

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Коробова Владимира Ивановича на диссертацию **Хабаровой Ксении Юрьевны** «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

В настоящее время тематика прецизионной спектроскопии ультрахолодных атомов занимает важное место в связи с открывающимися здесь уникальными экспериментальными возможностями, связанными с квантовыми технологиями, созданием прецизионных стандартов частоты, моделированием квантовых логических переходов и разработкой квантовых компьютеров. Рассматриваемая диссертация представляет собой пример исследования важной актуальной физической задачи: развитие ультрастабильных лазерных источников и их использование в прецизионной спектроскопии атома водорода и создании атомных часов на основе атомов стронция и тулия.

Исследование атомных систем — одна из актуальных задач современной физики, призванной углубить наше понимание о физическом устройстве мира. Даже самая простая атомная система — атом водорода, ставит перед исследователями вопросы, ответы на которые занимают многие годы и вовлекает ученых со всего мира. Так, в 2010 году в связи с неожиданными результатами лазерной спектроскопии мюонного водорода, возникла проблема зарядового радиуса протона, которая привела к длительному поиску новых поправок в теории и неучтенных систематических эффектов в экспериментах по рассеянию электронов на протоне и спектроскопии атома водорода. Зарядовый радиус протона и постоянная Ридберга (имеющие сильную взаимную корреляцию в определении значений этих констант) относятся к фундаментальным константам и точность их определения играет важную роль как для основ современной физики, так и в метрологии.

Целью диссертационной работы К.Ю. Хабаровой является повышение точности определения абсолютных частот однофотонных атомных переходов в экспериментах по лазерной спектроскопии атома водорода, стронция и тулия, что имеет важное значение как для решения фундаментальных физических задач, так и для практических применений. В частности

определение абсолютной частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода имело своей целью уточнение постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона, что внесло существенный вклад в решение проблемы зарядового радиуса протона. Исследование запрещенных переходов в атомах стронция и тулия помимо академического интереса носит важный практический характер, поскольку открывает возможность создания оптических реперов частоты с непревзойденной относительной точностью и стабильностью. Все вышеизложенное свидетельствует о важности исследования, проводимого в диссертации, и доказывает **актуальность** рассматриваемой нами работы.

Проводя анализ результатов диссертационной работы на предмет их обоснованности, новизны и достоверности необходимо отметить следующее. Полученные в работе новые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона из спектроскопии водорода были первым экспериментальным результатом, подтверждающим значение радиуса протона, полученное из спектроскопии мюонного водорода. При этом был обнаружен не рассматриваемый ранее в подобных экспериментах эффект квантовой интерференции, а также предложен метод его учета и компенсации на высоком уровне точности. Позднее результаты экспериментов по определению лэмбовского сдвига в водороде и спектроскопии перехода $1S-3S$ в водороде, проведенные другими экспериментальными группами, также подтвердили мюонное значение и привели к решению проблемы зарядового радиуса протона.

Проведенные исследования узких однофотонных переходов в атомах стронция привели к развитию в России направления оптических атомных часов и вывели ее на уровень, соответствующий мировому в данной области. Исследования атома тулия, проведенные в работе, являются пионерскими и открывают возможности для дальнейшего развития атомных часов уже в виде транспортируемых компактных устройств.

Все это подтверждает **новизну и достоверность** полученных в рамках диссертационной работы результатов.

Диссертация включает в себя введение, шесть основных глав и заключение, и изложена на 223 страницах, включающих 101 рисунок. Список литературы содержит 186 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цели и задачи, дано обоснование новизны и практической

значимости достигнутых результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена ключевому инструменту — ультрастабильным лазерным системам, которые были созданы, исследованы и использованы в работе. В главе описывается конструкция внешнего опорного оптического резонатора, по собственной моде которого осуществляется стабилизация частоты лазерного источника, приводится схема стабилизации, а также результаты исследования спектральных характеристик и характеристик нестабильности в работе лазерных систем.

Во **второй главе** описывается экспериментальная установка по спектроскопии атома водорода на криогенном пучке, включающая активный волоконный ретрорефлектор для подавления эффекта Доплера первого порядка. Приведены результаты исследования характеристик данной системы, а также оценки остаточного эффекта Доплера в эксперименте по спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода.

Третья глава посвящена исследованию эффекта квантовой интерференции, который в рассматриваемой схеме эксперимента является одним из лидирующих систематических эффектов. Описание эффекта приводится как в рамках теории возмущений, так и с применением полной модели резонансного профиля спектральной линии, учитывающей все возможные переходы с возбужденного $4P$ состояния. Анализируются результаты экспериментальных данных с численным моделированием. Приводятся значения остаточного вклада эффекта квантовой интерференции в погрешность определения абсолютной частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода.

В **четвертой главе** дан анализ других систематических эффектов, имеющих заметный вклад в бюджет ошибок при определении абсолютного значения частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода. Представлены результаты определения абсолютного значения частоты перехода $2S-4P$. Приводятся новые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона. Как уже упоминалось выше, результаты согласуются со значениями, полученными из спектроскопии мюонного водорода.

Пятая глава посвящена исследованию спектрально узких однофотонных переходов в атоме стронция. Описывается экспериментальная установка, особенности процессов лазерного охлаждения атомов стронция.

Представлены результаты экспериментов по спектроскопии перехода вторичного охлаждения в ячейке и магнито-оптической ловушке, реализации вторичного охлаждения и загрузки атомов в оптическую решетку, а также описывается эксперимент по магнитоиндуцированной спектроскопии часового перехода в четном изотопе атома стронция ^{88}Sr .

В **шестой главе** представлены результаты исследования внутриоболочечного M1 перехода на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия. Описаны особенности лазерного охлаждения атомов тулия. Здесь следует отметить обнаруженные и объясненные особенности работы магнито-оптической ловушки на узком переходе. Также в главе описывается процедура поиска магической длины волны для часового перехода в атоме тулия, которая ранее не была известна, а также экспериментальное подтверждение полученного значения. Наконец, основным результатом данной главы является подтверждение малой чувствительности часового перехода к излучению черного тела, и соответственно, малого сдвига за счет этого эффекта частоты часового перехода. Этот сдвиг является одним из основных препятствий для создания передвижных оптических часов с уровнем точности порядка 10^{-17} .

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует отметить, что она написана хорошим литературным языком, логически структурирована и представляет собой цельный и законченный научный труд. Полученные результаты имеют важное значение для большей части научного сообщества, включающего как экспериментальные группы, так и теоретические. Все основные результаты работы своевременно опубликованы, содержание автореферата соответствует содержанию текста диссертации, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.


По содержанию диссертации есть следующее **замечание**: Помимо измерения 2S-4P перехода в атоме водорода детально обсуждаемого в диссертации, были проведены независимые измерения перехода 1S-3S в лабораториях LKB (Париж) и MPQ (Гархинг), которые дали результаты по зарядовому радиусу протона противоречащие друг другу. Хотелось бы понять причину подобных расхождений, поскольку обе группы представляют весьма квалифицированные сообщества спектроскопистов. К моему

сожалению, обсуждения возможных причин расхождения этих результатов, я в диссертации не нашел.

Перечисленные недостатки никоим образом не уменьшают ценности работы К.Ю. Хабаровой. Работа производит хорошее впечатление своим высоким научным уровнем и сложностью проведенной работы, а также значимостью полученных результатов и заслуживает самой высокой оценки.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа К.Ю. Хабаровой «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года №335, а ее автор **Хабарова Ксения Юрьевна** безусловно заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Официальный оппонент: начальник сектора №2 Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, доктор физико-математических наук


Коробов Владимир Иванович.
« 14 » 08 2021 г.

141980 г. Дубна, Московская обл.

ул. Жолио-Кюри, 6

тел.: 8 (496) 216-31-79

e-mail: korobov@theor.jinr.ru

Подпись официального оппонента Коробова В.И. заверяю
Ученый секретарь ЛТФ А.В. Андреев



Список основных работ Коробова Владимира Ивановича по тематике диссертации К.Ю. Хабаровой в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. V.I.Korobov, L.Hilico, J.-Ph.Karr, Fundamental transitions and ionization energies of the hydrogen molecular ions with few ppt uncertainty. *Physical Review Letters* **118**, 233001(1-5), (2017).
2. S. Alighanbari, M.O. Hansen, V.I. Korobov, and S. Schiller, Rotational spectroscopy of cold and trapped molecular ions in the Lamb-Dicke regime. *Nature Physics* **14**, 555, (2018).
3. S. Alighanbari, O.S. Giri, F.L. Constantin, V.I. Korobov, S. Schiller, Precise test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with HD⁺ ions. *Nature* **581**, 152-158 (2020).
4. В.И. Коробов. Спектроскопия HD⁺: зарядовый радиус протона и постоянная Ридберга. *ЭЧАЯ* **51**, 808-817 (2020).
5. Sayan Patra, M. Germann, J.-Ph. Karr, M. Haidar, L. Hilico, V.I. Korobov, F.M.J. Cozijn, K.S.E. Eikema, W. Ubachs, J.c.J. Koelemeij, Proton-Electron Mass Ratio from Laser Spectroscopy of HD⁺ at the Part-Per-Trillion Level. *Science* **369**, 1238 (2020).