

Прецизионная лазерная спектроскопия в фундаментальных исследованиях

Н.Н. Колачевский, К.Ю. Хабарова

Обсуждается роль точных спектроскопических измерений в развитии фундаментальных теорий. Особое внимание уделено спектроскопии атома водорода, являющегося простейшей стабильной атомной системой, энергетические уровни которого точно вычисляются в рамках квантовой электродинамики. Представлены некоторые задачи, такие как исследование нарушения фундаментальных симметрий, исследование стабильности постоянной тонкой структуры α , чувствительные тесты квантовой электродинамики, в решение которых существенный вклад внесли сотрудники Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

PACS numbers: 32.30.Jc, 37.10.De, 37.10.Gh

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201412e.1354

Содержание

1. Введение (1354).
 2. Начало пути (1355).
 - 2.1. Квантовые генераторы излучения в фундаментальных задачах.
 - 2.2. Работы по несохранению чётности.
 3. Исследования сегодня (1357).
 - 3.1. Поиск дрейфа фундаментальных констант.
 - 3.2. Оптические часы на атоме тулия.
 - 3.3. "Часовые" лазеры в ФИАНе.
 4. Загадки без ответов. Проблема радиуса протона (1360).
 5. Заключение (1362).
- Список литературы (1362).

1. Введение

В середине XIX в. Бунзен и Кирхгоф открыли новую эру в развитии физики — эру спектроскопии. Высокие чувствительность и селективность даже самых простых спектроскопических методов тех времён позволили не только исследовать состав вещества в горячем пламени горелки, но и сделать выводы о химическом составе Солнца. Так, в 1868 г. по жёлтой линии 587,6 нм в солнечной короне был открыт новый элемент — гелий. П. Жансену и Н. Локьеру, сделавшим это открытие, удалось выделить новую жёлтую линию, отстоящую всего на 1,5 нм от резонансной линии натрия. Призменный спектрометр превратился в руках учёных в мощнейший инструмент по исследованию окружающего мира — в своеобразный дактилоскоп, позволяю-

щий выявлять ранее невидимые "отпечатки пальцев" химических элементов.

Однако на осознание природы возникновения спектров потребовалось ещё более чем полвека исследований: только в 1913 г. Нильс Бор предложил теорию атома водорода, объяснившую эмпирические спектральные закономерности, полученные Иоганном Балмером 18-ю годами ранее. Водород, самый простой из стабильных атомов, постепенно начал раскрывать свои тайны под натиском учёных, что положило начало новой области — квантовой механике. Именно с рассмотрения боровской модели начинаются учебники по атомной спектроскопии: модель корректно описывает стационарные состояния в одноэлектронном атоме, используя наглядные представления корпускулярно-волнового дуализма.

Позднее, в 1926 г., Эрвин Шрёдингер напишет знаменитое волновое уравнение, решение которого для электрона в поле бесконечно тяжёлого кулоновского центра приводит к простой зависимости энергии уровня E от главного квантового числа n :

$$E_n = -\frac{Ry}{n^2}, \quad (1)$$

где Ry — постоянная Ридберга, подтверждая тем самым боровскую теорию.

Повышение точности спектральных измерений в атоме водорода позволило обнаружить тонкое расщепление линий бальмеровской серии, которое уже не объяснялось в рамках уравнения Шрёдингера. Действительно, для описания тонкого расщепления требовался учёт релятивистских поправок для электрона, движущегося по первой боровской орбите со скоростью $v = \alpha c$, где α — постоянная тонкой структуры, c — скорость света. Запись релятивистски-инвариантного волнового уравнения с учётом спина электрона была предложена П.А.М. Дираком в 1928 г. Уравнение Дирака описывало

Н.Н. Колачевский, К.Ю. Хабарова. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: kolik@lebedev.ru

Статья поступила 8 августа 2014 г.

все известные на тот момент особенности водородного спектра, и оно в течение почти 20 лет успешно подтверждалось различными экспериментами.

В 1947 г. произошло событие, в очередной раз заставившее пересмотреть устоявшиеся теоретические представления: Уиллис Лэмб и Эрнест Резерфорд, используя микроволновую спектроскопию атомарного водорода, обнаружили, что уровень $2S_{1/2}$ находится выше, чем уровень $2P_{1/2}$, а расщепление между ними составляет около 1 ГГц. Такое расщепление не находило объяснения в рамках дираковской теории, и потребовалось дальнейшее расширение представлений квантовой механики, учитывающее наличие физического вакуума. В конце 1950-х годов Р. Фейнманом, Ю. Швингером и С. Томоной была построена теория квантовой электродинамики (КЭД), объясняющая происхождение лэмбовского сдвига и с высокой точностью предсказывающая его значение. До сих пор КЭД остаётся самой точной теорией, позволяющей предсказывать значения некоторых физических величин (g -факторов лептонов, энергии уровней простых систем и пр.) вплоть до 12-го знака.

Мы видим, насколько большую роль сыграла спектроскопия атома водорода в становлении современной квантовой механики, причём повышение точности измерений неоднократно приводило к наблюдению принципиально новых эффектов, требующих серьёзного пересмотра представлений об электромагнитных взаимодействиях. И сегодня целый ряд фундаментальных проблем исследуется чувствительными методами спектроскопии — это и проверка основополагающих постулатов физики (принципов эквивалентности Эйнштейна, фундаментальных симметрий, постоянства фундаментальных констант), и тесты фундаментальных теорий (например, уравнений квантовой механики и электродинамики, Стандартной модели, теорий гравитации), и прецизионное измерение фундаментальных констант.

Конечно, наиболее желанной целью исследователей является поиск новых эффектов и создание новых теоретических моделей в области фундаментальных взаимодействий. Большие успехи в этом направлении достигнуты с помощью методов физики высоких энергий: создаются всё более мощные ускорители частиц, исследуются астрофизические объекты, в которых вещество находится в экстремальных состояниях, прогрессирует физика высоких полей. Однако не менее эффективны исследования в низкоэнергетической области, где попытка наблюдать новые физические явления основывается на повышении чувствительности и точности измерений. На примере спектроскопии атома водорода можно убедиться в том, что такие измерения нередко приводят к неожиданным результатам и открывают новые разделы физики.

Прогресс в точности спектроскопических измерений в атоме водорода проиллюстрирован на рис. 1. На графике наблюдается несколько изломов, разделяющих эпохи классической спектроскопии, лазерной спектроскопии и современной эры измерения оптических частот. Это несколько условное разделение отражает появление принципиально новых приборов: так, в конце 1970-х годов лазеры начали превращаться из объекта исследований в их инструмент, что привело к значительному повышению разрешения спектроскопических методов и обеспечило быстрый прогресс точности измерений. Именно в это время в Физическом институте им. П.Н. Лебедева

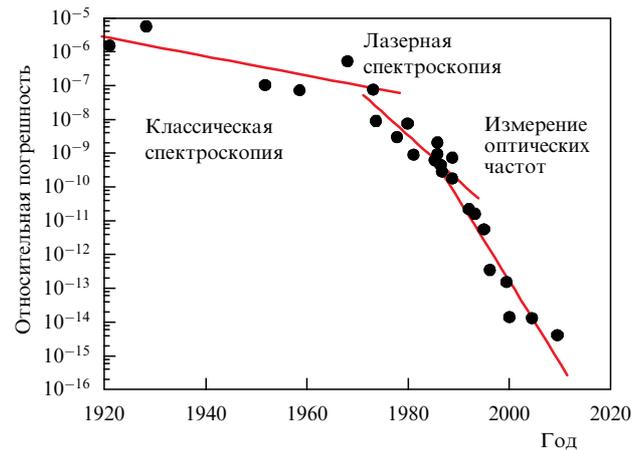


Рис. 1. Прогресс точности спектроскопии атома водорода. Видны переломные моменты, связанные с появлением лазерных методов в 1970-х годах и методов измерения оптических частот в начале 1990-х годов.

РАН (ФИАН) начались работы по лазерной спектроскопии и её применению в решении фундаментальных задач.

2. Начало пути

2.1. Квантовые генераторы излучения в фундаментальных задачах

Одной из пионерских работ, в которой было предложено исследование релятивистских эффектов с помощью молекулярных стандартов частоты, является работа Н.Г. Басова с соавторами [1], опубликованная в журнале *Успехи физических наук (УФН)* в 1961 г. Учитывая большие возможности, открываемые квантовыми генераторами излучения, авторы [1] предложили использовать их выдающиеся характеристики для проверки постулатов общей и специальной теорий относительности, а также для исследования ряда космологических эффектов. В 1968 г. Н.Г. Басов, ставший уже Нобелевским лауреатом, и его аспирант, впоследствии известный учёный, основоположник современных методов лазерной спектроскопии, В.С. Летохов публикуют знаменитую работу "Оптические стандарты частоты" [2]. В этой работе, наряду с описанием ряда новых методов по стабилизации частоты лазерного излучения, предлагалось использовать высокостабильные квантовые генераторы для точного измерения скорости света и проверки постоянства мировых констант.

Развитие предложенных методов по измерению скорости света привело к бурному возрастанию точности измерений и переопределению метра в 1983 г., когда XVII Генеральная конференция по мерам и весам зафиксировала значение скорости света, равное $299792458 \text{ м с}^{-1}$ [3]. В свою очередь одним из самых чувствительных методов исследования стабильности фундаментальных констант остаётся метод сличения частот узких атомных переходов различной природы, как фактически и было предложено Н.Г. Басовым и В.С. Летоховым [2]. С 1970 г. В.С. Летохов начал работать в Институте спектроскопии АН СССР, а исследования в ФИАНе были продолжены несколькими науч-

ными коллективами в отделении квантовой радиофизики и отделении оптики.

В отделении квантовой радиофизики ФИАНа выполнялись работы по прецизионной лазерной спектроскопии метана (длина волны $\lambda = 3,39$ мкм). Была исследована сверхтонкая структура инфракрасных линий метана, попадающих в полосу генерации He–Ne-лазера, зарегистрированы дублеты отдачи, значительно повышена стабильность частоты лазерного излучения [4]. В результате многолетней работы лаборатории стандартов частоты под руководством М.А. Губина созданы компактные лазерные системы с кратковременной относительной нестабильностью частоты вплоть до 10^{-14} . С их использованием выполняются исследования в фундаментальной метрологии, радиоастрономии; высокостабильные лазеры востребованы также в ряде важных практических приложений.

2.2. Работы по несохранению чётности

Одной из важных физических проблем является исследование фундаментальных симметрий: преобразования чётности (P), зарядового сопряжения (C) и инверсии времени (T). До середины XX в. считалось, что результат любого физического измерения не может зависеть от преобразований C, P или T. Однако в 1956–1957 годах была обнаружена анизотропия β -распада ядер Co^{60} , что первые экспериментально подтвердило нарушение пространственной симметрии: физические законы оказались различными для направлений "право" и "лево" [5, 6]. Сразу после экспериментального доказательства нарушения чётности рядом выдающихся учёных (М. Гелл-Маном, Р. Фейнманом, Р. Маршаком и Дж. Сударшаном) была разработана универсальная теория слабого взаимодействия (V–A-теория).

Нарушения P-инвариантности, вызванные слабыми взаимодействиями, ярко наблюдались в физике ядра, в то время как в области низких энергий (атомной физике) они оказались гораздо более тонкими. Эффекты несохранения чётности в атомах вызваны специфической формой слабых взаимодействий — нейтральными токами. Предсказание слабых нейтральных токов легло в основу разработанной С. Вайнбергом, А. Саламом и другими теории, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия [7]. Для подтверждения теории Вайнберга–Салама требовалось достоверное обнаружение нарушения P-инвариантности в атомных системах.

Вопрос о возможном нарушении чётности в атомных системах был рассмотрен в пионерской работе Я.Б. Зельдовича [8] в 1959 г. Я.Б. Зельдович рассмотрел эффект, приводящий к возникновению круговой поляризации фотонов при излучении их атомом водорода, однако этот эффект оказался слишком малым для наблюдения. Экспериментальные работы по поиску нарушения P-инвариантности в атомных системах были начаты значительно позднее — когда появились чувствительные экспериментальные методы, основанные на применении лазерной спектроскопии.

В ФИАНе экспериментальные работы по поиску несохранения чётности были инициированы И.И. Сибельманом, опубликовавшим с соавторами в 1976 г. в *УФН* статью "О несохранении чётности в атомах" [9]. В том же выпуске *УФН* была опубликована статья [10] ленинградской группы (А.Н. Москалёв, Р.М. Рындин, И.Б. Хрипович), которая легла в основу дальнейших

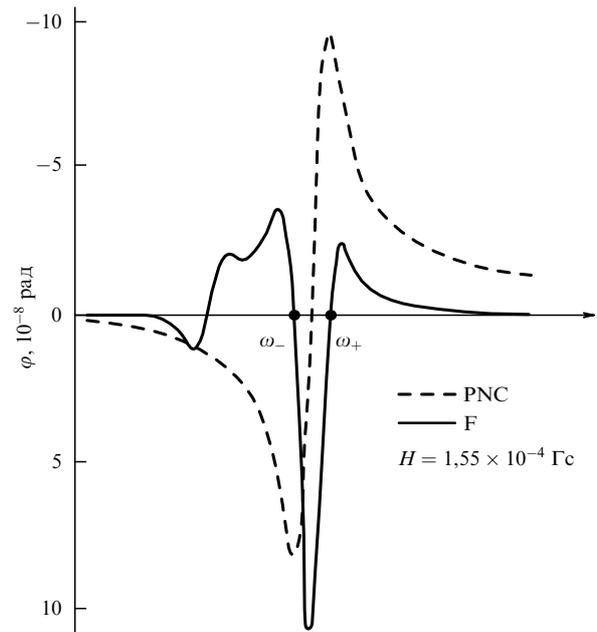


Рис. 2. Расчётные величины эффекта несохранения чётности (Parity Non-Conservation, PNC) и фарадеевского вращения F в оптически плотных парах висмута. (Из работы [12].)

экспериментальных работ [11] в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске. В ФИАНе было принято решение искать эффекты по несохранению чётности в парах висмута, регистрируя вращение плоскости поляризации лазерного излучения вблизи магнитодипольного резонанса на длине волны 648 нм.

Экспериментальные результаты по исследованию оптической активности паров висмута были опубликованы фиановской группой [12] в 1980 г. На рисунке 2 показаны спектральные зависимости величины расчётного эффекта несохранения чётности и фарадеевского вращения в парах висмута [12]. Видно, что для достоверной регистрации эффекта необходимо снизить относительную погрешность измерения вращения плоскости поляризации (как статистическую, так и систематическую) до уровня 10^{-8} , что и по сей день требует исключительно высокого экспериментального мастерства. После преодоления ряда экспериментальных трудностей фиановской группе удалось получить значение параметра R , характеризующего эффект несохранения чётности [13]:

$$R_{\text{exp}}(\text{Bi } 648) = -(7,8 \pm 1,8) \times 10^{-8}, \quad (2)$$

что хорошо согласуется с теоретическим предсказанием $R_{\text{theory}}(\text{Bi } 648) = -(13 \pm 4) \times 10^{-8}$. Как показано в обзоре [14], эксперименты по поиску несохранения чётности в различных атомных системах, выполненные рядом научных групп, блестяще подтвердили теорию Вайнберга–Салама. Это явилось важным шагом в дальнейшем построении ещё более обширной теории Великого объединения, единым образом описывающей сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия.

Проблема исследования фундаментальных симметрий актуальна и сегодня. Несмотря на то что обнаружены нарушения C-, CP- и T-симметрий, вопрос о

барионной асимметрии Вселенной остаётся открытым, и он не может быть объяснён в рамках Стандартной модели. Продолжается поиск возможных нарушений СРТ-теоремы, причём одним из направлений поиска является исследование антиматерии, успешно синтезированной в ЦЕРНе [15]. Сегодня холодный антиводород ($\bar{\text{H}}$) в основном состоянии надёжно удерживается магнитными ловушками. Готовятся первые спектроскопические эксперименты, которые вскоре позволят с высокой точностью сравнить энергетическую структуру атомов материи и антиматерии [16], осуществив тем самым один из наиболее чувствительных тестов СРТ-теоремы.

Исследования антиматерии в ЦЕРНе проводятся при участии ФИАНа, который является членом коллаборации GBAR (Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest) [17]. Коллаборация GBAR создана для экспериментального изучения гравитационного взаимодействия материи и антиматерии — одного из наиболее актуальных фундаментальных вопросов физики низких энергий. Гравитация антиматерии является фактически неизученной областью и, несмотря на косвенные наблюдения, основывающиеся на положениях Стандартной модели и принципе эквивалентности [18], она до сих пор не исследована непосредственно. Сложность заключается в слабости гравитационного взаимодействия и малом количестве антиматерии, синтезируемой в лаборатории.

В проекте GBAR планируется глубокое охлаждение отдельных атомов антиводорода до температур, позволяющих выполнить чувствительные гравитационные измерения по следующей методике. В результате пропускания низкоэнергетического пучка антипротонов через газ позитрония ёе ожидается появление положительно заряженных ионов $\bar{\text{H}}^+$ (ёер — антиматериальный аналог иона H^-). Вероятность такого события крайне мала, но при появлении одиночного положительного иона антиматерии $\bar{\text{H}}^+$ его можно отделить и захватить в ионную ловушку. Энергия захваченного иона будет соответствовать нескольким электронвольтам, что, казалось бы, делает невозможными любые гравитационные эксперименты. Однако положительный заряд иона допускает охлаждение иона антиматерии через обычный ион, например лёгкий ион бериллия Be^+ . Ион бериллия, который поддается глубокому лазерному охлаждению, широко используется в качестве спарринг-иона [19]. Кулоновское отталкивание ионов будет препятствовать аннигиляции, в то время как общие колебания в потенциале ловушки позволят эффективно охлаждать систему вплоть до температуры в несколько мкК. После цикла охлаждения ион $\bar{\text{H}}^+$ будет фотоионизован мощным лазерным импульсом, в результате чего нейтральный атом антиводорода, не удерживаемый более ионной ловушкой, начнёт свободное падение.

В настоящее время идёт планирование и подготовка экспериментальных узлов; реализация проекта GBAR намечена на 2018 г.

3. Исследования сегодня

3.1. Поиск дрейфа фундаментальных констант

Вопрос постоянства безразмерных фундаментальных констант во времени и пространстве является одним из наиболее интригующих в современной физике. Чем определяются значения таких величин, как, например,

постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$, отношение масс электрона и протона m_e/m_p и многих других? Пользуясь этими величинами в своих расчётах, мы редко задумываемся, откуда они происходят и есть ли причина, почему они имеют именно такие значения.

Фундаментальные константы являются внешними параметрами, которые привлекаются в той или иной физической теории, делая её тем самым неполной, зависящей от величин, не вычисляемых в её рамках. Полной в этом смысле теорией могла бы быть боровская теория уровней атома водорода (1), в которой значение энергии уровня определяется только целым числом n (постоянную Ридберга R_∞ можно положить равной единице, договорившись о соответствующей системе единиц). Однако боровская теория неточно воспроизводит наблюдаемый спектр, для полного описания которого, как мы знаем, требуется ещё несколько фундаментальных параметров (см. далее).

Попытка объяснить природу фундаментальных констант, а именно постоянной тонкой структуры $\alpha \approx 1/137$, впервые была предпринята П. А. М. Дираком [20] в 1937 г. В работе [20] Дирак поставил под сомнение стабильность значения α , что положило основу целому направлению исследований, продолжающихся и сегодня. Есть надежда, что наблюдение за фундаментальными константами, поиск дрейфов и возможных корреляций помогут глубже понять физику окружающего нас мира, дать новые знания о происхождении и структуре Вселенной.

До начала 2000-х годов основным объектом исследований являлись спектры космических объектов, а также реликтовые ископаемые и метеориты (см. обзор [21]). Проводились и лабораторные исследования с применением лазеров и других микроволновых источников. Использовался предложенный Н. Г. Басовым и В. С. Летоховым [2] метод, опирающийся на различную чувствительность к фундаментальным константам у переходов разной природы.

Достижения в области измерения оптических частот, а именно создание в 2001 г. фемтосекундного синтезатора [22], стали основой для целой серии высокоточных лазерных экспериментов, оказавших значительное влияние на развитие фундаментальной физики. Пионерские работы по созданию синтезатора оптических частот были выполнены в двух крупных лазерных центрах: Институте общества Макса Планка по квантовой оптике (Max Planck Institute of Quantum Optics, MPQ) в Германии и Объединённом институте лабораторной астрофизики (Joint Institute for Laboratory Astrophysics, JILA) в США, с которыми ФИАН поддерживает тесное сотрудничество. С использованием этих разработок открылась возможность провести измерения в оптическом диапазоне с фантастически высокой точностью, которая сегодня достигла 18-го знака после запятой [23].

В начале 2000-х годов ФИАНом совместно с MPQ был выполнен ряд исследований по прецизионной спектроскопии атома водорода с целью уточнения фундаментальных констант и поиска их возможного дрейфа. Сотрудниками ФИАНа был предложен новый способ поиска дрейфа α , подробно описанный в работах [24, 25]. Метод основывается на сличении абсолютных частот переходов в различных атомных системах (H , Yb^+ , Hg^+ и др.), измеряемых в течение нескольких лет с использованием фемтосекундного синтезатора. Чувствительность к α определяется релятивистскими эффектами, ко-

торые существенно зависят от атомной системы и типа перехода.

В 2004 г. с использованием этого метода было наложено жёсткое ограничение на дрейф α в современную эпоху [26]:

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-0,9 \pm 2,9) \times 10^{-15} \text{ год}^{-1}. \quad (3)$$

Важно отметить, что чувствительность лабораторных измерений к возможному линейному дрейфу α сразу вышла на уровень лучших астрофизических ограничений, порядка $10^{-15} \text{ год}^{-1}$. Учитывая, что в астрофизике рассматриваются гигантские интервалы времени, вплоть до 10 млрд лет, можно сделать вывод об исключительно высокой точности лабораторных методов лазерной спектроскопии, в распоряжении которых находятся данные, зарегистрированные в течение всего нескольких лет.

Лабораторный метод получил развитие, и его чувствительность достигла значения [19]

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-1,6 \pm 2,3) \times 10^{-17} \text{ год}^{-1}, \quad (4)$$

являющегося на сегодня наиболее жёстким ограничением на дрейф α .

На рисунке 3 сравниваются чувствительности экспериментов, выполненных различными методами. Астрофизические наблюдения проводились с использованием комплексов телескоп/спектрограф (системы Обсерватории Кека (Keck) и Очень большого телескопа (Very Large Telescope, VLT), регистрирующих спектры поглощения межзвёздных газовых облаков. Лабораторные наблюдения выполнялись с использованием атомов и ионов, указанных на рис. 3.

Методы затрагивают совершенно различные периоды эволюции Вселенной и являются одинаково важными в рамках поставленной задачи. Нет никаких сомнений в том, что в ближайшие годы, благодаря непрерывно возрастающей точности лабораторных измерений в оптическом диапазоне [23] и большому количеству доступных для анализа атомных систем, чувствительность к линейному дрейфу приблизится к $\dot{\alpha}/\alpha \sim 10^{-20} \text{ год}^{-1}$. Возможно, в какой-то момент будет обнаружено ненулевое значение дрейфа и мы окажемся на пороге интересных открытий.

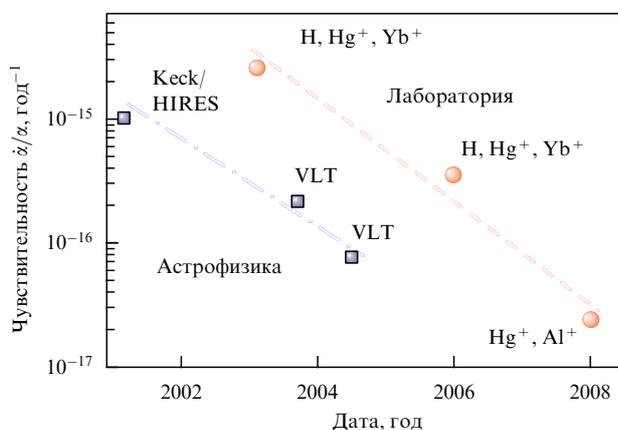


Рис. 3. Сравнение чувствительности к линейному дрейфу α в современных астрофизических (квадраты) и лабораторных (кружки) методах. (HIRES — High REsolution Spectrometer.)

3.2. Оптические часы на атоме тулия

В начале 2000-х годов в ФИАНе начались, наряду с совместными исследованиями атома водорода, экспериментальные работы по лазерному охлаждению и поиску часового перехода в атоме тулия. Атом редкоземельного элемента тулия обладает спецификой структуры электронных оболочек, обусловленной отсутствием одного из 4f-электронов, в то время как внешние оболочки (5s, 6s) целиком заполнены. В зависимости от взаимной ориентации вектора орбитального момента атома ($L = 3$) и спина "дырки" в f-оболочке ($S = 1/2$) основное состояние расщепляется на два энергетических подуровня: с $J = 7/2$ и $5/2$. Вследствие одинаковой чётности переход между этими подуровнями на длине волны 1,14 мкм оказывается запрещённым в электрическом дипольном приближении, что делает его интересным кандидатом для использования в оптических часах. Магнитодипольный переход обладает спектральной шириной линии около 1 Гц [27] и сильной чувствительностью к α (как у перехода между компонентами тонкой структуры $\sim \alpha^2 \text{ Ry}$). Эти свойства делают его привлекательным и перспективным объектом исследования с точки зрения поиска возможного дрейфа α [28].

В отделении оптики ФИАНа ведутся работы по лазерному охлаждению и удержанию атомов тулия, а также разрабатываются высокостабильные лазерные системы для спектроскопии часового перехода 1,14 мкм. Была исследована структура уровней тулия [27], впервые продемонстрировано его лазерное охлаждение на длине волны 410 нм [29], захват его магнитной ловушкой [30], а также вторичное охлаждение на слабом переходе 530,7 нм [31]. Достигнуты температуры облака из 10^6 атомов на уровне 25 мК, что позволяет перезагрузить его в оптическую решётку.

Оптическая решётка представляет собой сформированную световой волной периодический потенциал, который захватывает атомы благодаря динамическому эффекту Штарка. Достоинством оптических решёток является реализация режима Лэмба – Дике (локализация атома в объёме с размером, меньшим λ), что позволяет полностью исключить влияние эффекта Доплера первого порядка [32]. К недостаткам можно отнести малую глубину оптического потенциала (обычно порядка нескольких мК) и сдвиг уровней в поле световой волны, за счёт которого, собственно, и происходит захват в решётку. В 2003 г. группой Х. Каттори было показано, что в ряде систем удастся подобрать длину волны решётки таким образом, чтобы сдвиги верхнего и нижнего метрологических уровней оказались одинаковыми [33]. Если формировать решётку на такой "магической" длине волны, то лидирующий член дифференциальной поляризуемости обнуляется. Все наиболее точные оптические часы на нейтральных атомах, работающие на стронции [23], иттербии [34] и пр., используют именно этот принцип (см. также обзор [35]).

В ФИАНе продемонстрирован захват около 10^4 атомов тулия в оптическую решётку на длине волны 530 нм [31]. Фотография облака захваченных атомов (регистрируется люминесценция на длине волны сильного перехода 410 нм) представлена на рис. 4. При формировании оптической решётки атомы локализируются ближе к центру перетяжки, а форма облака зависит от взаимной поляризации встречных волн. Доля атомов, захваченных в оптическую решётку из магнито-оптической ловушки,

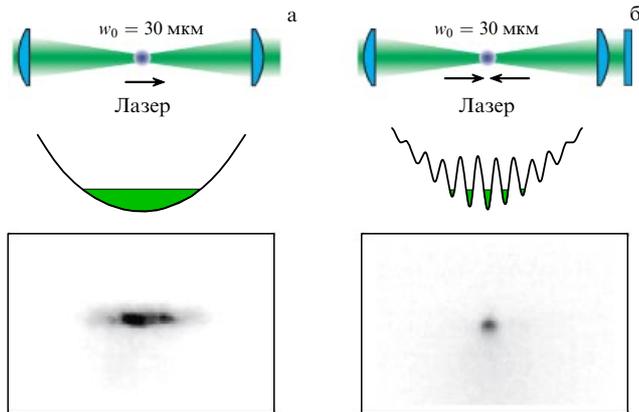


Рис. 4. (а) Оптическая дипольная ловушка. Атомы тулия захватываются в максимум интенсивности бегущей световой волны на длине волны 530 нм. Показаны оптическая схема ловушки, профиль потенциала и фотография захваченного облака (рисунки не в масштабе), w_0 — радиус перетяжки пучка. (б) Оптическая решётка, которая формируется в перетяжке стоячей волны, для чего в схему эксперимента добавляется зеркало.

составляющая около 1 %, определяется геометрическим перекрытием лазерной перетяжки и облака холодных атомов. Для повышения эффективности перзахвата нами ведутся работы по снижению температуры облака вторично охлаждённых атомов, для чего требуется сужение спектральной линии охлаждающего лазера (530,7 нм). Параллельно проводятся расчёты магической длины волны решётки и поиск часового перехода 1,14 мкм с помощью созданной нами стабилизированной полупроводниковой лазерной системы.

В заключение этого раздела отметим, что с точки зрения методов лазерного охлаждения, захвата атомов и манипулирования ими тулий оказался относительно простой системой (в сравнении с широко используемыми щелочноземельными атомами и нейтральной ртутью), что дополнительно подтверждает перспективность и практическую значимость исследований.

3.3. "Часовые" лазеры в ФИАНе

Создание оптических часов, прецизионная лазерная спектроскопия, а также некоторые методы лазерного охлаждения оказываются невозможными без использования так называемых часовых лазеров — лазерных систем, обладающих сверхузкой спектральной линией излучения. Часовые лазеры играют важную роль при проведении фундаментальных экспериментов (см., например, [36]), а также успешно завоёвывают свою нишу в разнообразных прикладных задачах, обладая непревзойдённо высокой кратковременной стабильностью. Так, их относительная нестабильность на интервалах времени 1–10 с может достигать 10^{-17} [37] (при использовании криогенного оборудования), что недостижимо для осцилляторов микроволнового диапазона.

Сердцем стабилизированной лазерной системы является пассивный монолитный резонатор, обладающий высокой резкостью и максимально высокой стабильностью расстояния между зеркалами. Частота лазерного излучателя стабилизируется относительно пика пропускания пассивного резонатора с помощью петли активной обратной связи. Для стабилизации могут быть использованы самые разнообразные лазерные генера-

торы: полупроводниковые, волоконные, твердотельные и газовые лазеры, при этом длина волны генерации должна попадать в резонанс с длиной волны перехода в адресуемой атомной системе. Основной сложностью является конструкция самого пассивного резонатора, который должен обладать минимальной чувствительностью к флуктуациям температуры и вибрациям.

В 2006 г. нами был разработан принцип температурно- и вибрационно-изолированного резонатора, изготовляемого из специального материала УЛЕ (Ultra Low Expansion (ULE) glass) [38]. Использование ряда оригинальных подходов [27, 39] позволило снизить нестабильность частоты лазера до уровня тепловых шумов, что соответствует субгерцевой спектральной ширине линии. В ФИАНе был создан ряд систем на длины волн 698 нм (часовой переход в стронции), 689 нм (переход вторичного охлаждения в стронции), 1140 нм (часовой переход в тулии), 531 нм (переход вторичного охлаждения в тулии), причём резкость резонаторов достигала значения вплоть до 3×10^5 . К сожалению, зеркала, обеспечивающие столь высокие показатели, до сих пор изготавливаются только в США, однако все остальные компоненты системы, включая тела резонаторов специальной формы, были созданы в ФИАНе.

На рисунке 5 представлены типичные характеристики, реализуемые описанными выше системами. Для резонаторов, обладающих умеренно высокой резкостью (5×10^4), нестабильность не превышает 10^{-13} на интервалах времени вплоть до 3 ч, в то время как для систем с улучшенными характеристиками (резкость 3×10^5 , дополнительные петли стабилизации интенсивности, повышенная оптическая изоляция для предотвращения эталонных эффектов) нестабильность снижается на порядок, достигая фундаментального предела тепловых шумов.

Стабилизированные лазерные системы являются удобным инструментом в задаче лазерного охлаждения и спектроскопии атомов и ионов. Использование материала УЛЕ вблизи критической точки обеспечивает не

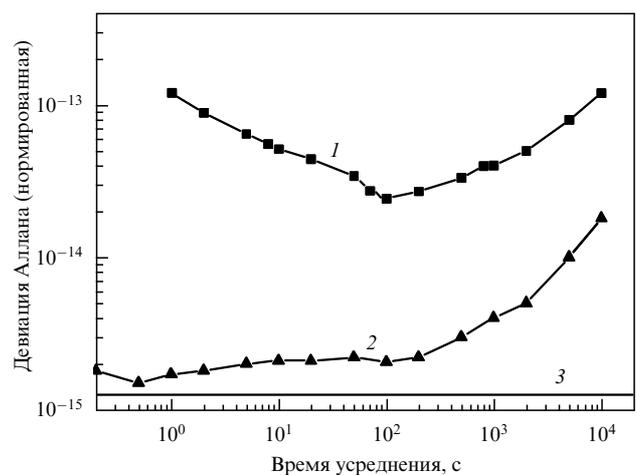


Рис. 5. Типичная относительная нестабильность часовых лазеров (без учёта линейного дрейфа). Кривая 1 представляет результат сличения двух лазерных систем, созданных в ФИАНе, со стандартной системой стабилизации относительно УЛЕ-резонаторов с резкостью 50000 [39]. Кривая 2 — результат сличения двух систем с дополнительными петлями обратной связи и предельной резкостью УЛЕ-резонатора (300000) [38]. Кривая 3 — теоретическая оценка уровня теплового шума резонатора.

только высокую кратковременную стабильность, но и минимальный дрейф частоты. При оптимальной температуре тела резонатора доминирующим процессом, влияющим на изменение длины резонатора, становится рекристаллизация материала. Наблюдается фактически линейный дрейф частоты на уровне $0,1 \text{ Гц с}^{-1}$, что позволяет с высокой точностью предсказать частоту лазера на длительных интервалах времени (вплоть до нескольких месяцев). Использование таких систем существенно облегчает настройку на резонансную линию и является незаменимым в случаях, когда спектроскопия во вспомогательной ячейке затруднительна (слабый переход или переходы в ионах). Так, лазерная система на длине волны 689 нм успешно применяется для вторичного охлаждения атомов стронция на слабом интеркомбинационном переходе $^1S_0 - ^3P_1$ во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ).

Созданные нами часовые лазеры встроены в установки по лазерному охлаждению атомов стронция (ВНИИФТРИ) и тулия (ФИАН), на которых проводятся исследования метрологических переходов 698 нм и 1140 нм соответственно. Область оптических часов в последние годы активно развивается в России: ведутся работы по созданию оптических реперов частоты на нейтральных атомах в решётках (ВНИИФТРИ, ФИАН), а также на одиночных ионах (Институт лазерной физики СО РАН, ВНИИФТРИ, ФИАН). Характеристики созданных лазерных систем позволяют снизить нестабильность оптических часов до уровня $10^{-16} - 10^{-17}$, значительно меньшего, чем уровень нестабильности первичных микроволновых стандартов. С помощью таких лазерных систем будет решаться задача улучшения частотно-временного обеспечения страны и проводиться ряд фундаментальных исследований.

4. Загадки без ответов.

Проблема радиуса протона

При выполнении фундаментальных исследований всегда возникает вопрос: остались ли в современной физике нерешённые задачи, яркие и важные проблемы, на которых требуется сфокусировать совместные усилия? В своё время, на рубеже нового тысячелетия, Виталий Лазаревич Гинзбург сформулировал особо важные и интересные с его точки зрения проблемы [40]. Безусловно, проверка основополагающих постулатов и теорий, "нуль"-эксперименты представляют собой важную часть исследований, определяющую границы допустимости теоретических положений, но наиболее интригующими являются ситуации, в которых возникает несоответствие теории и наблюдений.

В этом разделе мы затронем вопрос из области лазерной спектроскопии экзотических атомов — простейших атомных систем (в основном водородоподобных), в которых протон или электрон заменены другой нестабильной частицей. К экзотическим системам можно отнести позитроний ($e\bar{e}$), мюоний ($e\mu$), мюонный водород (μp) и, естественно, антиводород. Использование лазерных методов при исследовании простых экзотических систем является мощным инструментом современной физики элементарных частиц и позволяет судить о применимости теоретических моделей в области низких энергий. Несмотря на кажущуюся предсказуемость, эти

простейшие системы часто ставят исследователей в тупик, раскрывая новые неожиданные свойства.

Проблема радиуса протона. С учётом поправок квантовой электродинамики энергию уровня в водородоподобной системе можно представить в виде разложения по малому параметру α :

$$E_n = Ry \left(-\frac{1}{n^2} + A_{20}\alpha^2 + A_{30}\alpha^3 + A_{31}\alpha^3 \ln \alpha + \dots + \frac{16\pi^2 m_r^2 c^2 \alpha^2}{3n^3 h^2} \delta_{l0} r_p^2 \right). \quad (5)$$

В правой части (5) группируются релятивистские, радиационные, поляризационные поправки и поправки отдачи, что даёт коэффициенты разложения A_{ij} при соответствующих степенях α . В коэффициенты A_{ij} входит отношение масс частиц в системе (например, m_r/m_p в случае атома водорода, m_r — приведённая масса). Коэффициенты с высокой точностью вычисляются методами КЭД.

Поскольку протон обладает распределённым зарядом, кулоновский потенциал искажается, что приводит к соответствующей энергетической поправке, определяющейся среднеквадратичным зарядовым радиусом протона r_p . Этот параметр не вычисляется с высокой точностью и устанавливается либо из спектроскопических экспериментов, либо из экспериментов по рассеянию электронов на протонах. Хотя соответствующая поправка невелика (1,25 МГц для основного состояния), её погрешность, составляющая около 40 кГц, является доминирующей при вычислении энергии уровней.

Измерение r_p представляет собой один из ключевых моментов при определении постоянной Ридберга Ry — основной масштабирующей энергетической единицы в атомной физике. Наивысшая точность измерения Ry достигнута в спектроскопических измерениях на атоме водорода [41]. Как следует из формулы (5), для определения Ry требуется, как минимум, два измерения энергий различных переходов. Действительно, уравнение содержит две неизвестные величины, Ry и r_p , в то время как α и m_r/m_p , которые входят как малые поправки, известны с достаточно высокой точностью из других экспериментов. В качестве одного из переходов традиционно выбирается $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$, частота которого измерена с относительной погрешностью $4,2 \times 10^{-15}$ [42]. Остальные переходы (одно- и двухфотонные) измерены с погрешностью на уровне 10^{-11} , следовательно, они вносят основной вклад в суммарную ошибку эксперимента. Существенно более низкая точность объясняется тем, что все возбуждённые уровни в водороде, кроме $2S_{1/2}$ и ридберговских уровней, обладают короткими временными жизни и большой шириной соответствующих спектральных линий. В свою очередь ридберговские уровни очень чувствительны к внешним возмущениям, что затрудняет достижение высокой точности в эксперименте.

В верхней части рис. 6 приведены значения зарядового радиуса протона, полученные в результате комбинации измерений частот перехода $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ и одной из частот $2S_{1/2} \rightarrow nP, nS, nD$. Также представлены результаты измерения лэмбовского сдвига $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2,3/2}$. Усреднение всех этих значений даёт величину $H_{av} = 0,8758(77)$ фм. Эксперименты по рассеянию электронов на протоне дают $r_p = 0,879(8)$ [45], что подтверждает

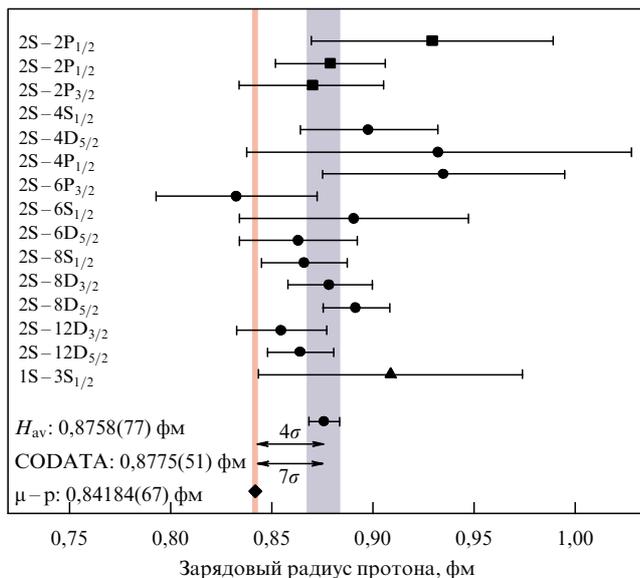


Рис. 6. Среднеквадратичные значения зарядового радиуса протона r_p , извлечённые из различных спектроскопических экспериментов в атоме водорода. Комбинация точно измеренной частоты перехода $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ и одной из частот $2S_{1/2} \rightarrow nP, nS, nD$ позволяет одновременно вычислить постоянную Ридберга и r_p . Приведено значение, полученное из спектроскопических данных в водороде, H_{av} , значение, рекомендованное группой CODATA (Committee on Data for Science and Technology — Комитет по данным науки и техники) [43] (в котором дополнительно учитываются данные по рассеянию электронов), и значение, извлечённое из экспериментов с мюонным водородом, $\mu-p$ [44]. Результат, полученный в мюонном водороде, на порядок более точен, но он отличается на 4 и 7 комбинационных стандартных отклонений σ от значений H_{av} и CODATA соответственно, что указывает либо на проблемы теории при описании мюонных и электронных систем, либо на скрытые ошибки экспериментов.

результат спектроскопии водорода. На основании этих данных группой CODATA [43] рекомендовано значение среднеквадратичного зарядового радиуса

$$r_p^{CODATA} = 0,8775(51) \text{ фм} \quad (6)$$

и соответствующее значение постоянной Ридберга

$$R_\infty = \frac{Ry}{hc} = 10\,973\,731,568\,539(55) \text{ м}^{-1}. \quad (7)$$

В начале 2000-х годов в Институте Пауля Шеррера (Paul Scherrer Institute, PSI) в Швейцарии был начат эксперимент по измерению лэмбовского сдвига в экзотическом атоме мюонного водорода. Основной мотивацией эксперимента являлось уточнение зарядового радиуса протона и, соответственно, дальнейшее уточнение постоянной Ридберга. Выбор мюонного водорода обусловлен тем, что боровская орбита тяжёлого мюона в 200 раз меньше, чем у водорода, что обеспечивает существенно более сильное перекрытие волновой функции s -состояния $\psi(r)$ с ядром по сравнению с таким перекрытием в случае обычного водорода. Соответственно, связанная с конечным размером ядра поправка, пропорциональная $|\psi(0)|^2$, возрастает в 200^2 раз по сравнению с другими вкладами. В то же время мюонный водород является системой, полностью аналогичной обычному водороду с точки зрения методов КЭД.

Эксперимент в PSI, проводившийся в течение около 10 лет с привлечением наиболее современных методов лазерной спектроскопии, позволил зарегистрировать переход $2S \rightarrow 2P$ ($\lambda \approx 6$ мкм) в мюонном водороде,

откуда на основе вычисления в КЭД было получено значение [44]

$$r_p(\mu-p) = 0,84184(67) \text{ фм}. \quad (8)$$

Исследователям удалось на порядок уточнить величину r_p , однако, как видно из рис. 6, она оказалась в семи комбинационных стандартных отклонениях σ от величины CODATA (6)! Даже если не учитывать данных по рассеянию электронов и ограничиться только спектроскопией водорода, то расхождение всё равно остаётся на уровне 4σ , что указывает на наличие серьёзной проблемы либо в теоретических расчётах, либо в эксперименте. В течение нескольких последних лет предпринимались попытки дать объяснение этому расхождению, которое получило название "загадка радиуса протона". Спектр возможных причин простирается от неучтённых систематических экспериментальных погрешностей до "новой" физики, выходящей за рамки Стандартной модели [46]. Вопрос остаётся открытым по сей день, являясь, пожалуй, одним из наиболее ярких вызовов в фундаментальной физике [47].

В 2011 г., продолжая долговременное научное взаимодействие, сотрудники ФИАНа совместно с лабораторией MPQ (Германия) начали эксперимент по прецизионной спектроскопии возбуждённых уровней в атоме водорода с целью возможного объяснения "загадки радиуса протона" [48]. Нами используется пучок оптически возбуждённых метастабильных атомов водорода при температуре 4 К, причём времяпролётное измерение делает доступными скоростные группы со скоростью вплоть до 100 м с^{-1} . Отметим, что во всех предыдущих экспериментах по спектроскопии переходов $2S_{1/2} \rightarrow nP, nS, nD$ метастабильное состояние возбуждалось электронным ударом, что приводило к характерным скоростям атомов водорода 3000 м с^{-1} и существенно большему вкладу эффекта Доплера. Кроме того, оптическое возбуждение позволяет адресовать определённые магнитные и сверхтонкие подуровни, что облегчает интерпретацию результатов. Целью нашего эксперимента является достижение погрешности на уровне $1-2 \text{ кГц}$ при измерении частот переходов $2S_{1/2} \rightarrow 4P_{1/2,3/2}$. Такая точность соответствует точности всех предыдущих комбинационных измерений в атоме водорода H_{av} (см. рис. 6). Новое значение позволит либо подтвердить значение CODATA и тем самым обострить "загадку протона", либо разрешить её.

Как показано в работе [48], созданная экспериментальная установка позволяет достигать статистической погрешности на требуемом уровне, что соответствует разбиению линии на 10^4 частей (естественная ширина перехода $2S_{1/2} \rightarrow 4P_{1/2}$ — 13 МГц). Продемонстрировано существенное подавление вклада эффекта Доплера — его уменьшение в 10^5 раз, — а также некоторых других важных систематических вкладов. В настоящее время проводится исследование влияния интерференционных эффектов при распаде $4P_{1/2,3/2}$ -уровней. После абсолютного измерения частот переходов $2S_{1/2} \rightarrow 4P_{1/2,3/2}$ планируются прецизионные измерения частот переходов на уровни 6P, 8P, 9P по отработанной методике, что должно привести к ещё более точному определению r_p .

Необходимо обратить внимание на то, что отдельные измерения, представленные на рис. 6, не находятся в резком противоречии с измерением лэмбовского сдвига в мюонном водороде. Значительное противоречие возникает только при усреднении результатов более чем десяти экспериментов. Поэтому общий систематический

эффект в водородных измерениях, скрытый за статистической погрешностью, мог привести к наблюдаемому расхождению. Существенное снижение статистической погрешности, достигнутое в наших экспериментах, позволяет гораздо тщательнее исследовать систематические сдвиги и тем самым повысить достоверность результата, что необходимо для объяснения загадки радиуса протона.

5. Заключение

В настоящей статье, посвящённой 80-летию ФИАНа, представлены фундаментальные задачи, которые решаются сотрудниками ФИАНа методами прецизионной лазерной спектроскопии. С открытием квантовых генераторов — мазеров и лазеров — появились принципиально новые возможности для высокочувствительного исследования фундаментальных симметрий, проверки постулатов квантовой механики и электродинамики, Стандартной модели и точного определения фундаментальных констант. Лазерная спектроскопия продолжает оставаться одной из наиболее быстро развивающихся областей физики: появляются новые методы синтеза, подготовки и глубокого охлаждения атомно-молекулярных образцов, создаются новые лазерные системы и методы стабилизации. Это приводит к быстрому возрастанию точности измерений (примерно на порядок за три года), что открывает возможности проведения всё более чувствительных измерений. Появляются новые направления, такие как лазерная спектроскопия экзотических атомных систем, спектроскопия антиматерии, исследование гравитационных эффектов в квантовых системах и пр. Работы сотрудников нашего института продолжают играть ключевую роль в развитии этой интереснейшей области физики.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-02-01374, 14-02-91331). Авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам лаборатории оптики активных сред ФИАНа, а также сотрудникам лаборатории лазерной спектроскопии Института по квантовой оптике общества Макса Планка (Германия), материалы исследования которых вошли в данную статью.

Список литературы

1. Басов Н Г и др. *УФН* **75** 3 (1961); Basov N G et al. *Sov. Phys. Usp.* **4** 641 (1962)
2. Басов Н Г, Летохов В С *УФН* **96** 585 (1968); Basov N G, Letokhov V S *Sov. Phys. Usp.* **11** 855 (1969)
3. "Définition of the metre. Résolution 1", in *17e Conf. Générale des Poids et Mesures (CGPM) 1983. Comptes Rendus (Sèvres: Bureau Intern. des Poids et Mesures, 1984); Giacomo P Metrologia* **20** 25 (1984)
4. Величанский В Л, Губин М А *УФН* **179** 1219 (2009); Velichansky V L, Gubin M A *Phys. Usp.* **52** 1153 (2009)

Precision laser spectroscopy in fundamental studies

N.N. Kolachevsky, K.Yu. Khabarova. *Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation. E-mail: kolik@lebedev.ru*

The role of precision spectroscopic measurements in the development of fundamental theories is discussed, with particular emphasis on the hydrogen atom, the simplest stable atomic system amenable to the accurate calculation of energy levels from quantum electrodynamics. Research areas that greatly benefitted from the participation of the Lebedev Physical Institute are reviewed, including the violation of fundamental symmetries, the stability of the fine structure constant α , and the sensitive tests of quantum electrodynamics.

PACS numbers: 32.30.Jc, 37.10.De, 37.10.Gh
Bibliography — 48 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (12) 1354–1362 (2014)

5. Lee T D, Yang C N *Phys. Rev.* **104** 254 (1956)
6. Wu C S et al. *Phys. Rev.* **105** 1413 (1957)
7. Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)
8. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **36** 964 (1959); Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **9** 682 (1959)
9. Алексеев В А, Зельдович Б Я, Собельман И И *УФН* **118** 385 (1976); Alekseev V A, Zel'dovich B Ya, Sobel'man I I *Sov. Phys. Usp.* **19** 207 (1976)
10. Москалев А Н, Рындин Р М, Хриплович И Б *УФН* **118** 409 (1976); Moskalev A N, Ryndin R M, Khriplovich I B *Sov. Phys. Usp.* **19** 220 (1976)
11. Барков Л М, Золоторев М С, Хриплович И Б *УФН* **132** 409 (1980); Barkov L M, Zolotov M S, Khriplovich I B *Sov. Phys. Usp.* **23** 713 (1980)
12. Богданов Ю В и др. *Письма в ЖЭТФ* **31** 234 (1980); Bogdanov Yu V et al. *JETP Lett.* **31** 214 (1980)
13. Birich G N et al. "Optical rotation on 648 nm transition in atomic bismuth vapor", Препринт № 136 (М.: ФИАН, 1984)
14. Fortson E N, Lewis L L *Phys. Rep.* **113** 289 (1984)
15. Amoretti M et al. (ATHENA Collab.) *Nature* **419** 456 (2002)
16. Kuroda N et al. (ASACUSA Collab.) *Nature Commun.* **5** 3089 (2014)
17. Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest, <http://gbar.web.cern.ch/GBAR/>
18. Adelberger E G et al. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **62** 102 (2009)
19. Rosenband T et al. *Science* **319** 1808 (2009)
20. Dirac P A M *Nature* **139** 323 (1937)
21. Uzan J-P *Rev. Mod. Phys.* **75** 403 (2003)
22. Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W *Nature* **416** 233 (2002)
23. Bloom B J et al. *Nature* **506** 71 (2014)
24. Колачевский Н Н *УФН* **174** 1171 (2004); Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **47** 1101 (2004)
25. Fischer M et al. *Lecture Notes Phys.* **648** 209 (2004)
26. Fischer M *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)
27. Kolachevsky N et al. *Appl. Phys. B* **89** 589 (2007)
28. Колачевский Н Н *УФН* **181** 896 (2011); Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **54** 863 (2011)
29. Sukachev D et al. *Phys. Rev. A* **82** 011405(R) (2010)
30. Сукачев Д Д и др. *Квантовая электроника* **41** 765 (2011); Sukachev D D et al. *Quantum Electron.* **41** 765 (2011)
31. Сукачев Д Д и др. *Квантовая электроника* **44** 515 (2014); Sukachev D D et al. *Quantum Electron.* **44** 515 (2014)
32. Riehle F *Frequency Standards: Basics and Applications* (Weinheim: Wiley-VCH, 2004); Риле Ф *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009)
33. Katori H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 173005 (2003)
34. Hinkley N et al. *Science* **341** 1215 (2013)
35. Ludlow A D et al., arXiv:1407.3493
36. Eisele Ch, Nevsky A Yu, Schiller S *Phys. Rev. Lett.* **103** 090401 (2009)
37. Kessler T et al. *Nature Photon.* **6** 687 (2012)
38. Alnis J et al. *Phys. Rev. A* **77** 053809 (2008)
39. Хабарова К Ю и др. *Квантовая электроника* **42** 1021 (2012); Khabarova K Yu et al. *Quantum Electron.* **42** 1021 (2012)
40. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999); Ginzburg V L *Phys. Usp.* **42** 353 (1999)
41. Biraben F *Eur. Phys. J. Special Topics* **172** 109 (2009)
42. Parthey C G et al. *Phys. Rev. Lett.* **107** 203001 (2011)
43. Mohr P J, Taylor B N, Newell D B *Rev. Mod. Phys.* **80** 633 (2008)
44. Pohl R et al. *Nature* **466** 213 (2010)
45. Bernauer J C et al. (A1 Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **105** 242001 (2010)
46. Pohl R et al. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63** 175 (2013)
47. Bernauer J C, Pohl R *Sci. Am.* **310** (2) 32 (2014); Бернауэр Я, Рандольф П В *мире науки* (4) 4 (2014)
48. Beyer A et al. *Ann. Physik* **525** 671 (2013)

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201412e.1354

Received 8 August 2014
Physics – Uspekhi **57** (12) (2014)