов резонансов насыщенного поглощения в газовой рубидиевой ячейке.

3) В том же параграфе в подписи к рисунку 2.2 сказано, что изображён спектр насыщенного поглощения рубидия-85, тогда как в ячейке присутствуют два изотопа: рубидий-85 и рубидий-87, и часть резонансов на графике соответствует переходам в рубидии-87.

4) Параграф 2.4.1 выглядит незаконченным. Полученная в эксперименте температура выше, чем предсказывает доплеровская теория. Было бы интересно прочитать в диссертации о возможных причинах такого расхождения. В этом же параграфе на рисунке 2.6 помимо экспериментальных точек приведены теоретические кривые, однако не указано, при каких параметрах (в частности, для какой температуры) проводился расчёт.

5) В параграфе 2.3 целесообразно было бы привести импульсную схему измерений, которая применялась для получения спектров ридберговских переходов. В параграфе 3.1.1 стоило бы привести значения коэффициентов отражения зеркал и ширину пика пропускания интерферометра Фабри-Перо. В параграфе 3.4 было бы интересно увидеть экспериментальный график переходного процесса при установлении стационарной концентрации ионов.

6) В параграфе 1.5.1 утверждается, что концентрация атомов поддерживается постоянной, однако не пояснено, каким образом. В параграфе 1.5.3.2 утверждается, что концентрация атомов в МОЛ имеет пространственное гауссово распределение. Считаю, целесообразно было бы привести график с аппроксимацией контура гауссовским профилем.

7) В параграфе 3.5, где обсуждается в том числе радиус Дебая, считаю целесообразным для полноты привести сравнение не только с размером облака, но и с характерным расстоянием между ионами.

Актуальность работы не вызывает сомнений и подтверждается несколькими факторами. Неидеальная плазма характеризуется параметром неидеальности, причём одинаковый параметр неидеальности делает плазму различной природы подобной, что фактически даёт возможность по поведению плазмы определённого типа предсказывать свойства плазмы совершенно другого происхождения. В работе экспериментально исследуется ультрахолодная плазма кальция с параметром неидеальности $\Gamma=2$, аналогичная по свойствам высокотемпературной плазме с таким же Γ . Помимо этого, исследование ультрахолодной плазмы важно для совершенствования ионных микроскопов, разрешение которых ограничено эффектом саморазогрева плазмы. Этот эффект может быть подавлен путём ионизации атомов в два этапа, то есть через промежуточные высоколежащие ридберговские состояния.

В работе получено несколько новых научных результатов. Реализована схема эксперимента, позволившая впервые получить стационарную ультрахолодную неидеальную плазму кальция-40, максимальная полученная концентрация составила 10^6 см^{-3} . Уточнено значение порога ионизации атома кальция, новое значение составляет $49305,91944(4) \text{ см}^{-1}$. (3) Продемонстрирован новый метод детектирования ультрахолодной плазмы крайне низкой концентрации (до 10^3 см^{-3}).

Уточнение значения потенциала ионизации даёт возможность более точно рассчитать частоты переходов в ридберговские состояния. Измеренные характеристики (переносные и кинетические) ультрахолодной плазмы кальция-40 могут быть перенесены на высокотемпературную плазму с таким же параметром неидеальности. Кроме того исследование полученной в работе плазмы открывает возможности для создания новых типов ионных микроскопов с улучшенным разрешением. Полученные результаты могут быть использованы в таких научных организациях, как ФИАН, ИОФАН, ИСАН, ВНИИФТРИ, ИПФ РАН, ИЛФ СО РАН, РКЦ и других. Стоит также отметить, что созданная экспериментальная установка может использоваться не только для создания и исследования ультрахолодной плазмы, но и, с применением некоторых изменений и дополнений, для широкого круга экспериментов с холодными атомами в области прецизионной метрологии, квантовых симуляций, квантовых вычислений.

Автор неоднократно представляла результаты работы на международных и всероссийских конференциях, с одним из докладов оппонент имела возможность лично ознакомиться. Результаты работы опубликованы в журналах, которые являются рецензируемыми и входят в список ВАК. Определяющий вклад автора в результаты данной работы не вызывает сомнений.

Представленная работа является завершённым исследованием и вместе с тем открывает большой потенциал для дальнейших исследований. Создана сложная экспериментальная установка, позволившая получить облако холодных атомов кальция с температурой порядка 5 мК, которое затем использовались для исследования ридберговских состояний и ультрахолодной плазмы. Работа выполнена на высоком мировом научном уровне. Автор без сомнения сформировалась как самостоятельный учёный.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация 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. (ред. 11.09.2021 г.), а ее автор Вильшанская Евгения Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Отзыв составил старший научный сотрудник отдела спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) к.ф.-м.н. Вишнякова Гульнара Александровна.

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела
спектроскопии ФИАН,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53
Телефон 8 (499) 132-61-77
e-mail: vishnyakovaga@lebedev.ru

 /Вишнякова Г.А./

Подпись Вишняковой Г.А. заверяю:
К.ф.-м.н., ученый секретарь ФИАН,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53
Телефон 8 (499) 132-69-78
e-mail: kolobov@lebedev.ru



 /Колобов А.В./

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, 8 (499) 132-65-54, office@lebedev.ru