

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета до 18 октября 2021 г. № 8

О присуждении Хабаровой Ксении Юрьевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников» по специальности 1.3.6 – Оптика принята к защите 28 июня 2021 года (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53 (ФИАН).

Соискатель Хабарова Ксения Юрьевна, 10 июня 1981 года рождения, в 2004 году окончила Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Физика».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Влияние легирования и длительного освещения на плотность электронных состояний в щели подвижности микрокристаллического и аморфного гидрированного кремния» защитила в 2006 году в диссертационном совете, созданном на базе Московского

государственного университета им. М.В. Ломоносова (диплом ДКН № 006832).
Хабарова К.Ю. с 2013 года работает в Физическом институте им. П.Н. Лебедева
РАН, в настоящее время в должности высококвалифицированного ведущего
научного сотрудника в Отделе спектроскопии Отделения оптики.

Диссертационная работа К.Ю. Хабаровой выполнена в Отделе
спектроскопии Отделения оптики Физического института им. П.Н. Лебедева
РАН.

Научный консультант – член корреспондент РАН, доктор физико-
математических наук Колачевский Николай Николаевич, директор
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический
институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

Головань Леонид Анатольевич, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики и молекулярной электроники Физического
факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего
образования «Московский государственный университет им. М.В.
Ломоносова», г.Москва,

Зеленер Борис Борисович, доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», г.
Москва;

Коробов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук,
заведующий сектором № 2 Научного отдела теории фундаментальных
взаимодействий Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Международной межправительственной организации «Объединенный институт
ядерных исследований», г. Дубна;

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт спектроскопии Российской академии наук», г. Москва, г. Троицк – в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, профессором Балыкиным Виктором Ивановичем, главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего лабораторией лазерной спектроскопии отдела лазерной спектроскопии, и доктором физико-математических наук Рябовым Евгением Артуровичем, главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего отделом спектроскопии, и утвержденном доктором физико-математических наук, профессором Задковым Виктором Николаевичем, директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт спектроскопии Российской академии наук», указала, что диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 149 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 38 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликована 21 работа.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем К.Ю. Хабаровой работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Хабарова К.Ю.**, Слюсарев С.Н., Стрелкин С.А., Белотелов Г.С., Костин А.С., Пальчиков В.Г., Колачевский Н.Н. Лазерная система для

вторичного охлаждения атомов стронция-87 //Квантовая электроника. - 2012. - Т. 42. - № 11. - С. 1021-1026.

2. Beyer A., Alnis J., **Khabarova K.**, Matveev A., Parthey C. G., Yost D. C., Pohl R., Udem Th., Haensch T.W., Kolachevsky N. Precision spectroscopy of the 2S-4P transition in atomic hydrogen on a cryogenic beam of optically excited 2S atoms //Annalen der Physik. – 2013. – Т. 525. – №. 8-9. – С. 671-679.

3. Стрелкин С.А., **Хабарова К.Ю.**, Галышев А.А., Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н.// Вторичное лазерное охлаждение атомов стронция-88 //Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2015. - Т. 148. - № 1. - С. 25-33.

4. Головизин А.А., Калганова Е.С., Сукачев Д.Д., Вишнякова Г.А., Семерилов И.А., Сошенко В.В., Трегубов Д.О., Акимов А.В., Колачевский Н.Н., **Хабарова К.Ю.**, Сорокин В.Н. Детектирование часового перехода (1.14 мкм) в ультрахолодных атомах тулия //Квантовая электроника. - 2015. - Т. 45. - № 5. - С. 482-485.

5. **Хабарова К.Ю.**, Галышев А.А., Стрелкин С.А., Костин А.С., Белотелов Г.С., Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. Спектроскопия интеркомбинационного перехода 1S_0 - 3P_1 для вторичного охлаждения атомов стронция //Квантовая электроника. - 2015. - Т. 45. - № 2. - С. 166-170.

6. Beyer A., Maisenbacher L., **Khabarova K.**, Matveev A., Pohl R., Udem T., Haensch T.W., Kolachevsky N. Precision spectroscopy of 2S-nP transitions in atomic hydrogen for a new determination of the Rydberg constant and the proton charge radius //Physica Scripta. – 2015. – Т. 2015. – №. T165. – С. 014030.

7. Sukachev D., Fedorov S., Tolstikhina I., Tregubov D., Kalganova E., Vishnyakova G., Golovizin A., Kolachevsky N., **Khabarova K.**, Sorokin V. Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks //Physical Review A. – 2016. – Т. 94. – №. 2. – С. 022512.

8. Beyer A., Maisenbacher L., Matveev A., Pohl R., **Khabarova K.**, Chang Y., Grinin A., Lamour T., Shi T., Yost D.C., Udem Th., Haensch T.W., Kolachevsky

N. Active fiber-based retroreflector providing phase-retracing anti-parallel laser beams for precision spectroscopy //Optics Express. – 2016. – Т. 24. – №.15. – С. 17470-17485.

9. Вишнякова Г.А., Головизин А.А., Калганова Е.С., Сорокин В.Н., Сукачев Д.Д., Трегубов Д.О., **Хабарова К.Ю.**, Колачевский Н.Н. Ультрахолодные лантаноиды: от оптических часов до квантовых симуляторов//Успехи физических наук. - 2016.- Т. 186. - № 2. - С. 176-182.

10. Головизин А.А., Калганова Е.С., Сукачев Д.Д., Вишнякова Г.А., Трегубов Д.О., **Хабарова К.Ю.**, Сорокин В.Н., Колачевский Н.Н. Методы определения поляризуемости уровней тонкой структуры основного состояния атомов тулия //Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47. - № 5. - С. 479-483.

11. Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Белотелов Г.С., Пальчиков В.Г., Стрелкин С.А., **Хабарова К.Ю.**, Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. Ультрастабильная лазерная система для спектроскопии часового перехода 1S_0 - 3P_0 в атомах Sr //Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47. - № 5. - С. 400-405.

12. **Хабарова К.Ю.**, Кудяров К.С., Колачевский Н.Н. Стандарты частоты на ультрахолодных атомах в тестах общей теории относительности, навигации и гравиметрии //Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47. - № 5. - С. 394-399.

13. Beyer A., Maisenbacher L., Matveev A., Pohl R., **Khabarova K.**, Grinin A., Lamour T., Yost D.C, Haensch T.W., Kolachevsky N., Udem T. The Rydberg constant and proton size from atomic hydrogen //Science. – 2017. – Т. 358. – №. 6359.– С. 79-85.

14. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., Sukachev D., **Khabarova K.**, Sorokin V., Kolachevsky N. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-8.

15. Трегубов Д. О., Головизин А. А., Калганова Е. С., **Хабарова К. Ю.**, Сорокин В. Н., Колачевский Н. Н. Магические длины волн в области 800 нм

для прецизионной спектроскопии внутриоболочечного перехода в атоме тулия //Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 11. – С. 1028-1031.

На автореферат поступили отзывы от доктора технических наук Пасынка Сергея Леонидовича, заведующего отделом определения параметров вращения Земли Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП ВНИИФТРИ), Московская область пос. Менделеево, и доктора технических наук, профессора Романова Алексея Александровича, советника генерального директора акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королев.

В отзыве доктора технических наук Пасынка С.Л. отмечается актуальность и важность тематики диссертационной работы, как для фундаментальных приложений, так и в метрологической практике – создания высокостабильных стандартов частоты, релятивистской геодезии, переопределении единицы времени. Отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов. В отзыве доктора технических наук Романова А.А. отмечается большое практическое значение полученных результатов и высокий уровень опубликованных работ.

В отзывах указано, что соискатель Хабарова К.Ю. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией и наличием признанных достижений в области лазерной спектроскопии, атомной физики и квантовой оптики.

Диссертационная работа Хабаровой К.Ю. посвящена исследованию однофотонных атомных переходов в атомах водорода, стронция и тулия методами прецизионной лазерной спектроскопии с использованием лазерных источников с ультрастабильной частотой излучения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности определения

абсолютных частот атомных переходов для уточнения значения фундаментальных физических констант, проведения тестов фундаментальных теорий, а также решения ряда прикладных задач таких, как совершенствование реперов частоты на основе атомов в оптических решетках. Такие фундаментальные константы, как постоянная Ридберга и зарядовый радиус протона, могут быть определены из спектроскопии переходов в атоме водорода, поэтому повышение точности таких экспериментов имеет большое значение.

В настоящее время в России и в мире стремительно развивается направление оптических реперов частоты на холодных атомах. Метрологические характеристики таких систем в большой степени определяются выбором часового перехода и спектральными характеристиками опрашивающего его лазерного излучения. Создание новых ультрастабильных лазерных систем для этих целей, а также поиск новых элементов для создания оптических реперов частоты актуально и имеет практическую значимость.

На основании выполненных соискателем исследований диссертационный совет отмечает следующие наиболее значимые научные результаты:

1. Создание и реализация высокоточного метода компенсации эффекта Доплера первого порядка в экспериментах по спектроскопии однофотонных переходов на основе активного волоконного ретрорефлектора.

2. Реализация метода компенсации искажения наблюдаемой формы линии, возникающего из-за эффекта квантовой интерференции, в экспериментах по спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода с использованием аппроксимирующей функции Фано-Фойгта.

3. Прецизионное измерение абсолютной частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода и получение новых значений постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона.

4. Реализация лазерного охлаждения ансамбля атомов стронция-88 до температур $2,5 \pm 1$ мК и магнитоиндуцированной спектроскопии часового перехода $^1S_0-^3P_0$ со спектральным разрешением 130 Гц.

5. Экспериментальное определение магической длины волны для часового магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия.

6. Определение чувствительности часового магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия к тепловому излучению.

Достоверность полученных результатов обоснована использованием поверенного измерительного оборудования, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласованностью с полученными впоследствии результатами других научных групп, а также с теоретическими предсказаниями и результатами численного моделирования.

Научная новизна выполненных соискателем Хабаровой К.Ю. исследований заключается в том, что в диссертации

- разработан и реализован оригинальный метод компенсации эффекта Доплера первого порядка на основе активного волоконного ретрорефлектора для экспериментов по спектроскопии однофотонных переходов;

- впервые теоретически и экспериментально исследован эффект квантовой интерференции, приводящий к искажению формы и сдвигу наблюдаемой линии при спектроскопии переходов с нерезонансным возбуждением удаленных состояний;

- в результате проведенных исследований получены новые достоверно обоснованные значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона;

- создана экспериментальная установка для спектроскопии часового перехода $^1S_0-^3P_0$ в атомах стронция-88 и реализована его магнитоиндуцированная спектроскопия;

- впервые теоретически и экспериментально определена дифференциальная поляризуемость уровней часового магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия в спектральном диапазоне 810-860 нм;

- впервые реализована спектроскопия часового перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия, захваченных в оптическую решетку на длине волны

813 нм со спектральным разрешением 10 Гц, для чего использована ультрастабильная лазерная система;

- впервые определено, что относительный сдвиг частоты часового перехода в атоме тулия излучением черного тела при комнатной температуре составляет $\Delta\nu^{\text{BBR}}/\nu = -2,3 \times 10^{-18}$, что в 2500 раз меньше сдвига частоты часового перехода в атоме стронция.

Научная новизна результатов подтверждается их приоритетной публикацией в ведущих рецензируемых журналах.

Полученные в диссертационной работе Хабаровой К.Ю. результаты могут найти практическое применение для решения широкого круга как фундаментальных, так и прикладных задач. В частности, уточнение значений постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона способствовало решению «загадки радиуса протона» и привело к пересмотру рекомендованных значений этих фундаментальных констант, что важно для повышения точности физических теорий и расчетов. Разработанные в работе методы компенсации систематических эффектов могут быть применены в различных экспериментах по спектроскопии атомных переходов, что также важно при решении широкого круга фундаментальных и прикладных физических задач. Результаты исследований узких однофотонных переходов в атомах стронция и тулия сыграли существенную роль в разработке оптических реперов частоты. Реализованный ФГУП ВНИИФТРИ с использованием полученных в диссертации результатов репер частоты на холодных атомах стронция был встроен в государственный эталон времени и частоты (ГЭТ1) и участвует в формировании национальной шкалы времени. Результаты исследования магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм являются важными для разработки транспортируемого оптического репера частоты, что открывает новые возможности для решения задач релятивистской геодезии, повышения точности геопозиционирования и глобальной спутниковой навигации.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Хабаровой К.Ю., получены лично автором либо под ее руководством и при ее

непосредственном участии. Анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка материалов к опубликованию производились автором лично или в сотрудничестве с соавторами.

В ходе защиты соискатель К.Ю. Хабарова детально и полно ответила на заданные ей вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 18 октября 2021 года диссертационный совет принял решение за существенный вклад в решение научной проблемы зарядового радиуса протона и уточнения постоянной Ридберга с использованием современных методов прецизионной спектроскопии однофотонных переходов, а также за создание технических и научных решений в области оптических стандартов частоты, внедрение которых внесло значительный вклад в обеспечение координатно-временного обеспечения РФ, присудить Хабаровой К.Ю. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.6. - Оптика), участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали

за присуждение ученой степени - 23,
против присуждения ученой степени - 0,
недействительных бюллетеней - 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,
профессор, д.ф.-м.н.

Ионин Андрей Алексеевич

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н.

Золотко Александр Степанович

18 октября 2021 г