

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Головизин Артем Алексеевич

**ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ
ЧАСОВОГО МАГНИТОДИПОЛЬНОГО
ПЕРЕХОДА 1.14 МКМ В
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМАХ ТУЛИЯ**

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
Колачевский Николай Николаевич

Официальные оппоненты:

Пальчиков Виталий Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7))
Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

Городецкий Михаил Леонидович,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики колебаний физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Защита состоится «11» декабря 2017 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

Золотко А.С.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена прямому лазерному возбуждению и исследованию часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ на длине волны 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия, который может быть использован в качестве репера для построения оптического стандарта частоты.

Актуальность работы.

Стандарты частоты и времени различной точности используются во многих областях человеческой деятельности. Так, для бытовых нужд, где необходимо знать время с допустимой погрешностью несколько секунд или даже минут, используются обычные кварцевые и механические часы. В задачах передачи данных необходима синхронизация на уровне 1 нс и уже применяются стабилизированные кварцевые и другие диэлектрические осцилляторы или компактные микроволновые стандарты. В задачах глобального позиционирования [1] точность бортовых часов на спутниках поддерживается на уровне 12 – 14 знака с использованием микроволновых стандартов на атомах цезия и рубидия, а также водородных мазеров (см. например в [2]). И наконец, в сверхточных научных измерениях уже используются часы с погрешностью частоты на уровне единиц 17 знака и лучше [3–9].

В течение последних 50 лет атомные часы используются для определения секунды¹ и формирования международной шкалы времени, и на сегодняшний день точность первичных стандартов на фонтане атомов цезия составляет несколько единиц 16-го знака [10]. В связи с тем, что частота является наиболее точно измеримой физической величиной, ряд других физических величин могут быть определены путем измерения частоты или времени некоторого процесса. После фиксирования значения скорости света в 1983 году, равной 299 792 458 м/с, единица длины «метр» определяется как расстояние, прошедшее светом в вакууме за 1/299 792 458 с. Помимо этого, Международной Палатой Мер и Весов уже рекомендована практическая реализация единицы напряжения «вольт» на массивах джозефсоновских контактов, обеспечивающих относительную погрешность 10^{-9} , и в ближайшее время будут

¹Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 (www.bipm.org)

переопределены основные единицы системы SI через фундаментальные константы [11–13].

Оптические стандарты частоты в последнее десятилетие демонстрируют характеристики, превосходящие первичные цезиевые стандарты [6–8]. Для сличения удаленных оптических часов в настоящее время создается сеть волоконных оптических каналов, которая, в отличие от синхронизации с использованием GPS, позволит проводить сравнение часов практически без потери точности [14, 15]. Выход на уровень 18 знака в нестабильности и систематической погрешности современных оптических часов открывает новые возможности по улучшению современных технологий и появлению новых. В прикладных задачах использование оптических часов может значительно повысить точность глобального позиционирования как на Земле (GPS, ГЛОНАСС), так и в исследовательских миссиях в глубоком космосе [16]. Чувствительность таких часов к изменению гравитационного потенциала может быть использована для построения точного геоида [17–19] и в других геодезических целях. Микроволновый сигнал, генерируемый оптической фемтосекундной гребенкой, стабилизированной по оптическому стандарту [20, 21], демонстрирует наименьшие шумы частоты, что крайне востребовано для создания чувствительных радаров. Стабилизированная фемтосекундная гребенка также используется для точной калибровки астрономических спектрографов [4]. Проведение сравнения частоты различных атомных часов в течение продолжительного времени позволяет наложить ограничение на дрейф некоторых фундаментальных постоянных, таких как постоянная тонкой структуры α и отношение масс электрона и протона m_e/m_p [9]. Это далеко не полный список применения атомных, и в частности оптических, часов.

В настоящее время наибольший прогресс и распространение получили оптические часы на нейтральных атомах стронция [7, 22] и иттербия [23, 24], которые демонстрируют одни из лучших характеристик (полная систематическая погрешность $\leq 10^{-17}$), вместе со стандартами на ионах алюминия [8, 25] и иттербия [6]. Погрешность $10^{-15} - 10^{-16}$, сравнимую с первичными цезиевыми стандартами, демонстрируют часы на ансамблях нейтральных атомах магния, кальция и ртути, а также на одиночных ионах кальция, ртути и индия (обзоры [26, 27] и ссылки в них).

Несмотря на внушительные характеристики современных оптических часов, научным сообществом ведется поиск новых систем с лучшими характеристиками. Наиболее амбициозным проектом является поиск ядерного часового перехода на длине волны ~ 160 нм в атомах ^{229}Th , который по оценкам будет иметь погрешность на уровне 19 знака вследствие малой чувствительности ядерного перехода к внешним полям [28]. Помимо этого рассматривается возможность использования переходов в многозарядных ионах [29].

В нашей лаборатории ведется разработка и исследование стандарта частоты на магнитодипольном переходе $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия. Особенностью данного перехода, отличающего его от типично используемых в оптических часах интеркомбинационных переходов $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$, является то, что он происходит между подуровнями тонкой структуры основного состояния атома при перевороте спина неспаренного $4f$ -электрона. Наличие внешних, в сравнении с $4f$ оболочкой, заполненных $5s^2$, $5p^6$ и $6s^2$ электронных оболочек приводит к значительному экранированию $4f$ -электронов от внешних возмущений, что проявляется в малой чувствительности перехода к внешним полям и столкновениям с буферным газом [30, 31]. В частности ожидается, что для часового магнитодипольного перехода в атоме тулия сдвиг частоты при взаимодействии с среднеквадратичным электрическим полем теплового излучения будет на несколько порядков меньше, чем в стандартах на атомах иттербия и стронция.

В 2010 году в ФИАНе впервые было продемонстрировано лазерное охлаждение атомов тулия и захват в магнито-оптическую ловушку (МОЛ) на длине волны 410.6 нм [32]. Затем было осуществлено более глубокое охлаждение атомов тулия во вторичной магнито-оптической ловушке на длине волны 530.7 нм [33, 34]. Первичному и вторичному охлаждению атомов тулия посвящены диссертационные работы Сукачева Д.Д. [35] и Вишняковой Г.А. [36]. Помимо метрологических целей, описанных выше, атом тулия также интересен в исследовании магнитного диполь-дипольного взаимодействия в ультрахолодных атомах (см. н.р. [37, 38]) и в квантовых симуляциях вследствие большого дипольного момента атома в основном состоянии [34], равного $4\mu_B$, где μ_B — магнетон Бора.

Целью данной работы является экспериментальное изучение спектральных характеристик часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ в ультрахолодных атомах тулия и исследование его применимости в качестве репера для построения высокоточных оптических часов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Методом лазерного возбуждения зарегистрировать магнитодипольный переход 1.14 мкм в МОЛ.
2. Осуществить перегрузку атомов из МОЛ в оптическую решетку, сформированную лазерным пучком на длине волны 532 нм, с максимальной эффективностью.
3. Провести лазерную спектроскопию перехода 1.14 мкм в оптической решетке, измерить время жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$.
4. Теоретически исследовать динамическую и статическую поляризуемости часовых уровней и провести сравнение с экспериментальными результатами на длине волны 532 нм; выполнить анализ возможных источников сдвигов и погрешностей предлагаемого оптического репера частоты.

Научная новизна:

1. В магнито-оптической ловушке зарегистрировано возбуждение перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ в атомах тулия на длине волны 1.14 мкм со спектральной шириной контура линии ≤ 1 МГц.
2. Осуществлен перезахват 3×10^5 атомов тулия из МОЛ в оптическую решетку, сформированную лазерным пучком на длине волны 532 нм. При температуре облака атомов в МОЛ 20 мК эффективность перезахвата в оптическую решетку составляет 50 %.
3. Измерены частоты параметрических резонансов атомов тулия в оптической дипольной ловушке и оптической решетке, на основании которых получена оценка динамической поляризуемости основного уровня атома тулия на длине волны 532 нм.

4. Измерено время жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ в оптической решетке на длине волны 532 нм равное $\tau = 112(4)$ мс.
5. Рассчитаны динамические и статические поляризуемости часовых уровней атома тулия в интервале длин волн 400 – 1200 нм, предсказано положение магической длины волны вблизи 807 нм.
6. Получены оценки потенциальных систематических сдвигов и погрешностей частоты часового перехода в атоме тулия, суммарная относительная систематическая погрешность порядка 5×10^{-18} .

Практическая значимость

Проведенные эксперименты по изучению часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ в магнито-оптической ловушке, эффективной перегрузке атомов тулия в оптическую дипольную ловушку и оптическую решетку на длине волны 532 нм и спектроскопии часового перехода в ней являются необходимыми шагами на пути создания оптического репера частоты на переходе 1.14 мкм в атоме тулия. Результаты измерения времени жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ и теоретических расчетов потенциальных систематических сдвигов и погрешностей частоты часового перехода показывают возможность достижения относительной систематической погрешности меньше 5×10^{-18} . Этот результат соответствует современному мировому уровню.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зарегистрирован магнитодипольный переход $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ на длине волны 1.14 мкм прямым лазерным возбуждением в ультрахолодных атомах тулия. Спектральная ширина линии перехода составила порядка 1 МГц в связи с неустранимым в условиях МОЛ уширением.
2. Достигнута эффективность перезахвата атомов тулия из МОЛ в оптическую решетку, сформированную лазерным пучком на длине волны 532 нм, на уровне 50 %.
3. Время жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ в оптической решетке на длине волны 532 нм равно 112(4) мс.

4. Полная относительная систематическая погрешность оптической частоты предложенного часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ в атоме тулия может достигать 5×10^{-18} .

Личный вклад. Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены автором лично на международных и российских научных конференциях и школах: IV симпозиум UEC-MIPT, 15-22 октября 2014 года, Токио, Япония; XV школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», 16-20 ноября 2014 года, Москва; ИЛФИ-2015, IX Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 21-24 апреля 2015 года, Саров; ICQT-2015, Третья международная конференция по квантовым технологиям, 13-17 июля 2015 года, Москва; IWQO-2015, XII Международные чтения по квантовой оптике, 11-16 августа 2015 года, Москва, Троицк; III симпозиум UEC-MIPT, 20-23 октября 2015 года, Москва; MPLP-2016, VII международный симпозиум и школа для молодых ученых «Современные проблемы лазерной физики», 22-28 августа 2016 года, Новосибирск; ICONO-2016, Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, 26-30 сентября 2016 года, Минск, Беларусь; III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 24-27 января 2017 года, Москва. Работа «Детектирование часового перехода с длиной волны 1.14 мкм в ансамбле ультрахолодных атомов тулия» авторов Головизин А.А., Калганова Е.С., Вишнякова Г.А. и Трегубов Д.О. была удостоена премии Н.Г. Басова на конкурсе молодежных научных работ УНК ФИАН в 2015 году.

Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 17.

Содержание работы

Во **введении** проводится краткий обзор атомных оптических часов и обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы по изучению характеристик часового перехода

$|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ в ультрахолодных атомах тулия, формулируются цель исследования, научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе рассмотрена энергетическая структура и схема лазерного охлаждения атома тулия. В п. 1.1 приведены основные характеристики часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$, в частности тонкая и сверхтонкая структура часовых уровней (п. 1.1.1) и история исследования данного перехода (п. 1.1.2). В п. 1.1.3 представлены результаты расчета вероятности перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ $W = 2\pi \times 1.6 \text{ с}^{-1}$, которая определяется скоростью магнитодипольного перехода; в п. 1.1.4 найдена чувствительность частоты рассматриваемого перехода к изменению постоянной тонкой структуры $\delta\nu_{clock}/\nu_{clock} = 2\delta\alpha/\alpha$.

В п. 1.2 изложена схема лазерного охлаждения атомов тулия, захват атомов в первичную, а затем во вторичную магнито-оптическую ловушку (МОЛ).

Вторая глава посвящена регистрации часового перехода в атомах тулия в МОЛ.

В п. 2.1 описан метод регистрации слабых переходов по уменьшению числа атомов в МОЛ при резонансе пробного излучения, который основан на том, что атом, возбудившись на метастабильный уровень, перестает взаимодействовать с охлаждающим излучением и более не удерживается в МОЛ.

В связи со значительным отличием естественной ширины часового перехода ($\sim 1 \text{ Гц}$) от величины доплеровского и зеемановского уширений перехода в МОЛ ($\sim 1 \text{ МГц}$), а также с невысокой точностью, с которой известна его частота ($\sim 1 \text{ ГГц}$) было проведено моделирование динамики числа атомов в МОЛ в присутствии излучения часового лазера. Результаты моделирования представлены в п. 2.2. Показано, что в условиях, достижимых в нашем эксперименте, при попадании частоты излучения часового лазера в точный резонанс ожидается уменьшение числа атомов в МОЛ более чем на 50 % (см. рис. 1).

В п. 2.3 представлены результаты двух экспериментов по регистрации часового перехода в ультрахолодных атомах тулия в МОЛ. В первом эксперименте сканирование частоты излучения часового лазера производилось вруч-

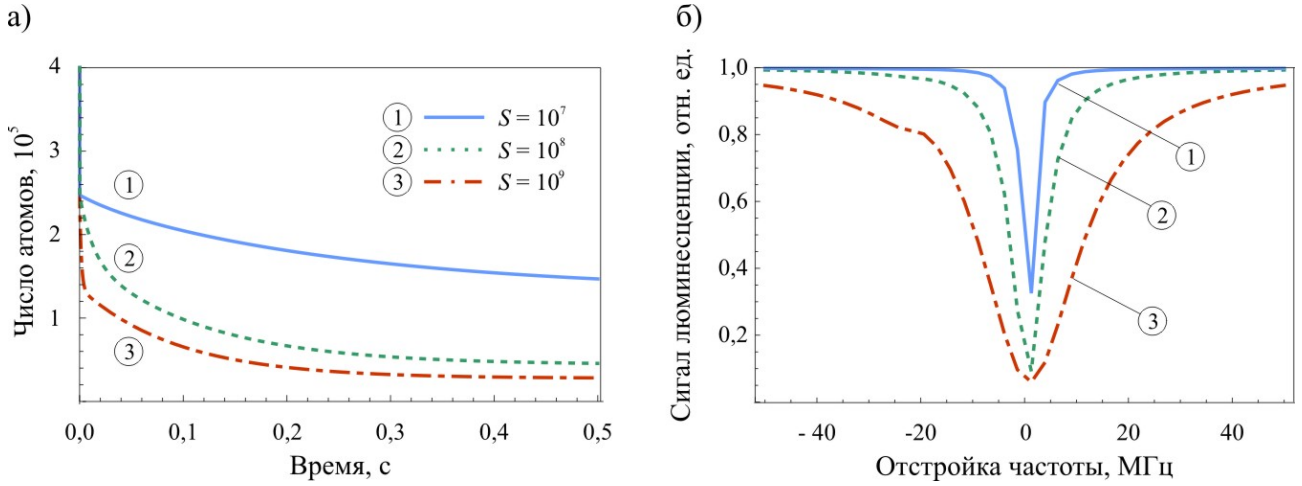


Рис. 1 — Результаты моделирования трехуровневой системы. а) Численный расчет динамики изменения населенности уровня $|2\rangle$ для трех значений параметра насыщения часового перехода $s = 10^7, 10^8, 10^9$; начало отсчета времени – включение излучения часового лазера. б) Моделирование сигнала люминесценции атомов в МОЛ в зависимости от отстройки часового лазера от точного резонанса. Параметры расчетов: $s_1 = 1$, $\delta_1 = -2\Gamma_1$, $\Gamma_1 = 2\pi \times 10^7 \text{ с}^{-1}$, $\Gamma_2 = 2\pi \times 1.6 \text{ с}^{-1}$, $\tau_{vac} = 2 \text{ с}$, $\gamma_{leak} = 30 \text{ с}^{-1}$, $\kappa = 10^6$, $\Delta_0 = 2\pi \times 10^3 \text{ с}^{-1}$.

ную путем изменения напряжения на пьезокерамике, смещающей дифракционную решетку резонатора лазера. После обнаружения резонанса часовой лазер был стабилизирован по высокочастотному ULE-резонатору вблизи частоты часового перехода. Во втором эксперименте частота излучения часового лазера сканировалась акусто-оптическим модулятором вблизи резонанса, и были получены контуры линий часового перехода в зависимости от мощности пробного излучения. Минимальная ширина регистрируемого контура составила ~ 1 МГц, что обусловлено неустранимым в условиях МОЛ уширением.

В третьей главе рассмотрена загрузка атомов в оптическую дипольную ловушку и спектроскопия часового перехода в ней.

В п. 3.1 обсуждается модель оптической дипольной ловушки, приведены формулы для глубины и скорости рассеяния атомом излучения дипольной ловушки. Здесь же вводится понятие «красной» и «синей» дипольных ловушек.

В п. 3.2 проанализирована эффективность перегрузки атомов из МОЛ в оптическую дипольную ловушку и оптическую решетку. Показано, что основными факторами, определяющими эффективность перегрузки, являются соотношение глубины ловушки и температуры облака атомов в МОЛ и коэффициент пространственного перекрытия дипольной ловушки и облака ато-

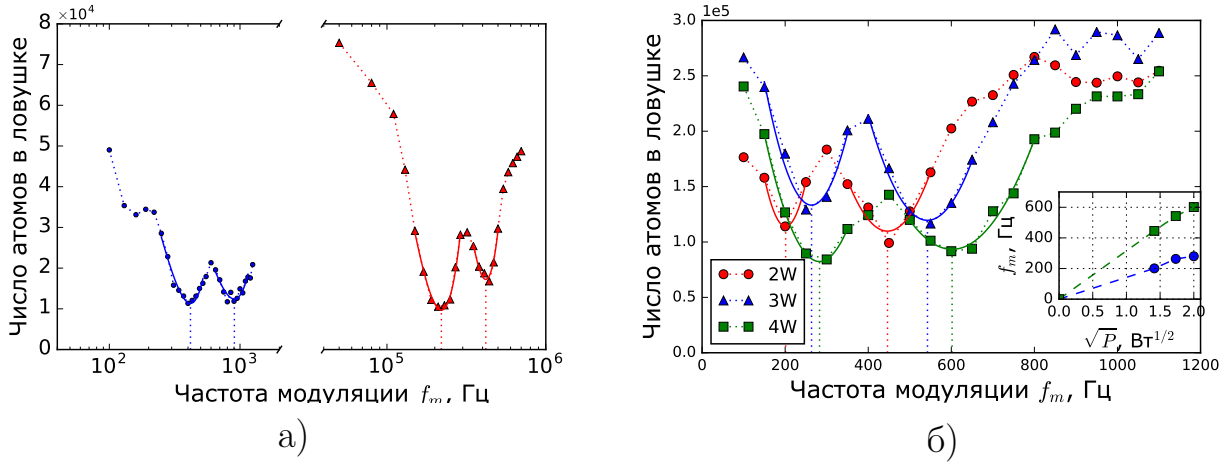


Рис. 2 — а) Спектры параметрических резонансов в оптической решетке в поперечном (синие точки) и продольном (красные) направлениях при $P = 4$ Вт мощности излучения оптической решетки; б) спектры резонансов в одномерной дипольной ловушке при $P = 2, 3, 4$ Вт. Сплошные линии - аппроксимации экспериментальных точек вблизи резонанса параболой для нахождения резонансной частоты. Вставка на рисунке (б) показывает зависимость положения первой (синие кружки) и второй (зеленые квадраты) гармоник колебательных частот от $\sqrt{P}$.

мов. После этого приведены результаты экспериментов по перегрузке атомов в одномерную и двумерную оптические дипольные ловушки, сформированные лазерным пучком на длине волны 532 нм, (эффективность перегрузки достигает 10% и 20% соответственно) и в одномерные оптические решетки, сформированные лазерными пучками на длине волны 532 нм либо 806 нм, п. 3.2.1, (50% и 5% соответственно). Загрузка атомов тулия в оптическую решетку на длине волны 806 нм интересна тем, что вблизи нее ожидается нахождение «магической» длины волны (подробнее в гл. 4).

В п. 3.3 описан метод определения динамической поляризуемости атома тулия из экспериментальных спектров параметрического возбуждения колебаний атомов в одномерной оптической дипольной ловушке и оптической решетке на длине волны 532 нм. Для определения собственных колебательных частот атомов тулия в ловушке колебания возбуждались параметрически путем гармонической модуляции глубины ловушки. Спектры продольных и поперечных параметрических резонансов в оптической дипольной ловушке и оптической решетке на длине волны 532 нм приведены на рисунке 2.

Воспользовавшись приближением гармонического потенциала ловушки и результатами п. 3.1, можно выразить динамическую поляризуемость основного уровня атома на длине волны оптической ловушки (532 нм) через собственные частоты колебаний. Используя измеренные собственные частоты

колебаний находим $\alpha_g = 380_{-200}^{+300}$ а. е., что совпадает в пределах погрешности с теоретически рассчитанным значением 580 а. е.

В п. 3.4 приведены результаты измерения контура линии часового перехода в оптической решетке на длине волны 532 нм. В п. 3.4.1 описан эксперимент по наблюдению уширения линии часового перехода при увеличении мощности излучения часового лазера. В п. 3.4.2 исследовано влияние излучения оптической решетки на спектральный контур линии часового перехода. На рисунке 3 приведены зависимости положения центра и ширины контура линии часового перехода от мощности лазерного пучка, формирующего оптическую решетку. Из этих данных можно оценить дифференциальную поляризуемость часовых уровней атома тулия на длине волны оптической решетки $\Delta\alpha^s \equiv \alpha_g^s - \alpha_u^s = 85_{-25}^{+30}$ а. е. Используя полученное ранее значение $\alpha_g^s = 380_{-200}^{+300}$ а. е. скалярной поляризуемости основного уровня, значение поляризуемости верхнего уровня равно $\alpha_u^s = 295_{-200}^{+300}$ а. е., что согласуется в пределах погрешности с рассчитанным значением 215 а. е. Описанные в п. 3.4.3 эксперименты по спектроскопии часового перехода при наличии постоянного внешнего магнитного поля свидетельствуют о заселенности всех магнитных подуровней основного уровня после перегрузки атомов из МОЛ в оптическую решетку, что указывает на необходимость накачки на заданный магнитный подуровень в будущих экспериментах.

В п. 3.5 представлены результаты измерения времени жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ в оптической решетке на длине волны 532 нм. Полученное значение $\tau = 112(4)$ мс накладывает ограничение сверху на скорость спонтанного распада верхнего часового уровня, равное $2\pi \times 1.4 \text{ с}^{-1}$, что совпадает с теоретическим значением $2\pi \times 1.1 \text{ с}^{-1}$ (см. п. 1.1.3).

В четвертой главе произведен анализ сдвигов частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия. В п. 4.1 рассмотрено взаимодействие атома с внешним электрическим полем. В п. 4.1.1 обсуждаются методы расчета атомных поляризуемостей. В п. 4.1.2 описано вычисление вклада дискретного спектра в диапазоне длин волн 400-1200 нм в рамках второго порядка теории возмущений на основе 1) экспериментальных и 2) рассчитанных с использованием программного пакета COWAN данных о частотах и силах переходов. В п. 4.1.3 приведены результаты расчета вклада непрерывного спектра в скаляр-

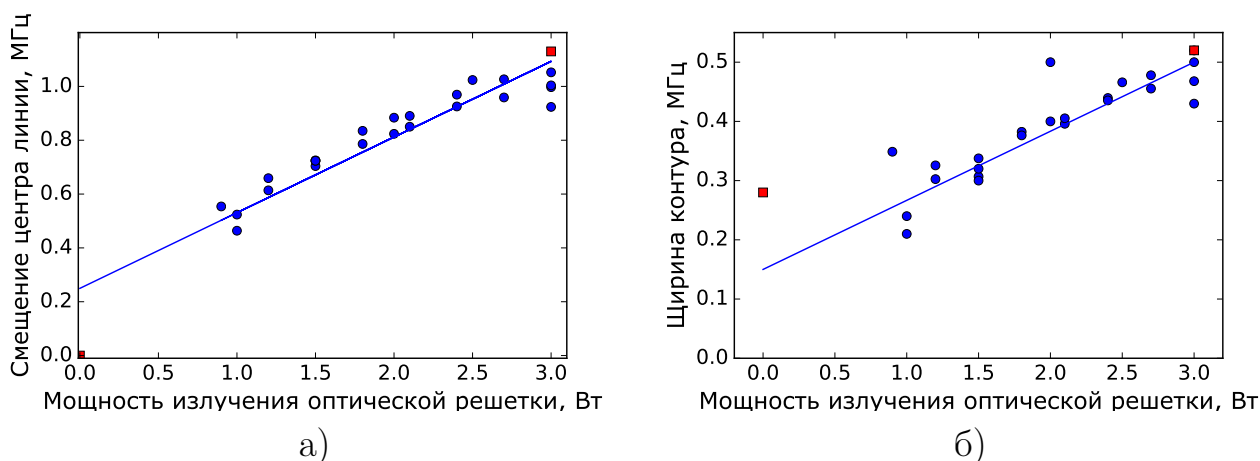


Рис. 3 — а) Положение и б) ширина контура линии часового перехода в зависимости от мощности оптической решетки.

ные поляризуемости часовых уровней. Далее в п. 4.1.4 выполняется сравнение проведенных расчетов статической поляризуемости часовых уровней с данными, доступными в литературе. Полученные нами и другими авторами значения поляризуемостей согласуются в пределах 10%, что является хорошим результатом для атомов с незаполненной внутренней электронной оболочкой и служит подтверждением правильности наших вычислений. На основе рассчитанного спектра динамических поляризуемостей часовых уровней была выделена область 806-812 нм, в которой ожидается пересечение кривых поляризуемостей вследствие наличия слабых переходов с верхнего часового уровня, и, соответственно, наличие «магических» длин волн (рис. 4.а). В п. 4.1.5 выполнен более подробный анализ атомных поляризуемостей в этом диапазоне, получены глубина и скорость рассеяния излучения дипольной ловушки атомами. Проведенные расчеты указывают на возможность создания оптической решетки на магических длинах волн 807.67 нм и 811.25 нм. В п. 4.1.6 представлены результаты расчета гиперполяризуемости часовых уровней в диапазоне длин волн 806-812 нм (рис. 4.б). В п. 4.1.7 проанализированы сдвиги частоты часового перехода за счет взаимодействия атома с излучением оптической решетки на магической длине волны 811.25 нм. Показано, что связанные с ними погрешности можно контролировать на уровне 0.5 мГц или 2×10^{-18} в относительных единицах.

В п. 4.2 рассмотрены магнитные взаимодействия. В п. 4.2.1. проведен анализ магнитного диполь-дипольного взаимодействия между атомами тулия. Показано, что для устранения сдвига частоты часового перехода, вы-

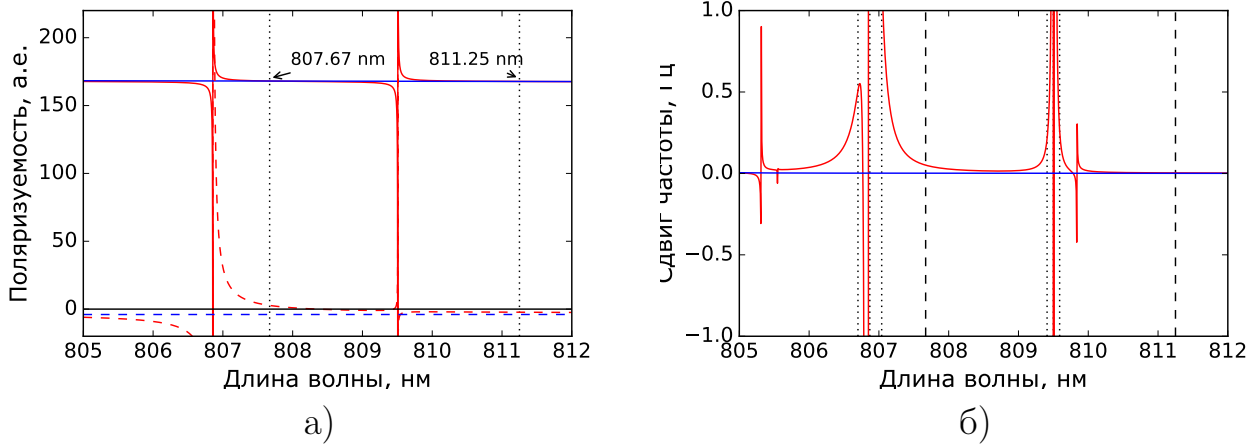


Рис. 4 — Спектр поляризуемости (а) и гиперполяризуемости (б) часовых уровней $|J = 7/2, F = 4, m_F = 0\rangle$ и $|J = 5/2, F = 3, m_F = 0\rangle$ в диапазоне длин волн 806-812 нм. Синяя линия — нижний уровень, красная — верхний. Интенсивность излучения $I = 50 \text{ кВт/см}^2$.

званного магнитным диполь-дипольным взаимодействием, необходимо, во-первых, удерживать атомы в двумерной оптической решетке с коэффициентом заполнения не более 1, и, во-вторых, накачивать атомы на магнитный подуровень $|m_F = 0\rangle$ и проводить спектроскопию перехода $|m_F = 0\rangle \rightarrow |m'_F = 0\rangle$. В такой конфигурации сдвиг частоты строго равен нулю, однако диполь-дипольное взаимодействие приводит к деполаризации атомного ансамбля с характерным временем $\sim 10 \text{ мс}$. Учитывая время жизни верхнего уровня 112 мс, оптимальное время взаимодействия атомного ансамбля с часовым излучением составит порядка 10 мс, таким образом диполь-дипольная релаксация не приводит к ограничению времени взаимодействия атомов с пробным излучением. В п. 4.2.2 рассмотрено взаимодействие атома тулия с внешним магнитным полем в приближении LS -связи. Для перехода $|F = 4, m_F = 0\rangle \rightarrow |F = 3, m_F = 0\rangle$ линейный эффект Зеемана отсутствует, коэффициент разложения при квадратичном члене равен $\beta = -257.2 \text{ Гц/Гс}^2$, относительно большая величина которого связана с малым сверхтонким расщеплением часовых уровней. При внешнем магнитном поле $B_0 = 10.0(0.1) \text{ мГс}$ погрешность зеемановского сдвига будет равна 0.5 мГц или 2×10^{-18} в относительных единицах.

В п. 4.3 проведены расчеты сдвига частоты часового перехода за счет взаимодействия атома с тепловым излучением. Вследствие малой дифференциальной статической поляризуемости часовых уровней этот сдвиг при температуре 300(3) К равен $\Delta\nu_{clock}^{statBRR} = 20.0(0.8) \text{ мГц}$, или $8.0(0.3) \times 10^{-17}$ в

относительных единицах, что на 1.5 – 2 порядка меньше чем в атомах стронция и иттербия и уступает только стандарту на ионах Al^+ [27, 39].

В п. 4.4 рассмотрены другие источники возможных сдвигов и погрешностей частоты часового перехода, в частности вследствие ван дер Ваальсовского (п. 4.4.1) и квадрупольного (п. 4.4.2) взаимодействий и эффекта затягивания линии (п. 4.4.3). Показано, что их вклад значительно меньше 1 МГц.

В п. 4.5 представлен итоговый бюджет систематических ошибок предлагаемого стандарта частоты на переходе 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия в двумерной оптической решетке на длине волны 811 нм с суммарной относительной погрешностью 5×10^{-18} .

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Путем стабилизации частоты излучения полупроводникового лазера на квантовых точках на длине волны 1.14 мкм к высокочастотному ULE-резонатору достигнуто сужение спектральной ширины линии генерации лазера не хуже 100 Гц и долговременная стабильность частоты на уровне 1 МГц/день.
2. Впервые был зарегистрирован часовой переход в атомах тулия $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ в магнито-оптической ловушке на длине волны 1.14 мкм по уменьшению числа атомов в ловушке при резонансе; наблюдалась спектральная ширина контура линии ≤ 1 МГц, обусловленная уширением излучением и градиентным магнитным полем МОЛ.
3. Собрана оптическая схема для создания одномерной и двумерной оптических дипольных ловушек и одномерной оптической решетки на длине волны 532 нм. Осуществлен перезахват атомов тулия из МОЛ в одномерную и двумерную оптические дипольные ловушки и оптическую решетку с эффективностью перезахвата 10 %, 20 % и 50 % соответственно, начальная температура и число атомов в МОЛ 20 мК и 3×10^6 соответственно.
4. Определены динамические скалярные поляризуемости верхнего и нижнего часовых уровней атома тулия на длине волны 532 нм. Поляризуемость нижнего уровня получена из измерений спектров параметрических резонансов атомов тулия в оптической дипольной

ловушке и оптической решетке на длине волны 532 нм, возбуждение которых проводилось путем гармонической модуляции мощности излучения, формирующего ловушки; поляризуемость верхнего уровня найдена из измерений сдвига частоты часового перехода в оптической решетке в зависимости от мощности формирующего ее излучения и полученного ранее значения поляризуемости нижнего уровня. Значения поляризуемостей в пределах погрешности измерений совпадают с рассчитанными теоретически.

5. Измерено время жизни верхнего часового уровня $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle$ в оптической решетке на длине волны 532 нм $\tau = 112(4)$ мс. В эксперименте регистрировалась доля атомов, распавшихся с верхнего часового уровня на нижний, в зависимости от времени после возбуждения атомов резонансным излучением 1.14 мкм на верхний часовой уровень.
6. Проведен расчет и анализ динамических и статических поляризуемостей часовых уровней атома тулия, предсказано положение двух магических длин волн вблизи 807 нм и малая ($\Delta\alpha^s < 2$ а.е.) дифференциальная статическая скалярная поляризуемость часовых уровней.
7. Получены оценки потенциальных сдвигов и систематических погрешностей частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия не более 5×10^{-18} отн. ед. Основной вклад вносят сдвиги частоты вследствие взаимодействия атома с тепловым излучением, внешним магнитным полем (квадратичный эффект Зеемана) и оптической решеткой (гиперполяризуемость).

В **приложении** дан краткий обзор развития стандартов частоты и времени, представлены основные технологии, позволившие создать современные оптические стандарты частоты, коротко описаны передовые оптические часы, их применение и перспективы развития.

Публикации автора по теме диссертации

Научные журналы, входящие в базу данных *Web of Science*:

1. А.А. Головизин, Е.С. Калганова, Д.Д. Сукачев, Г.А. Вишнякова, И.А. Семериков, В.В. Сошенко, Д.О. Трегубов, А.В. Акимов, Н.Н. Колачевский, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин / Детектирование часового перехода (1.14 мкм) в ультрахолодных атомах тулия // *Квантовая электроника*. — 2015. — Т. 45, № 5 — с. 482-485.
2. D. Sukachev, S. Fedorov, I. Tolstikhina, D. Tregubov, E. Kalganova, G. Vishnyakova, A. Golovizin, N. Kolachevsky, K. Khabarova, V. Sorokin / Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks // — *Physical Review A*. — 2016. — Vol. 94, Iss. 2 — p. 022512-022524.
3. А.А. Головизин, Е.С. Калганова, Д.Д. Сукачев, Г.А. Вишнякова, Д.О. Трегубов, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский / Методы определения поляризуемости уровней тонкой структуры основного состояния атомов тулия // *Квантовая электроника*, — 2017. — Т. 47, № 5 — с. 479-483.

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. А.А. Головизин / Регистрация магнито-дипольного перехода на 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия // XV школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» — М.:ФИАН — Москва — 2014 — с.92
2. A. Golovizin, E. Kalganova, D. Sukachev, G. Vishnyakova, D. Tregubov, S. Fedorov, A. Akimov, N. Kolachevsky, K. Khabarova, V. Sorokin / First investigation of the potentially clock transition in ultracold thulium atoms // ICQT-2015, Третья международная конференция по квантовым технологиям — Москва — 2015 — с.89
3. A. Golovizin, E. Kalganova, D. Sukachev, G. Vishnyakova, D. Tregubov, S. Fedorov, A. Akimov, N. Kolachevsky, K. Khabarova, V. Sorokin / Detection of 1.14 μm magnetic dipole transition in ultracold thulium

// IWQO-2015, XII Международные чтения по квантовой оптике — Москва, Троицк — 2015 — с.141

4. A. Golovizin, E. Kalganova, D. Tregubov, G. Vishnyakova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Cold Thulium atoms spectroscopy in optical dipole trap // MPLP-2016, VII международный симпозиум и школа для молодых ученых «Современные проблемы лазерной физики» — Новосибирск — 2016 — с.156
5. А.А. Головизин, Е.С. Калганова, Г.А. Вишнякова, Д.О. Трегубов, Д.Д. Сукачев, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский / Тулий: охлаждение и спектроскопия // LaPlas-2017, III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии». Программа— Москва — 2017 — с.277

Список литературы

1. Lewandowski W., Arias E.F. / GNSS times and UTC // *Metrologia*. — 2011. — Vol. 48, no. 4. — Pp. S219–S224.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. Н.Н. Калачевского. — М.: Физматлит, 2009.
3. Rosenband T., Hume D.B., Schmidt P.O. et al. / Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place // *Science*. — 2008. — Vol. 319, no. 5871. — Pp. 1808–1812.
4. Ycas G.G., Quinlan F., Diddams S.A. et al. / Demonstration of on-sky calibration of astronomical spectra using a 25 GHz near-IR laser frequency comb // *Optics Express*. — 2012. — Vol. 20, no. 6. — Pp. 6631–6643.
5. Schiller S., Görlitz A., Nevsky A. et al. / The space optical clocks project: development of high-performance transportable and breadboard optical clocks and advanced subsystems // European Frequency and Time Forum (EFTF), 2012 / IEEE. — 2012. — Pp. 412–418.
6. Huntemann N., Sanner C., Lipphardt B. et al. / Single-Ion Atomic Clock with 3x10⁻¹⁸ Systematic Uncertainty // *Physical Review Letters*. — 2016. — Vol. 116, no. 6. — P. 063001. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.063001>.
7. Nicholson T.L., Campbell S.L., Hutson R.B. et al. / Systematic evaluation of an atomic clock at 2x10⁻¹⁸ total uncertainty. // *Nature communications*. — 2015. — Vol. 6. — P. 6896. — URL: <http://www.nature.com/ncomms/2015/150421/ncomms7896/full/ncomms7896.html>.
8. Chen J.S., Brewer S.M., Chou C.W. et al. / Sympathetic Ground State Cooling and Time-Dilation Shifts in an 27Al⁺ Optical Clock // *Physical Review Letters*. — 2017. — Vol. 118, no. 5. — P. 053002. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.053002>.
9. Yamanaka K., Ohmae N., Ushijima I. et al. / Frequency Ratio of 199Hg and 87Sr Optical Lattice Clocks beyond the SI Limit // *Physical Review Letters*. — 2015. — Vol. 114, no. 23. — P. 230801. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.230801>.

10. Lombardi M.A., Heavner T.P., Jefferts S.R. / NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second // *NCSL International Measure*. — 2007. — Vol. 2, no. 4. — P. 74.
11. Jeanneret B., Benz S.P. / Application of the Josephson effect in electrical metrology // *European Physical Journal: Special Topics*. — 2009. — Vol. 172, no. 1. — Pp. 181–206.
12. von Klitzing K. / Metrology in 2019 // *Nature Physics*. — 2017. — Vol. 13. — P. 2019.
13. Milton M.J.T., Davis R., Fletcher N. / Towards a new SI: a review of progress made since 2011 // *Metrologia*. — 2014. — Vol. 51, no. 3. — Pp. R21–R30. — URL: <http://stacks.iop.org/0026-1394/51/i=3/a=R21?key=crossref.cc5ad60a399ab431ee6cb242665f03c1>.
14. Predehl K., Grosche G., Raupach S.M.F. et al. / A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place // *Science*. — 2012. — Vol. 336, no. 6080. — Pp. 441–444. — URL: <http://science.sciencemag.org/content/336/6080/441.abstract>.
15. Riehle F. / Optical clock networks // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11, no. 1. — Pp. 25–31. — URL: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nphoton.2016.235>.
16. Schiller S., Tino G.M., Gill P. et al. / Einstein Gravity Explorer—a medium-class fundamental physics mission // *Experimental astronomy*. — 2009. — Vol. 23, no. 2. — Pp. 573–610.
17. Chou C.W., Hume D.B., Rosenband T., Wineland D.J. / Optical Clocks and Relativity // *Science*. — 2010. — Vol. 329. — Pp. 1630–1633.
18. Cao J., Zhang P., Shang J. et al. / A transportable $^{40}\text{Ca}^+$ single-ion clock with 7.7×10^{-17} systematic uncertainty // *arXiv preprint arXiv:1607.03731*. — 2016. — Pp. 1–10. — URL: <http://arxiv.org/abs/1607.03731>.
19. Koller S.B., Grotti J., Al-Masoudi A. et al. / Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty S. // *Physical Review Letters*. — 2017. — Vol. 116, no. 6. — P. 063001. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.063001>.

20. Fortier T. M., Kirchner M. S., Quinlan F. et al. / Generation of Ultrastable Microwaves via Optical Frequency Division // *Nature Photonics*. — 2011. — Vol. 5, no. 7. — Pp. 425–429. — URL: <http://arxiv.org/abs/1101.3616>.
21. Xie X., Bouchand R., Nicolodi D. et al. / Photonic microwave signals with zeptosecond level absolute timing noise // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11, no. 1. — Pp. 44–47. — URL: <http://arxiv.org/abs/1610.01445>.
22. Ushijima I., Takamoto M., Das M. et al. / Cryogenic optical lattice clocks // *Nature Photonics*. — 2015. — Vol. 9, no. February. — Pp. 1–5. — URL: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nphoton.2015.5>.
23. Nemitz N., Ohkubo T., Takamoto M. et al. / Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time // *Nature Photonics*. — 2016. — Vol. 10, no. 4. — Pp. 258–261. — URL: <http://www.readcube.com/articles/10.1038/nphoton.2016.20>.
24. Schioppo M., Brown R.C., McGrew W.F. et al. / Ultra-stable optical clock with two cold-atom ensembles // *Nature*. — 2017. — Vol. 11. — Pp. 48–82. — URL: <http://arxiv.org/abs/1607.06867>.
25. Chou C.W., Hume D.B., Koelemeij J.C.J. et al. / Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al Optical Clocks // *Physical Review Letters*. — 2010. — Vol. 104, no. 7. — P. 070802.
26. Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J. et al. / Optical Atomic Clocks // *Reviews of Modern Physics*. — 2015. — Vol. 87, no. 2. — P. 637. — URL: <http://arxiv.org/abs/1407.3493>.
27. Poli N., Oates C.W., Gill P., Tino G.M. / Optical atomic clocks // *arXiv preprint arXiv:1401.2378*. — 2014. — P. 1.
28. Campbell C.J., Radnaev A.G, Kuzmich A. et al. / A Single-Ion Nuclear Clock for Metrology at the 19 // *Physical Review Letters*. — 2012. — Vol. 108, no. 12. — P. 120802.
29. Yudin V.I., Taichenachev A.V., Derevianko A. / Magnetic-Dipole Transitions in Highly Charged Ions as a Basis of Ultraprecise Optical Clocks // *Physical Review Letters*. — 2014. — Vol. 113, no. 23. — P. 233003.

30. Ishikawa K., Hatakeyama A., Gosyono-o K. et al. / Laser spectroscopy of thulium atoms implanted in liquid and solid ^4He // *Physical Review B*. — 1997. — Vol. 56, no. 2. — Pp. 780–787. — URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.56.780>.
31. Александров Е.Б., Котылев В.Н., Василевский К.П., Кулясов В.Н. / Неуширяемая столкновениями линия тули 1.14 мкм // *Оптика и спектроскопия*. — 1983. — Vol. 54, no. 1. — P. 3.
32. Sukachev D., Sokolov A., Chebakov K. et al. / Magneto-optical trap for thulium atoms // *Physical Review A*. — 2010. — Vol. 82, no. 1. — P. 011405.
33. Sukachev D.D., Kalganova E.S., Sokolov A.V. et al. / Secondary laser cooling and capturing of thulium atoms in traps // *Quantum Electronics*. — 2014. — Vol. 44, no. 6. — Pp. 515–520. — URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2014v044n06ABEH015392>.
34. Vishnyakova G.A., Golovizin A.A., Kalganova E.S. et al. / Ultracold lanthanides: from optical clock to a quantum simulator // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. — 2016. — Vol. 59, no. 2. — Pp. 168–173.
35. Сукачев Д.Д. Лазерное охлаждение атомов тулия, Кандидатская диссертация: / ФИАН. — 2013.
36. Вишнякова Г.А. Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия, Кандидатская диссертация: / ФИАН. — 2016.
37. Maier T., Kadau H., Schmitt M. et al. / Emergence of chaotic scattering in ultracold Er and Dy // *Physical Review X*. — 2015. — Vol. 5, no. 4. — Pp. 1–8.
38. Schmitt M., Wenzel M., Böttcher F. et al. / Self-bound droplets of a dilute magnetic quantum liquid // *Nature*. — 2016. — Vol. 539. — Pp. 259–262. — URL: <http://www.arxiv.org/pdf/1607.07355.pdf>.
39. Safronova M.S., Jiang D., Arora B. et al. / Black-body radiation shifts and theoretical contributions to atomic clock research // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. — 2010. — Vol. 57, no. 1. — Pp. 94–105.