

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.112.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 22 декабря 2021 г. (протокол № 32)

Защита диссертации **Вильшанской Евгении Владимировны**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы  
кальция-40»**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.112.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)

Протокол № 32 от 22 декабря 2021 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк (ред. 1046/нк от 15.10.2021 г.) в составе 30 человек. На заседании присутствуют 20 человек, из них очно: 10 докторов наук (6 по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 4 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), дистанционно: 10 докторов наук (5 по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника). Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – и.о. зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.112.02) д.ф.-м.н., профессор Храпак А.Г.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.112.02) д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1. Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
2. Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
3. Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
4. Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5. Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6. Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует
7. Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
8. Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
9. Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
10. Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
11. Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
12. Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
13. Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14	Присутствует
14. Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
15. Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
16. Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
17. Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует

18. Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
19. Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
20. Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
21. Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
22. Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
23. Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
24. Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
25. Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
26. Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
27. Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
28. Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
29. Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
30. Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9	Подключен

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 1.4 – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Вильшанской Евгении Владимировны** на тему «Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 1.4 – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**Зеленер Борис Борисович** – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией 1.4 – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**Скворцова Нина Николаевна** – гражданка РФ, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН; Россия, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38).

**Вишнякова Гульнара Александровна** – гражданка РФ, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН; Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»** (НИЦ «Курчатовский институт»; Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Скворцова Н.Н. и к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Вишнякова Г.А., научный руководитель Вильшанской Е.В. д.ф.-м.н. Зеленер Б.Б.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Добрый день, уважаемые коллеги. Сегодня мы собрались, чтобы заслушать и оценить две кандидатских диссертации. Первую диссертацию подготовила Евгения Владимировна Вильшанская на тему «Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40». Сначала я хочу предоставить ученому секретарю нашего диссертационного совета Михаилу Михайловичу Васильеву.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

Если есть какие-нибудь вопросы? Нет.

### Председатель

Евгения Владимировна, вам предоставляется возможность рассказать о проделанной работе.

### Вильшанская Е.В.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Вильшанской Е.В. прилагается).*

### Председатель

Спасибо большое. Теперь у нас есть возможность задать вопросы, Евгении Владимировне, есть желающие? Пожалуйста.

### Амиров Р.Х.

Вы сделали такое утверждение, что вы определяете энергию ионизации с точностью лучше, чем кто-либо. Прокомментируйте, кто до вас это делал, экспериментально. Если кто-то рассчитывал, в расчетах может быть не учитывали какие-то квантовые эффекты. История вопроса, почему такое утверждение?

### Вильшанская Е.В.

Спасибо за вопрос. В расчетных публикациях мы не смогли обнаружить значения порога ионизации с достаточно большой точностью. И вот в диссертации у меня есть ссылка на публикацию, где был экспериментально измерен порог ионизации, но у них была недостаточно хорошая точность определения переходов ридберговских, и тем самым их точность оказалась меньше, чем в наша. А расчетов, которые давали бы такую точность нету.

### Амиров Р.Х.

А почему?

**Вильшанская Е.В.**

Точно не знаю, вообще в теоретических расчетах учитываются различные эффекты, но было сложно найти исследования, посвященные этой теме. Только экспериментальная работа японской группы, которую я привела.

**Гавриков А.В.**

Вы не могли бы уточнить такой вопрос, когда рассказывали про охлаждение и полученную плазмы, вы сказали, что заряженные частица уходят, а вы их туда добавляете. Имеется в виду, что они добавляются за счет ионизации или это инжекция электронов или еще чего-то? Уточните, пожалуйста.

**Вильшанская Е.В.**

Да, у нас создана магнитооптическая ловушка, которая удерживает только нейтральные атомы, а когда мы добавляем ионизирующее излучение – у нас, соответственно, создаются электроны и ионы, но они в ловушке не удерживаются. Да, есть техники создания ионных ловушек, там можно реализовать удержание ионов. Но в нашем случае ионы и электроны начинают улетать из области ловушки, но за счет того, что все лазеры работают в непрерывном режиме, и лазер 390 (ионизирующий) постоянно включен, есть приток новых заряженных частиц, который больше, чем потери частиц из области исследования. И просто обнаруживается стационарное количество, стационарная плотность плазмы, которая постоянно висит в ловушке. И на протяжении нескольких часов может держаться такая плотность.

**Гавриков А.В.**

Ясно, спасибо.

**Вильшанская Е.В.**

Да, спасибо за вопрос.

**Председатель**

Есть ли еще вопросы? Пожалуйста.

**Вишнякова Г.А.**

Скажите, а вот эти процессы автоионизации выглядят похожими на Ожэ процессы. Это тоже самое или другое?

**Вильшанская Е.В.**

Нет, здесь немного другой принцип. Так как у кальция имеется сильные оптические переходы у атома и у иона, и мы можем подсвечивать оба валентных электрона. И просто за счет того, что у нас внешний валентный электрон находится в ридберговском состоянии, а мы еще возбуждаем второй электрон, внешний электрон уходит выше порога ионизации, а внутренний сваливается обратно в основное состояние. И этот процесс

происходит очень быстро, но есть возможности его замедлить, если возбуждать ридберговские переходы с большим главным квантовым числом или с большим  $l$ . Тогда этот процесс можно еще больше растянуть по времени.

**Вишнякова Г.А.**

Спасибо.

**Председатель**

Есть ли у присутствующих в зале еще вопросы? Тогда может быть будут вопросы из интернета? Как это у нас осуществляется?

**Василяк Л.М.**

У меня три вопроса. Первый – вы говорите о достижении количества атомов в ловушке  $3 \cdot 10^7$ , вы могли бы пояснить, много это или мало?

**Вильшанская Е.В.**

Да, мы захватили в магнитооптическую ловушку  $3 \cdot 10^7$  атомов кальция. Для магнитооптической ловушки это стандартное значение, но есть техники увеличения плотности на два-три порядка, но для наших экспериментов не требовалось больших значений. Можно, например, создать дипольную ловушку, получить большее число атомов в ловушке ( $10^9$ - $10^{10}$ ) и получить большую концентрацию ультрахолодной плазмы. Это планируется сделать в наших дальнейших экспериментах.

**Воробьев В.С.**

Уточните,  $3 \cdot 10^7$  это число атомов или концентрация?

**Вильшанская Е.В.**

Это число атомов, а концентрация  $10^9 \text{ см}^{-3}$ .

**Василяк Л.М.**

Когда вы говорите о двухфотонном переходе с лазерами 390 и 423 нм, то вы показывали фотографию, где меняется угол между лазерными пучками. Однако дальше каких-то экспериментальных выводов вы не сказали. Скажите пожалуйста, зачем нужно было сканировать и что из этого получилось.

**Вильшанская Е.В.**

Мы сканируем частоту лазерного излучения 390 нм, и когда его частота совпадает с энергией, достаточной чтобы два фотона (390 и 423 нм) поглотились, у нас реализуется переход атомов в ридберговское состояние и, собственно говоря, вот здесь представлены на слайде экспериментально исследованные резонансы ридберговских переходов. И их ширины мы сравниваем, вычитаем друг из друга, чтобы выделить коэффициент, связанный с температурой атомов, т.е. выделить доплеровскую часть.

**Василяк Л.М.**

Это понятно, а зачем вы сканировали угол между лазерными пучками?

**Вильшанская Е.В.**

На слайде представлена формула, что разница ширин двухфотонных резонансов зависит от угла между реализуемыми переход фотонами.

**Василяк Л.М.**

Разрешите, коллеги, еще один вопрос. Скажите пожалуйста, у вас когда разлетаются электроны и ионы, то все-таки это типа свободной диффузии или амбиполярной диффузии?

**Вильшанская Е.В.**

У нас электроны и ионы, за счет того, что они не удерживаются в ловушке, сразу улетают из-за того, что имеют температуру (температура электронов больше и они улетают быстрее, и их в нашей системе будет меньше, чем ионов). Но, конечно, здесь помимо температуры нужно учитывать такие эффекты, как диффузия, но это в планах наших дальнейших экспериментов. Мы планируем из движения частиц выделить не только температурный параметр, но и диффузию.

**Василяк Л.М.**

Спасибо.

**Вильшанская Е.В.**

Спасибо за вопрос.

**Ученый секретарь**

Евгения Владимировна, у меня такие вопрос, вы в докладе своем и выводах подчеркнули, что создали первую в России установку по охлаждению атомов кальция-40. Кажется, что значит не в России такая установка есть, и не прозвучало в докладе, как результаты, которые полученные вами, соответствуют мировому уровню, и где вы получили принципиально новые результаты, где удалось что-то улучшить?

**Вильшанская Е.В.**

Да, в России кальций до этого не охлаждали, в России есть экспериментальные группы, которые занимаются охлаждением других элементов (литий, тулий и другие). Кальций охлаждают в мире, но чаще исследования в области охлаждения атомов кальция направлены на создание сверхточных атомных часов. У кальция имеется триплетное долгоживущее состояние, время жизни одного из которых составляет порядка 116 мин, и на основе этого перехода и делаются сверхточные атомные часы. А вот наше исследование е направлено на исследование ультрахолодной плазмы. Но в принципе, у нас установка является универсальной и есть возможность ее доработать и перейти в

какую-то другую сферу исследований, к тем же атомным часам или как-то связать свои исследования с квантовой информатикой.

### **Ученый секретарь**

Но положения, выносимые на защиту, пионерские.

### **Вильшанская Е.В.**

Ну да. Первая в России, это конечно не во всем мире. Но, например, полученная ультрахолодная плазма в стационарном режиме – первая в мире. До нас такую систему исследовали только в импульсном режиме.

### **Председатель**

У меня тоже появился маленький вопрос. Вы уточнили потенциал ионизации кальция и, безусловно, это представляет по крайней мере академический интерес. А вот не могли бы вы пояснить, в каких процессах или технологиях это уточнение может быть важно.

### **Вильшанская Е.В.**

Я могу сказать, что даже в наших исследованиях это уточнение является очень важным, потому что, задавая отстройку ионизирующего лазера выше порога ионизации, мы тем самым задаем начальную температуру электронов. И даже на графике на слайде видно, что даже небольшое изменение начальной температуры электронов уже сильно влияет на нашу плазму. И нам нужно точно знать начальную температуру электронов, а для этого надо точно знать значение порога ионизации. Поэтому нам необходимо быть провести это исследование, чтобы заняться дальше плазмой.

### **Грязнов В.К.**

А можно вопрос в продолжение этого вопроса. Вы сказали, что уточнили японские данные. У Японцев 4 знака после запятой, у вас значительно больше. Но на самом деле вы их не просто уточнили, а вы их исправили.

### **Вильшанская Е.В.**

Да, я как раз говорила, что мы наблюдали систематическое отклонение наших энергий ридберговских переходов от расчетных. И сначала не могли понять, почему это происходит, а потом решили, что это связано с порогом ионизации. Что он известен не просто с недостаточной точностью, но и принципе, неточно.

### **Грязнов В.К.**

Значит вы не уточнили, а исправили значение.

### **Вильшанская Е.В.**

Да, мы исправили. Я бы хотела еще добавить, что тот лазерный источник, который мы использовали для измерения ридберговских переходов, на основе энергий которых мы

порог ионизации определили, очень интересный. Это диодный лазер с удвоением частоты. Излучение после кристалла удвоителя мы используем для реализации ридберговских переходов, а излучение до кристалла можно сравнить с переходами в ячейке с парами рубидия, а там переходы известны с очень большой точностью. И за счет этого мы смогли еще больше увеличить точность наших экспериментов. Т.е. за счет того, что мы имеем абсолютный частотный репер.

### **Воробьев В.С.**

Значит, можно вносить измеренное вами значение в базу данных NIST?

### **Вильшанская Е.В.**

Да, давайте вносить.

### **Филиппов А.В.**

Евгения Владимировна, понятие потенциала ионизации относится к изолированному атому, но, когда появляются соседи, происходит снижение потенциала ионизации, которое в наши условия некоторые оценивают как кТ, а кТ у вас для 5 мК это  $4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , т.е. на два порядка выше вашей точности. Вы оценивали снижение потенциала ионизации в ваших экспериментах.

### **Вильшанская Е.В.**

Надо сказать, что исследуемый газ в магнитооптической ловушке, это разреженный газ, и частицы друг с другом практически не сталкиваются, и многие эффекты за счет этого у нас пропадают. Мы проводили экспериментальное исследование и обнаружили, что эти эффекты снижения потенциала ионизации ничтожно малы, меньше той погрешности, которую нам дает прибор измеритель длины волны. Но можно использовать различные техники для еще большего увеличения погрешности наших измерений, например, еще более точно стабилизировать частоту лазерного излучения и лучше калибровать измеритель длины волны. Это даже не предел, можно еще выше сделать точность.

### **Председатель**

Я так понимаю, теперь вопросов больше нет. И я хочу предоставить слово научному руководителю диссертантки, Зеленеру Борису Борисовичу. Прошу вас остановится прежде всего на диссертанте, а не на диссертации.

### **Зеленер. Б.Б.**

Добрый день, уважаемые коллеги. Что я хотел сказать по поводу качества диссертанта и по поводу того, как она проходила работу. Евгения Владимировна пришла в нашу лабораторию с первого курса института. Она очень долго, уже на протяжении 10 лет, занимается научной деятельностью в нашей лаборатории. Она проявила себя очень вдумчивым и ответственным исполнителем, все эксперименты, которые здесь были проведены, и сборка установки прошли при ее непосредственном участии. Было

потрачено очень много времени, перелопачена куча всякого научного материала. Считаю, что, конечно, Евгения Владимировна провела достаточную работу и заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности физика плазмы.

### **Председатель**

Спасибо, Борис Борисович, нет вопросов к руководителю диссертации? Нет. Тогда я хочу предоставить слово ученому секретарю для оглашения заключения организации, где выполнена диссертация, отзыва ведущей организации и другие, поступившие в диссертационный совет отзывы на автореферат.

### **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, в деле имеется отзыв ведущей организации. В качестве ведущей организации выступает НИЦ «Курчатовский институт». С вашего позволения, весь отзыв зачитывать не буду, а остановлюсь на его структуре и замечаниях, которые в нем сформулированы. И так, в отзыве ведущей организации отмечается актуальность темы исследования, проведен анализ содержания диссертации, ее структура. Отмечается результат, который обсуждается в трех главах, проведена оценка новизны исследования, а также оценка практической значимости результатов диссертанта. Основные результаты диссертации, отмечено, что опубликованы в 8 статьях, и при этом отмечается личный вклад автора. Вместе с этим сделан ряд замечаний, и я их зачитаю.

1. В диссертации и автореферате указано, что исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  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. Делается вывод, что соискатель заслуживает присуждения искомой степени, и диссертация соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. Отзыв составлен Кукушкиным А.Б., а также подписан руководителем Курчатовского комплекса Термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» А.В. Лутченко, научным руководителем НИЦ «Курчатовский институт» П.П. Хвостенко, ученым секретарем Л.К. Кузнецовой и главным ученым секретарем И.И. Ереминым.

Кроме этого в адрес дис. совета поступило **4 отзыва** на автореферат. **Все отзывы положительные**, ряд из них имеет замечания.

*(Первый отзыв)* Первый отзыв поступил из Института теоретической и прикладной электродинамики РАН, подписан Андреем Карловичем Сарычевым, д.ф.-м.н., главным научным сотрудником. Отзыв положительный, имеется замечание:

1. В работе получена плазма с большой неидеальностью, однако полученная плазма является принципиально неравновесной. Насколько свойства такой плазмы дают представление о физике неидеальной стационарной плазмы с высокой плотностью?

*(Второй отзыв)* Второй отзыв поступил из Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Отзыв подписан доцентом, к.ф.-м.н. Борисюком Петром Викторовичем. Отзыв положительный, без замечаний

*(Третий отзыв)* Следующий отзыв поступил из Национального исследовательского университета "МЭИ". Отзыв составлен и подписан доцентом, к.т.н. Поройковым Антоном Юрьевичем. Отзыв положительный, имеются замечания:

1. В автореферате не приведена методика оценки погрешности измеренного в работе порога ионизации кальция-40.

2. В автореферате не приведены оценки погрешности измеряемых в работе величин, кроме порога ионизации атомов кальция-40.

*(Четвертый отзыв)* И, наконец, четвертый отзыв поступил из Национального исследовательского университета "МЭИ". Отзыв составлен и подписан старшим преподавателем, к.ф.-м.н. Кавыршиным Дмитрием Игоревичем. Отзыв положительный, имеется ряд замечания:

1. Одним из положений, выносимых на защиту, является наиболее точное определение порога ионизации кальция-40, при этом автор не приводит в автореферате ссылок на другие исследования и сравнения их результатов.

2. На рисунке 4 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ, при этом на частоте, на которой, согласно теории, должен наблюдаться минимум температуры, экспериментальная зависимость имеет максимум. Данное качественное отличие хода зависимостей не объясняется погрешностью измерений и никак не прокомментировано автором.

3. В третьей главе подчёркивается чувствительность эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  к паразитным малым электрическим полям, что фактически означает снижение порога ионизации под их воздействием. При этом в автореферате не освещено, как было достигнуто и контролировалось отсутствие паразитных полей при метрологически точном определении значения энергии ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$   $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ .

## **Председатель**

Евгения Владимировна, у вас сейчас есть возможность ответить на замечания, которые были сформулированы в письменной форме.

## **Вильшанская Е.В.**

Спасибо. Я предлагаю начать с замечаний, которые поступили от оппонировающей организации. Я выписала себе на листочке вопросы, которые мне были заданы.

1. Первый вопрос о том, что в диссертации и автореферате указано, что исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  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.

И так, ответ. В тексте диссертации на стр. 4 (ссылки 4 и 5) и на слайде 3 приведены публикации, в которых приведены результаты расчетов коэффициентов диффузии и электропроводности ультрахолодной плазмы методом молекулярной динамики. Эти результаты были сопоставлены с результатами экспериментов и расчетов для плазмы, полученной при высоких температурах и том же значении параметра неидеальности. Было показано, что эти результаты в безразмерном виде совпадают.

2. Второй вопрос о том, что в диссертации и автореферате указано, что исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  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.

И так, ответ. В тексте диссертации на стр. 4 (ссылки 4 и 5) и на слайде 3 приведены публикации, в которых приведены результаты расчетов коэффициентов диффузии и электропроводности ультрахолодной плазмы методом молекулярной динамики. Эти результаты были сопоставлены с результатами экспериментов и расчетов для плазмы, полученной при высоких температурах и том же значении параметра неидеальности. Было показано, что эти результаты в безразмерном виде совпадают.

3. 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.

В тексте диссертации на стр. 4 я ссылаюсь на статью, где авторы представили модификацию ионного микроскопа, которая позволила достичь фокусировки ионного пучка до пятна размером  $5,8 \pm 1,0 \text{ нм}$ . Однако при формировании ионного пучка имеет место эффект саморазогрева плазмы (Disorder-Induced Heating – DIH), который мешает

уменьшить расходимость пучка и увеличить разрешающую способность микроскопа. В работе [9] рассматривается возможность возбуждения холодных нейтральных атомов в плазму через ридберговские состояния. За счет эффекта дипольной блокады ридберговские атомы создают упорядоченную структуру, после чего атомы в ридберговских состояниях возбуждаются в изначально упорядоченную плазму, и эффект ДИН может быть подавлен.

4. 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).

Да, действительно, стоило указать ошибку на графиках. Ошибка на данных графиках составляет не более 10%.

Так, и теперь отзывы, которые поступили на автореферат. Отзыв их МИФИ у нас без замечаний. Отзыв из Института теоретической и прикладной электродинамики, составленный Сарычевым, имеет одно замечание:

1. В работе получена плазма с большой неидеальностью, однако полученная плазма является принципиально неравновесной. Насколько свойства такой плазмы дают представление о физике неидеальной стационарной плазмы с высокой плотностью?

Это похожий вопрос, что и у оппонировавшей организации. В тексте диссертации на стр. 4 (ссылки 4 и 5) и на слайде 3 приведены публикации, в которых приведены результаты расчетов коэффициентов диффузии и электропроводности неравновесной ультрахолодной плазмы методом молекулярной динамики. Эти результаты были сопоставлены с результатами экспериментов и расчетов для плазмы, полученной при высоких температурах и том же значении параметра неидеальности. Было показано, что эти результаты в безразмерном виде совпадают.

Отзыв из МЭИ, составленный Поройковым, содержит два замечания:

1. В автореферате не приведена методика оценки погрешности измеренного в работе порога ионизации кальция-40.

Погрешность оценки порога ионизации составляет меньше 1 МГц и представлена в тексте самой диссертации. Точность измерения абсолютного значения энергии ридберговских переходов в кальции, по которым определялся порог ионизации, была увеличена благодаря возможности сравнить абсолютное значение частоты ридберговских переходов в кальции с резонансами насыщенного поглощения в парах рубидия.

2. В автореферате не приведены оценки погрешности измеряемых в работе величин, кроме порога ионизации атомов кальция-40.

Оценки погрешности приведены в тексте диссертации. Но стоит что погрешность определения абсолютных значений частот переходов не превышает 2 МГц – это точность, которую дает измеритель длины волны Angstrom WS-U.

Отзыв из МЭИ, составленный Кавыршиным, содержит три замечания:

1. Одним из положений, выносимых на защиту, является наиболее точное определение порога ионизации кальция-40, при этом автор не приводит в автореферате ссылок на другие исследования и сравнения их результатов.

Да, действительно, не привела. Ссылки приведены в тексте диссертации на стр. 54 (ссылка 42 и 44) и были показаны в моем докладе на слайде 20.

2. На рисунке 4 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ, при этом на частоте, на которой, согласно теории, должен наблюдаться минимум температуры, экспериментальная зависимость имеет максимум. Данное качественное отличие хода зависимостей не объясняется погрешностью измерений и никак не прокомментировано автором.

Здесь приведена простейшая доплеровская теория, которая показывает нижний предел температуры, который можно достигнуть при доплеровском охлаждении. Возможным является уменьшение температуры атомов до этого нижнего предела улучшением параметров МОЛ, а также можно охлаждать атомы в МОЛ ниже доплеровского предела (другая техника охлаждения – субдоплеровское охлаждение), но в данных экспериментах это не требовалось.

3. В третьей главе подчёркивается чувствительность эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  к паразитным малым электрическим полям, что фактически означает снижение порога ионизации под их воздействием. При этом в автореферате не освещено, как было достигнуто и контролировалось отсутствие паразитных полей при метрологически точном определении значения энергии ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$   $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ .

Мы проверяли экспериментально и теоретически влияние полей, создаваемых ионами, на сдвиги ридберговских резонансов. Те внешние поля, которые есть в наших экспериментах, сдвигают резонансы на порядок меньше заявленной точности наших измерений, поэтому ими можно пренебречь.

### **Председатель**

Теперь слово предоставляется официальному оппоненту Нине Николаевне Скворцовой из Института общей физики им. А.М. Прохорова.

### **Скворцова Н.Н.**

Здравствуйте, уважаемые члены диссертационного совета. С удовольствием прочитала диссертацию и автореферат, и хотела бы отметить и поддержать диссертанта вот таким необычным введением об актуальности. Вы понимаете, редкий случай, когда диссертант занимается исследованием процессов фундаментальных явлений в физике плазмы, причем абсолютно современных. И тут я привожу такой пример, в диссертации приводится ссылка на Нобелевскую премию 1997г., «За создание методов охлаждения и удержания атомов с помощью лазерного света». Мне трудно представить, что в какой-

нибудь диссертации по газовому разряду в плазме будет еще и ссылка на Ирвинга Ленгмюра 1932г., «За открытия и исследования в области химии поверхностных явлений». Т.е. это очень современная тема, в которой, действительно, очень большой простор исследований фундаментальных явлений. И, без сомнений, актуальность диссертации чрезвычайно высока для исследований явлений в физике плазмы. Более того, я считаю, что ультрахолодная плазма по своим параметрам, действительно относится к неидеальной плазме. Это экспериментальное исследование в такой теме представляет очень большой интерес в физике неоднородных сред, а не только в физике плазмы для сравнительного анализа, но и других областях науки от оптики до теории вероятности и математической статистики для стационарных процессов в неидеальных средах. Поэтому, актуальность диссертационной работы не вызывает сомнения, она относится к физико-математическим наукам, с чем я очень была рада ознакомиться.

Дальше, научную новизну я должна отметить. В отзыве перечислены те же самые 4 пункта, которые перечислены у Евгении Владимировны. Но я бы хотела остановиться на методическом разработанном оригинальном методе диагностики, это редчайший случай для таких систем, который позволил детектировать плазму с концентрацией  $10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , что является совершенно уникальным результатом и, я надеюсь, будет использоваться в дальнейшем для многих экспериментах. Измерения ридберговских переходов, о которых здесь много говорили, они указывают на очень ясный взгляд автора на эту проблему, потому что определить систематическую ошибку, убедиться в ней и поправить не каждому удается.

Далее, достоверность полученных результатов и научных положений. Можно отметить, что достоверность полученных экспериментальных характеристик не вызывает сомнения. И в первую очередь, потому что очень многие явления изучены при помощи многих диагностик. Речь не идет о сравнении стационарной и нестационарной ультрахолодной плазмы, которые тоже приведены, а в первую очередь, что у человека очень хорошие руки и хорошее представление о диагностическом комплексе, и явления изучаются разными диагностиками, а это и говорит о достоверности полученных результатов в пределах полученной ошибки.

Дальше, значимость полученных результатов. В данном случае значимость полученных результатов это, в первую очередь, научная значимость, как отмечалось уже неоднократно. Методическая значимость, которую я отметила ранее. И практическое применение, которое еще до конца не видно, но я бы отметила, что практическое применение бывает и в науке, какое-то число, кроме переходов в высокотемпературной плазме. И то, что будущим поколениям позволит настраивать лазерное излучение в резонанс – это тоже практическое применение для научных исследований.

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд, в котором получен ряд важных результатов как фундаментального, так и методического и прикладного характера. Отмечаю большой вклад автора в создание первой в России экспериментальной установки, у которой, к сожалению, нет названия, что необычно для людей, пришедших из высокотемпературной плазмы. Но результаты достаточные, во многих научных журналах, что на много превышает требования ВАК. Это тоже можно отметить, требуется 2-3 статьи, а здесь 8 статей.

По работе я обязана указать некоторые вопросы и замечания:

*(Первое замечание).* Установка выполнена на заказ из нержавеющей стали. Сейчас даже в журналах принято указывать фирму, которая выполняет то или иное устройство. Так повторяется неоднократно, и я предлагаю это указывать. Например, ссылка на изготовителя должна быть указана. Так полагается во всех журналах мира.

*(Второе замечание).* Что мне не хватило, не ошибки, ошибки в диссертации практически всюду указаны на графиках. Мне не хватило масштаба, особенно на рисунках-схемах. Вы понимаете, все-таки физика плазмы – наука обширная, например, будущая установка газодинамическая ловушка в Новосибирске будет длиной 1,3 км. Поэтому, когда на масштабе схемы не указано полметра, метр, 10 см, это затрудняет чтение. Просто наука обширная стала, у нее разные масштабы.

*(Третье замечание).* Конечно, нельзя писать, что фотография сделана на обычную бытовую камеру, тоже должна быть указана марка. Обычно, бытовые камеры – это видеорегиистратор, которым пользуется полиция.

*(Четвертое замечание).* И такое вопрос. В первой главе также рассматривается определение температуры захваченного облака атомов методом баллистического разлета частиц. Приведена оценка «Дебаевский радиус не превышает размеров исследуемой среды...0,15 мм при характерном диаметре облака 1,4 мм». Нужно ли в этом случае учитывать и диффузионный разлет? Это вопрос к диссертанту

*(Пятое замечание).* Ну и, наконец, последнее. Разработанный и созданный автором усилитель (Приложение А) может быть подан на патент на полезную модель.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки, очень высокой, диссертационной работы. Работа выполнена автором на высоком научном уровне. Диссертационная работа может быть утверждена, соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, без сомнения, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

### **Председатель**

Спасибо. Евгения Владимировна, у вас есть возможность ответить на замечания оппонента.

### **Вильшанская Е.В.**

Спасибо большое за высказанные замечания к моей работе, я хотела бы на них ответить.

*(Первое замечание).* Первое замечание по поводу того, что я пишу, что установка выполнена на заказ из нержавеющей стали. Да, возможно здесь я не указала фирму, но дальше в тексте диссертации на стр. 15 указано «Чертежи печки и основной вакуумной

камеры были разработаны в ИПФ РАН и изготовлены в компании MDC Vacuum Products». Это американская фирма, и вся вакуумная часть у нас заказана именно в ней.

*(Второе замечание).* Следующий вопрос, что на некоторых рисунках-схемах не указан масштаб. Да, действительно, масштаб не указан. Там, где приведена основная фотография установки, рисунок 1.10, и длина всей вакуумной установки составляет около 1,5 м. А принципиальные схемы оптические – вся установка располагается на двух оптических столах, и оптические схемы «размазаны» между двумя столами, поэтому сложно сказать, сколько каждая схема занимает места в пространстве.

*(Третье замечание).* Также, спасибо за замечание, я не указала название марку камеры, на которую производились фотографии, CCD-камера Thorlabs DCU223M.

*(Четвертое замечание).* Также был вопрос, что в первой главе также рассматривается определение температуры захваченного облака атомов методом баллистического разлета частиц. Приведена оценка «Дебаевский радиус не превышает размеров исследуемой среды... 0,15 мм при характерном диаметре облака 1,4 мм». Нужно ли в этом случае учитывать и диффузионную скорость. Похожий вопрос звучал сегодня из зала. Надо сказать, что температура атомов, определенная по баллистическому разлету, отличается от температуры ионов. Ионы имеют большую температуру, т.е. у нейтральных атомов температура порядка мК, то у ионов это 0,1-0,05 К. Диффузию, конечно, надо учитывать при интерпретации получаемых результатов. В ширину регистрируемого спектра флуоресценции ионов большое вклад вносит Раби уширение, а также температура и диффузия. Экспериментально сложно отделить диффузионную скорость от температуры, и пока нам это сделать не удалось – это предмет дальнейших исследований. Но есть исследования других групп, занимающихся похожими исследованиями плазмы, они в работах приводят методы выделения из спектра флуоресценции различных параметров. Например, в работе, представленной на слайде, предлагают аппроксимировать спектр флуоресценции ионов вот таким выражением, и затем проводят регистрацию спектра ионов в различных участках облака – в центре и на крыльях, и выделяют различные параметры. Это предмет наших дальнейших исследований, наши дальнейшие эксперименты будут направлены в эту область.

*(Пятое замечание).* Последний вопрос о том, что был разработан и создан усилитель, и можно ли его представить на патент, как полезную модель. К сожалению, нет. Сам усилитель разработан на основе микросхемы фирмы Texas Instruments, и в Datasheet предложены различные электрические схемы, которые можно реализовать. И вот это одна из модификаций такой схемы, с некоторыми изменениями. Наверное, подобную разработку на патент не получится представить.

Спасибо большое за отзыв и за вопросы.

### **Председатель**

Теперь слово предоставляется второму официальному оппоненту – Гульнаре Александровне Вишняковой из ФИАНа.

## Вишнякова Г.А.

Здравствуйте, спасибо за приглашение быть оппонентом. Прделана, без преувеличения, я считаю, огромная работа. Само по себе создание установки по лазерному охлаждению и захвату нового для России элемента, это уже огромный вклад в отечественную науку, я считаю. Холодные атомы сначала были объектом исследования, сейчас превратились в мощнейший инструмент исследований фундаментальных и практических явлений. Холодные атомы используются для создания оптических стандартов частоты, в квантовых вычислениях, в квантовых симуляторах, в гравиметрах и, как в диссертации, для создания ультрахолодной плазмы. Мне кажется, важный результат в диссертации, это уточнение и исправление значения порога ионизации. Очень хорошо, что в диссертации приведено два метода определения температуры холодных атомов и проводится сравнение полученных результатов значения температуры, и они совпадают. Очень важный и интересный эксперимент определения концентрации плазмы методом автоионизации, он дает возможность определять очень низкие концентрации плазмы, малые значения электрических полей. И, конечно, практическая значимость для ионных микроскопов и исследования высокоэнергетичной плазмы, так как плазмы с одинаковым параметром неидеальности являются подобными. В качестве замечаний скажу следующее:

*(Первое замечание).* Стоило привести более обширный литературный обзор того, как в мире другие группы получают неидеальную плазму, является магнитооптическая ловушка единственным способом получения ультрахолодной неидеальной плазмы?

*(Второе замечание).* Порог автоионизации определяется с использованием ячейки с рубидием, стоило бы упомянуть верхнюю оценку для систематических сдвигов резонансов в самой ячейке.

*(Третье замечание).* Далее, приведен спектр резонансов в рубидиевой ячейке, и написано, что ячейка содержит изотоп рубидия-85, однако там еще существует рубидий-87.

*(Четвертое замечание).* На графиках с температурой, полученная температура больше чем предсказывает доплеровская теория. Было бы интересно прочитать в диссертации о возможных причинах такого расхождения. На графиках также приведен теоретический расчет, однако не указано для какой температуры.

*(Пятое замечание).* Мне кажется стоило бы привести импульсную схему, которая использовалась при снятии ридберговских спектров.

*(Шестое замечание).* Далее в диссертации указано, что поддерживается постоянной концентрация атомов в магнитооптической ловушке, описано как она измеряется, но описано, как она поддерживается постоянной.

*(Седьмое замечание).* И последнее замечание, мне кажется целесообразно было бы привести сравнение радиуса Дубая не только с размером всей системы, но и со средним межйонным расстоянием.

Большое количество замечаний лишь подчеркивает сложность, объем и обширность работы, и вызвано большим интересом оппонента к работе. То, каким языком написана диссертация, как Евгения делала доклад и отвечала на вопросы, считаю полностью дают нам возможность понять определяющий вклад автора в работу. Считаю, что Евгения полностью сформировалась как самостоятельный ученый. Что важно, работа с одной стороны носит законченный характер, а с другой стороны дает толчок и перспективы для многих дальнейших исследований.

Перечисленные замечания не снижают качества и значимости работы, и считаю, что соискатель полностью заслуживает степени кандидата физико-математических наук по специальности физика плазмы, а работа полностью соответствует предъявляемым к ней требованиям.

Спасибо.

### **Председатель**

Евгения Владимировна, у вас есть возможность ответить на замечания оппонента.

### **Вильшанская Е.В.**

Спасибо большое за положительный отзыв о моей работе, за замечания, и я хотела бы ответить на них.

*(Первое замечание)*. Первое замечание, что в диссертации не хватает обзора литературы о современном состоянии области, исследованию которой посвящена работа и является ли ионизация холодных атомов, захваченных в магнитооптическую ловушку, единственным способом получения ультрахолодной плазмы? Да, действительно, стоило более развернуто написать обзор литературы по методам получения ультрахолодной плазмы. Нет, не единственный для получения ультрахолодную плазмы. Например, есть экспериментальные работы по получению ультрахолодной плазмы, образованной в сверхзвуковом молекулярном пучке молекул NO. Но представленный в моей диссертационной работе метод получения плазмы дает возможность получать ультрахолодную плазму с хорошо контролируемой низкой электронной температурой.

*(Второе замечание)*. Следующий вопрос относится к параграфу 2.2 «Калибровка измерителя длины волны», где описано использование ячейки с парами рубидия для точного определения частоты лазерного излучения. В замечании «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». Да, сдвиги конечно в ячейке есть, но они примерно на порядок меньше, чем заявленная точность измерителя длины волны. Так что систематическими сдвигами резонансов в ячейке можно пренебречь.

*(Третье замечание)*. В том же параграфе в подписи к рисунку 2.2 сказано, что изображён спектр насыщенного поглощения рубидия. Да, я пишу, что там рубидий-85, но это естественная смесь и в ней присутствует два изотопа: рубидий-85 и рубидий-87. Но

мы калибруем лямбда-метр именно на резонансах 85 рубидия, поэтому в диссертации именно о нем я и пишу.

*(Четвертое замечание).* Следующее замечание, что «параграф 2.4.1 выглядит незаконченным. Полученная в эксперименте температура выше, чем предсказывает доплеровская теория и было бы интересно узнать, почему. В этом же параграфе на рисунке 2.6 помимо экспериментальных точек приведены теоретические кривые, однако не указано, при каких параметрах». Похожий вопрос мне задали на автореферат. Да, полученная температура выше доплеровского предела. На графике приведена простейшая доплеровская теория, которая показывает нижний предел температуры, который можно достигнуть в магнитооптической ловушке. У нас не было необходимости понижать эту температуру до этого значения, поэтому мы остановились на температуре порядка 5 мК. На рис. 2.6 на стр. 60 расчет проводился для 5 мК.

*(Пятое замечание).* Следующий вопрос из трех частей состоит. Первая «в параграфе 2.3 целесообразно было бы привести импульсную схему измерений, которая применялась для получения спектров ридберговских переходов». В параграфе 2.3 на стр. 51 диссертации эксперимент проводился не в импульсном, а в постоянном режиме. Сканировалась частота возбуждающего ридберговские переходы лазера и регистрировался сигнал падения флуоресценции атомов. Стоило более конкретно написать об этом в работе. Далее «в параграфе 3.1.1 стоило бы привести значения коэффициентов отражения зеркал и ширину пика пропускания интерферометра Фабри-Перо». Этот вопрос про интерферометр, сделанный на основе стекла марки ULE. Вчера я смотрела Ваш доклад на конференции Физика ультрахолодных атомов, где вы рассказывали про подобный интерферометр на основе стекла ULE, который вы охлаждаете азотом. У нашего интерферометра параметры, конечно, хуже, финесс 7800, ширина пика пропускания 0,2 МГц, коэффициент отражения зеркал 99,96%, т.е. на 3 порядка хуже, чем у Вас. Особенностью этого ИФП является то, что он просветлен на несколько нужных нам длин волн: 700 нм, 780 нм, 866 нм, 1978 нм, это нам нужно для дальнейших экспериментов. Нам такие ширины пика более чем достаточно. И еще в этом же вопросе, «было бы интересно увидеть экспериментальный график переходного процесса при установлении стационарной концентрации ионов». В параграфе 3.4 действительно можно было привести график установления стационарной концентрации ионов. Экспериментальный график качественно соответствует теоретическому, представленному в параграфе 3.4 на стр. 76. Действительно, можно было бы и экспериментальный график привести в работе.

*(Шестое замечание).* Шестой вопрос «параграфе 1.5.1 утверждается, что концентрация атомов поддерживается постоянной, однако не пояснено, как именно». Флуоресценция атомов постоянно контролируется с помощью ФЭУ и при проведении экспериментов я слежу, чтобы уровень сигнала на ФЭУ был всегда одинаковым, например, из-за нагрева катушек может плыть концентрация атомов в МОЛ, тогда эксперименты останавливаются и возобновляются через несколько минут, когда катушки остынут. И в том же вопросе, концентрация в МОЛ с большой точностью аппроксимируется Гауссовой функцией, мне стоило бы привести это в работе.

*(Седьмое замечание).* Последний вопрос о том, что в параграфе 3.5, где я рассказываю про ультрахолодную плазму, обсуждается в том числе радиус Дебая, считаю целесообразным для полноты привести сравнение не только с размером облака, но и с характерным расстоянием между ионами. Да действительно, стоило бы это привести в работе. Так как мы исследуем неидеальную и сильнонеидеальную плазму, то среднее расстояние между ионами может быть сравнимо или больше радиуса Дебая. Например, для концентрации электронов  $10^5 \text{ см}^{-3}$  радиус Дебая 0,15 мм, а среднее расстояние будет 0,13 мм. Для неидеальной плазмы это характерных значения.

Спасибо большое за вопросы.

### **Председатель**

Теперь, согласно регламенту, у нас есть возможность организовать дискуссию по теме диссертации. Кто желал бы высказаться? Может быть по интернету кто-то хочет сказать?

### **Василяк Л.М.**

Мне очень понравился доклад, работа оставила положительное впечатление. Хочу обратить внимание на результат по уточнению потенциала ионизации. Мне очень понравилась экспериментальная методика определения маленьких полей, создаваемой ультрахолодной плазмой. Характерный диапазон потери потенциала ионизации порядка электронной температуры, а электронная температура здесь составляет  $5 \cdot 10^{-2} \text{ К}$ .

Поэтому мне работа понравилась, я буду голосовать «за», и я хотел бы поддержать эту работу и диссертанта. Спасибо.

### **Вильшанская Е.В.**

Спасибо большое.

### **Председатель**

Спасибо, Леонид Михайлович. Еще есть желающие выступить? Тогда на этом мы дискуссию заканчиваем и переходим к следующему вопросу. Сейчас по регламенту соискателю дается возможность сказать заключительное слово.

### **Вильшанская Е.В.**

Я хотела бы выразить мою благодарность комиссии, которая собралась сегодня, чтобы меня послушать. Спасибо большое за вопросы, они были очень интересные, некоторые вопросы помогут нам в дальнейшем для наших следующих исследований. Также я хотела бы сказать большое спасибо моему научному руководителю, который дал мне возможность заниматься такой интересной деятельностью в лаборатории на современном оборудовании. Также хочу сказать спасибо всему коллективу лаборатории за очень хорошую, теплую атмосферу, которая у нас есть, очень приятно с вами работать. Спасибо.

## **Председатель**

Теперь прежде чем приступить к голосованию, Михаил Михайлович расскажет нам о процедуре голосования.

## **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, мы действуем в духе со временем с и рекомендациями Минобрнауки, которые нас настраивают, как мы должны действовать. Необходимо провести полностью электронное голосование, все члены совета, которые присутствуют и очно здесь в зале, и онлайн, пользуясь функционалом нашего сайта могут свой голос онлайн отдать за присуждение степени соискателю. Ссылка Вам всем была разослана, у меня просьба, это можно сделать и с мобильного телефона, и с любого электронного устройства, которое у Вас есть с собой и имеет выход в интернет. Можно зайти на сайт и по этой ссылке проголосовать. Если у вас с собой нет электронного носителя, можно подойти к ноутбуку, который тут стоит в президиуме, ввести свой логин и пароль, и точно свой голос, свое волеизъявление привести. Сейчас голосование открыто, и как таковая счетная комиссия не нужна, все происходит в автоматическом режиме подсчета, так что результат голосования мы с вами узнаем, и я Вам его оглашу. Пожалуйста, прошу приступить к голосованию. *(Проводится процедура тайного онлайн голосования).*

## **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, мы прошли этот непростой путь, и смогли проголосовать все члены дис. совета. Я, с вашего позволения, оглашу результаты. И так, у нас сегодня на заседании присутствовало **20** членов диссертационного совета, голосов было отдано **20**, и все «за». Вы должны утвердить, кто «за»? Возражений нет? Нет. Теперь мы можем поздравить соискателя.

*(Результаты голосования утверждены единогласно)*

И теперь важный момент, мы должны проверить и дать свои замечания и рекомендации по проекту заключения. У кого какие есть соображения, правки?

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).*

## **Председатель**

Если желающих сообщить правки больше нет, мы можем приступить к голосованию по проекту заключения. Кто за то, чтобы принять этот проект? Кто против? Воздержался? Нет таких. Утверждаем единогласно. На этом первая часть заседание заканчивается.

*(Проект заключения принят единогласно).*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 24.1.193.01

(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 22.12.2021г. № 32

О присуждении Вильшанской Евгении Владимировне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 20.10.2021г., (протокол заседания № 23) диссертационным советом 24.1.193.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, [jiht.ru](http://jiht.ru)), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012 г (ред. 1046/нк от 15.10.2021).

Соискатель Вильшанская Евгения Владимировна 1993 года рождения, в 2017 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2021 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель заведующий лабораторией № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук доктор физико-математических наук Зеленер Борис Борисович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» Скворцова Нина Николаевна;

- кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Вишнякова Гульнара Александровна

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва) в своем

положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником Отдела теории плазмы Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» д.ф.-м.н. Кукушкиным Александром Борисовичем (утвержденном 06.12.2021г. руководителем Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Лутченко А.В.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов. Например, создана установка по лазерному охлаждению атомов кальция-40, на которой получено самое точное значение потенциала ионизации, равное  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , и впервые получена ультрахолодная плазма кальция-40 в стационарном режиме.

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, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень наукометрической базы данных Web of Science, 9 тезисов в сборниках трудов конференций.

1. Sautenkov, V.A. Power broadening of two-photon coherent resonances on Rydberg atomic transitions in a magneto-optical trap / V.A. Sautenkov, S.A. Saakyan, E.V. Vilshanskaya, B.B. Zelener, B.V. Zelener // Journal of Russian Laser Research. — 2017. — Vol. 38., no. 1. — Pp. 91-95.

2. Зеленер, Б.Б. Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, И.Д. Аршинова, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Vol. 108., no. 12. — Pp. 829-833.

3. Зеленер, Б.Б. Измерение температуры оптически охлажденных атомов кальция с использованием метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии / Б.Б. Зеленер, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, И.Д. Аршинова, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // ДАН. — 2018. — Vol. 485., no. 3. — Pp. 281-284.

4. Vilshanskaya, E.V. Saturation spectroscopy of calcium atomic vapor in hot quartz cells with cold windows / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, D.A. Murashkin, B.B. Zelener, B.V. Zelener // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946., no. 1. — Pp. 012130.

5. Зеленер, Б.Б. Измерение энергий ридберговских переходов в  $n^1S_0$  состоянии и порога ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Е.В. Вильшанская, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Vol. 110., no. 12. — Pp. 767-771.

6. Vilshanskaya, E.V. The setup for laser cooling and trapping of calcium atoms / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, B.B. Zelener // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1147., no. 1. — Pp. 012097.

7. Zelener, B.B. Differential two-photon spectroscopic measurements of cold atoms temperature with variable angle between probe beams / B.B. Zelener, E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, I.D. Arshinova, A.A. Bobrov, V.A. Sautenkov, B.V. Zelener // Laser Physics. — 2020. — Vol. 30., no. 2. — Pp. 025501.

8. Зеленер, Б.Б. Диагностика разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2021. — Vol. 113. no. 2. — Pp. 92-95.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН) (г.н.с., д.ф.-м.н., Сарычев А.К.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в работе получена плазма с большой неидеальностью, однако полученная плазма является принципиально неравновесной. Насколько свойства такой плазмы дают представление о физике неидеальной стационарной плазмы с высокой плотностью?

2. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (и.о. зам. зав. кафедрой «Физико-технических проблем метрологии», к.ф.-м.н., доцент Борисюк П.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (к.т.н., доцент Поройков А.Ю.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в автореферате не приведена методика оценки погрешности измеренного в работе порога ионизации кальция-40;

- в автореферате не приведены оценки погрешности измеряемых в работе величин, кроме порога ионизации атомов кальция-40.

4. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (старший преподаватель к.ф.-м.н. Кавыршин Д.И.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- одним из положений, выносимых на защиту, является наиболее точное определение порога ионизации кальция-40, при этом автор не приводит в автореферате ссылок на другие исследования и сравнения их результатов;

- на рисунке 4 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ, при этом на частоте, на которой, согласно теории, должен наблюдаться минимум температуры, экспериментальная зависимость имеет максимум. Данное качественное отличие хода зависимостей не объясняется погрешностью измерений и никак не прокомментировано автором;

- в третьей главе подчёркивается чувствительность эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  к паразитным малым электрическим полям, что фактически означает снижение порога ионизации под их воздействием. При этом в автореферате не освещено, как было достигнуто и контролировалось отсутствие паразитных полей при метрологически точном

определении значения энергии ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$   $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ .

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Скворцова Нина Николаевна является ведущим ученым в области физики плазмы, имеет многочисленные публикации по тематике представленной диссертационной работы;

1. Skvortsova N. N. et al. Synthesis of micro-and nanostructured materials via oscillating reactions initiated by high-power microwave pulses // *Ceramics International*. – 2021. – Т. 47. – №. 3. – С. 3978-3987;

2. Kharchevskii A. A. et al. Modernization of the filtration system for the Doppler reflectometry diagnostics of the L-2M stellarator for operation in regimes high-power ECR heating // *Journal of Instrumentation*. – 2020. – Т. 15. – №. 01. – С. 01038;

3. Batanov G. M. et al. Time–Space Evolution of the Parameters of Turbulent Density Fluctuations During Pulsed EC Heating of the Plasma at the L-2M Stellarator // *Plasma Physics Reports*. – 2020. – Т. 46. – №. 10. – С. 955-966.

- к.ф.-м.н., Вишнякова Гульнара Александровна является признанным специалистом в области лазерной физики и исследовании холодных атомов в магнитооптической ловушке, и имеет публикации по тематике представленной диссертационной работы:

1. Kryuchkov D. S. et al. Compact High-Finesse ULE Cavities for Laser Frequency Stabilization // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2021. – Т. 48. – №. 10. – С. 295-300;

2. Fedorova E. S. et al. Optical pumping of ultracold thulium atoms to a lower level of the clock transition and study of their depolarisation // *Quantum Electronics*. – 2019. – Т. 49. – №. 5. – С. 418;

3. Kalganova E. et al. Two-temperature momentum distribution in a thulium magneto-optical trap // *Physical Review A*. – 2017. – Т. 96. – №. 3. – С. 033418.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» широко известен своими достижениями в области физики плазмы. В частности, в этом институте ведутся работы по исследованию кинетики холодной пристеночной плазмы, взаимодействия короткого лазерного импульса с плазмой, а также по исследованию спектров ридберговских атомов во внешних полях.

1. Kukushkin A. B. et al. Ballistic model of recycling of atomic and molecular hydrogen and its application to the ITER main chamber // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 2021. – Т. 63. – №. 3. – С. 035025;

2. Astapenko V. A., Lisitsa V. S., Yakovets A. V. Absorption of Ultrashort Laser Pulses by Diatomic Molecules // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2018. – Т. 127. – №. 6. – С. 1003-1008;

3. Letunov A., Lisitsa V. Spectra of a Rydberg Atom in Crossed Electric and Magnetic Fields // *Universe*. – 2020. – Т. 6. – №. 10. – С. 157.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– на созданной соискателем экспериментальной установке по лазерному охлаждению атомов  $^{40}\text{Ca}$  произведен захват в магнитооптическую ловушку  $3 \cdot 10^7$  атомов, температура которых составляет порядка 5 мК;

– с использованием неразрушающей ридберговские состояния методики, основанной на падении резонансной флуоресценции атомов в магнитооптической ловушке, проведена регистрация спектров переходов в  $n \text{ } ^1\text{S}_0$ -состояния атомов  $^{40}\text{Ca}$  для  $n$  от 40 до 120, по энергиям которых было определено значение потенциала ионизации, равное

49305,91966(4) см<sup>-1</sup>; полученный потенциал ионизации является самым точным на данный момент;

– впервые экспериментально получена ультрахолодная неидеальная плазма в стационарном режиме плотностью до 10<sup>6</sup> см<sup>-3</sup>; проведено исследование основных параметров ультрахолодной стационарной плазмы; показано, что радиус Дебая не превышает размеров исследуемой среды, параметр неидеальности может достигать 2, температура ионов составляет порядка 0,05 К;

– разработан чувствительный метод диагностики электрических полей, создаваемых разреженной ультрахолодной плазмой, на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция; показана возможность детектирования плазмы с плотностью ионов до 10<sup>3</sup> см<sup>-3</sup>.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– уточненное в работе значение порога ионизации атомов кальция-40 позволит проверить теоретический расчет энергий ридберговских переходов.

Практическое значение полученных соискателем результатов подтверждается тем, что:

– достижение рекордной точности измерения потенциала ионизации, значение которого составило 49305,91966(4) см<sup>-1</sup>, представляет интерес для баз атомных данных в аспекте энергии ридберговских переходов атомов кальция-40;

– исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до 10<sup>6</sup> см<sup>-3</sup> 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. Также изучение ультрахолодной неидеальной плазмы кальция позволит улучшить разрешающую способность ионных просвечивающих микроскопов путем создания плазмы с упорядоченной структурой.

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, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Оценка достоверности результатов исследования подтверждается проведением измерений на современном сертифицированном оборудовании при использовании проверенных ранее методик, анализом неопределенности измерений, согласием результатов, полученных различными методами, например, методом баллистического разлета атомов в пустоту и методом дифференциальной двухфотонной спектроскопии для оценки температуры атомов.

Личный вклад соискателя состоит в выполнении основного объема экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе. Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимала активное участие в расчете и создании вакуумной и оптической частей установки, реализации стационарной концентрации ультрахолодной плазмы кальция, а также анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных. Научный вклад автора является определяющим.

Апробация результатов исследования проводилась на 9 российских и международных конференциях. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Вильшанская Евгения Владимировна согласилась с техническими замечаниями и ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.

На заседании от 22.12.2021 г. диссертационный совет принял решение присудить за решение научной задачи, связанной с получением и исследованием ультрахолодной плазмы в стационарном режиме, имеющей значение для развития физики плазмы, Вильшанской Е.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 20 человек, из них очно: 10 докторов наук (6 по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 4 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), дистанционно: 10 докторов наук (5 по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

И.о. зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01

д.ф.-м.н., профессор



Храпак А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01

д.ф.-м.н.



Васильев М.М.



22.12.2021г.