

*Государственный научный центр РФ
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Метрологии
им. Д. И. Менделеева*

Всероссийское совещание
по Квантовой метрологии
и фундаментальным физическим
КОНСТАНТАМ

Тезисы докладов

Санкт-Петербург, 2–4 декабря 2008

Организационный комитет:

Сопредседатели:

С. Г. Каршенбойм (ВНИИМ)

С. А. Кононогов (ВНИИМС)

Члены Организационного комитета:

В. С. Александров (ВНИИМ)

С. Н. Багаев (ИЛФ СО РАН)

Д. А. Варшалович (ФТИ РАН)

Л. К. Исаев (ВНИИМС)

Ю. П. Семенов (ВНИИМ)

Э. Т. Француз (ВНИИМ)

В. А. Шелюто (ВНИИМ)

А. Г. Чуновкина (ВНИИМ)

Почетный член Организационного комитета:

Ю. В. Тарбеев (СПбГТУ)

Всероссийское совещание по Квантовой метрологии и фундаментальным физическим константам проводится ГНЦ ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Рабочей группой РНК КОДАТА по фундаментальным физическим при поддержке Научного совета РАН по метрологическому обеспечению и стандартизации, Российского национального комитета по сбору и оценке численных данных в области науки и техники (КОДАТА) при РАН и ВНИИМС. Совещание проводится при поддержке РФФИ (грант 08-02-06170-г).

Оглавление

Пленарные доклады

<u>Д. А. Варшалович, А. В. Иванчик.</u> Астрофизические поиски возможных изменений со временем фундаментальных физических констант	3
<u>С. Н. Гниненко.</u> Поиск новой физики в распадах позитрония	4
<u>В. Г. Иванов, С. Г. Каршенбойм.</u> Сверхтонкое расщепление $1s$ и $2s$ состояний в водороде	5
<u>А. В. Иванчик, Д. А. Варшалович.</u> Ограничения на отношение масс протона и электрона за космологические времена	6
<u>С. Г. Каршенбойм.</u> Недавний прогресс в уточнении значений фундаментальных физических констант (по материалам рабочей группы CODATA)	7
<u>А. С. Катков.</u> Транспортируемый эталон вольта, основанный на квантовом эффекте Джозефсона, и международные сличения эталонов	8
<u>М. Г. Козлов.</u> Лабораторные молекулярные эксперименты по поиску вариации фундаментальных констант	9
<u>Н. Н. Колачевский, А. Н. Матвеев, Я. Алнис, К. Партей, Т. В. Хэнш.</u> Двухфотонная спектроскопия атома водорода и дейтерия и измерение сверхтонкого расщепления $2s$ состояния	10
<u>С. А. Запругаев, Н. Л. Манаков, С. И. Мармо, С. А. Свиридов.</u> Метод учета виртуальных переходов в континууме в теории многозарядных ионов .	11
<u>А. П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов.</u> Сверхтонкая структура легких мюонных атомов	12
<u>В. Н. Мельников.</u> Гравитационная постоянная и ее возможные вариации . .	13
<u>И. Н. Мешков.</u> Эксперименты с моноэнергетическим пучком позитрония . .	14
<u>Ю. И. Неронов.</u> Об исследовании ЯМР спектров простейших газов для определения магнитных моментов легчайших ядер	15
<u>М. С. Онегин.</u> Ограничения на изменение фундаментальных констант, следующие из анализа геофизических данных природного реактора в Окло	16
<u>А. А. Пивоваров.</u> Адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона	17
<u>Е. В. Питьева.</u> Проверка теории относительности и ограничения на вековое изменение гравитационной постоянной по современным наблюдениям планет и космических аппаратов	18
<u>Г. В. Федотович.</u> Результаты измерений величины R с детекторами КМД-2 и СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2М. Перспективы улучшения точности до уровня 10^{-3} в экспериментах с детектором КМД-3 на ВЭПП-2000	19
<u>Б. И. Хазин.</u> Аномальный магнитный момент мюона: измерение в BNL и перспективы	20
<u>И. Б. Хрипович.</u> Электрические дипольные моменты элементарных частиц, от электрона до t -кварка	21
<u>В. М. Шабазев.</u> Квантовая электродинамика тяжелых ионов и атомов	22

<u>Ю. М. Шатунов.</u> Сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона в накопителе	23
<u>В. А. Шелюто.</u> Сверхтонкое расщепление в мюонии. Радиационные поправки к отдаче	24
<u>В. Я. Шифрин.</u> Прецизионные измерения магнитного поля и гиромангнитное отношение протона и гелиона	25

Стендовые доклады

<u>Д. А. Глазов, А. В. Волотка, В. М. Шабает, И. И. Тупицын, Г. Плюниен.</u> g -фактор многозарядных ионов и постоянная тонкой структуры	29
<u>С. В. Клещевская, Ю. Н. Тютяев, Р. Н. Фаустов.</u> Техника Фелла и возможности ее обобщения при расчетах тонких сдвигов методом квазипотенциала	30
<u>Ю. С. Кожедуб, Д. А. Глазов, А. В. Волотка, И. И. Тупицын, В. М. Шабает, Г. Плюниен.</u> Расчеты эффекта отдачи и энергий перехода в литиеподобных ионах	31
<u>Е. Ю. Корзинин, В. Г. Иванов, С. Г. Каршенбойм.</u> Сверхтонкое расщепление в мюонном водороде: КЭД поправки порядка α^2	32
<u>А. А. Крутов, А. П. Мартыненко.</u> Сверхтонкая структура основного состояния мюонного гелия	33
<u>В. Квинт, Д. Л. Московкин, В. М. Шабает и М. Фогель.</u> Метод лазерного двойного резонанса	34
<u>Д. А. Соловьев, Л. Н. Лабзовский и В. Ф. Шарипов.</u> Одно-, двух- и трехфотонные переходы между $2s$, $2p$ и $1s$ энергетическими уровнями для водородоподобных атомов во внешнем электрическом поле и без него.	35
<u>С. А. Кононогов, В. Н. Мельников, В. В. Хрущев.</u> Определение точных значений констант расширенной Стандартной модели	36
<u>Л. Н. Лабзовский, Г. И. Щедрин, Д. А. Соловьев, Г. Плюниен, С. Г. Каршенбойм, Е. А. Черновская.</u> Нерезонансные поправки для измерений оптической частоты резонанса в атоме водорода	37

Тезисы, поступившие после окончания регистрации

<u>С. Г. Семенчинский.</u> Международная система единиц СИ. Прошлое, настоящее, будущее.	41
--	----

Пленарные доклады

Астрофизические поиски возможных изменений со временем фундаментальных физических констант

Д. А. Варшалович^{a,b}, А. В. Иванчик^{a,b}

^a *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*

^b *Кафедра "Космические Исследования", СПбГУ*

Со времен Дирака, высказавшего идею о возможном изменении фундаментальных констант со временем [1], интерес к этой проблеме периодически возникает как вместе с успехами теоретической мотивации такого изменения, так и с прогрессом в развитии экспериментальных методов исследований.

В настоящее время получены жесткие ограничения на возможные изменения фундаментальных физических констант как на “лабораторных” временах порядка нескольких лет, так и на космологических масштабах времени - около 10 млрд. лет (см. напр., сб. работ [2]).

В данном докладе представлен обзор астрофизических методов по поиску космологических вариаций фундаментальных физических констант.

[1] P.A.M. Dirac, Nature **139** (1937) 323.

[2] ed. Karshenboim, Eur. Phys. J. (ST) **163** (2008).

Поиск новой физики в распадах позитрония

С. Н. Гниненко

Институт Ядерных Исследований РАН (Москва)

Дается обзор недавно выполненных и планируемых экспериментальных исследований позитрония с целью поиска новой физики за пределами стандартной модели, а также прецизионного измерения вакуумного времени жизни ортопозитрония [1]. Помимо прецизионной проверки QED, дополнительной мотивацией для проведения данных работ является возможность экспериментальной проверки ряда теорий имеющих более чем три пространственных измерения, или моделей содержащих т.н. скрытый сектор. Представлены результаты поисков невидимой моды распадов ортопозитрония с уровнем чувствительности к парциальной ширине порядка 10^{-7} . Обсуждается возможная связь проводимых исследований с результатами подземного эксперимента DAMA/LIBRA в лаборатории Gran Sasso подтвердившего недавно наблюдение годичных модуляций сигнала в массивном NaI детекторе [2].

[1] С.Н. Гниненко, Н.В. Красников, В.А. Матвеев, А. Руббиа, *Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра* **37** (2006) 605.

[2] R. Bernabei et al., *Eur. Phys. Jour. C* **56** (2008) 333.

Сверхтонкое расщепление состояний $1s$ и $2s$ в водороде

В. Г. Иванов^{a,b}, С. Г. Каршенбойм^b

^a Главная (Пулковская) обсерватория РАН, 196140, Санкт-Петербург

^b ГНЦ “Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева”, 190005 Санкт-Петербург

Прогресс, достигнутый к настоящему времени в области эксперимента, позволил измерить сверхтонкое расщепление основного ($E_{\text{hfs}}(1s)$) и метастабильного уровня ($E_{\text{hfs}}(2s)$) в атоме водорода и некоторых водородоподобных системах с высокой точностью. На сегодняшний день квантовая электродинамика не может вычислять указанные величины по отдельности со сравнимой точностью, так как они включают в себя вклады структуры ядра, которые невозможно вычислить достаточно точно. Тем не менее, в специально нормированной разности

$$D_{21} = 8 \cdot E_{\text{hfs}}(2s) - E_{\text{hfs}}(1s)$$

большая часть подобных вкладов сокращается. Это позволяет вычислить величину D_{21} с точностью, которая, в случае водорода, превышает точность её измерения [1].

В докладе даётся краткий обзор развития теоретического понимания сверхтонкого расщепления в водороде и экспериментального прогресса в этой области измерения. Проводится сравнение теории и эксперимента для легких водородоподобных атомов.

[1] С. Г. Каршенбойм, Н. Н. Колачевский, В. Г. Иванов, М. Фишер, П. Фендель, Т. В. Хэнш, *ЖЭТФ* **128** (2006) 419.

Ограничения на отношение масс протона и электрона за космологические времена

А. В. Иванчик^{a,b}, Д. А. Варшалович^{a,b}

^a *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*

^b *Кафедра "Космические Исследования", СПбГПУ*

Современные теории физики фундаментальных взаимодействий предсказывают изменение физических констант со временем. Это изменение может быть связано с эволюцией скалярных полей, определяющих величины констант связи, эволюцией дополнительных пространственных измерений и со множеством других вариантов, возникающих в теоретических моделях современной космологии (см., напр., обзор [1]). Однако, до сих пор, надежного экспериментального подтверждения такому изменению не получено. Современный экспериментальный статус проблемы вариации констант довольно противоречив [2] и тем интересен.

В данном докладе обсуждаются экспериментальные ограничения на возможное космологическое изменение одной из фундаментальных физических констант, характеризующей электромагнитное и ядерное взаимодействия – отношение масс протона и электрона, $\mu = m_p/m_e$.

[1] J.-P. Uzan, *Reviews of Modern Physics* **75** (2003) 403-455.

[2] A. Ivanchik, D. Varshalovich, and P. Petitjean, *Eur. Phys. J. (ST)* **163** (2008) 191-196.

Недавний прогресс в уточнении значений фундаментальных физических констант (по материалам рабочей группы CODATA)

С. Г. Каршенбойм

ГНЦ “Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева”

Представлен краткий обзор мировых данных по фундаментальным физическим константам и результатов их совместной обработки, т.е., новых рекомендованных значений фундаментальных констант (P.J. Mohr, B.N. Taylor, and D.V. Newell, *CODATA Recommended values of the fundamental physical constants: 2006* [1]). Следуя анализу, описанному ранее [2], все данные разбиты на блоки. Поблочно обсуждаются как новые оригинальные экспериментальные и теоретические результаты, так и их следствия для новых рекомендованных значений. Проведено сравнение с предыдущими наборами рекомендованных значений (см. Рис. 1). Подробный обзор представлен в [3].

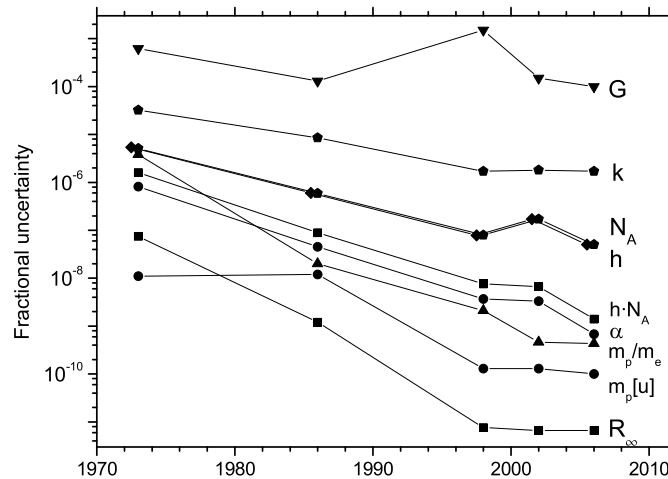


Рис. 1: Прогресс в определении значений фундаментальных физических констант в Согласованиях КОДАТА

-
- [1] P.J. Mohr, B.N. Taylor, and D.V. Newell, *Rev. Mod. Phys.* **80** (2008) 633.
 - [2] С.Г. Каршенбойм, *УФН* **175** (2005) 271.
 - [3] С.Г. Каршенбойм, *УФН* **178** (2008) 1057.

Транспортируемый эталон вольты, основанный на квантовом эффекте Джозефсона, и международные сличения эталонов

А. С. Катков

ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”

Внедрение в метрологическую практику эталонов напряжения на основе использования установок на эффекте Джозефсона поставило задачу их метрологического обеспечения, которая заключается в сличении их с первичным эталоном вольты. В результате проводимых сличений единица напряжения, воспроизводимая национальным эталоном, передается эталоном более низкого разряда на высоком уровне точности, тем самым обеспечивается единство измерений в стране в области постоянного электрического напряжения.

Прямые сличения джозефсоновских установок позволяющие проводить измерения на высшем уровне точности (10^{-9}) требуют транспортировки комплекса аппаратуры эталона, что не является приемлемым по ряду технических и экономических аспектов.

Разработка транспортируемого варианта меры напряжения на основе эффекта Джозефсона [1], позволяет решить задачу сличений эталонов напряжения на высоком уровне точности, повысить надежность результата сличения, выявить на месте эксплуатации эталона уровень систематических и случайных погрешностей при проведении реальных измерений. Разработанный вариант меры напряжения включает:

- криогенный преобразователь частота-напряжение, на основе интегральной джозефсоновской микросхемы типа SINIS с безгистерезисной вольтамперной характеристикой;

- генератор миллиметрового диапазона (75 ГГц) на основе диода Ганна с удвоением частоты и системой ФАПЧ, синхронизирующей выходной сигнал с опорной частотой 5 или 10 МГц;

- блок питания генератора и блок источника тока для интегральной микросхемы.

Исследование эталона сравнения проведено в Физико-техническом институте Германии (ПТБ) [2]. Результаты сличений показали, что напряжения воспроизводимые эталонами ПТБ и ВНИИМ, с учетом неопределенности, вносимой эталоном сравнения, соотносятся как УПТБ УВНИИМ = -0.2 нВ; при суммарной стандартной неопределенности $u_C = 0.6$ нВ.

Разработанный эталон использован для проведения ключевых сличениях национальных эталонов вольты (проект Евромет №723), в котором приняли участие 12 стран Европы, включая Россию, и МБМВ [3].

[1] А. С. Катков. Измерительная техника. (2005) 2 , 48-51.

[2] A. Katkov et.al. Metrologia (2003) 40, 89-92.

[3] Behr R. and Katkov A. S. Metrologia. 42, (2005) - 01005

Лабораторные молекулярные эксперименты по поиску вариации фундаментальных констант

М. Г. Козлов

Петербургский Институт Ядерной Физики

Гипотезы о возможных вариациях в пространстве и во времени фундаментальных физических констант высказывались очень давно [1]. Однако, в последнее время интерес к экспериментальной проверке таких гипотез существенно возрос (см. обзор [2]). Во-первых, это связано с недавним обнаружением темной энергии, что существенно подняло статус теорий, которые предсказывают такие вариации. Во-вторых, исключительно быстрый прогресс экспериментальных методов привел к быстрому росту чувствительности лабораторных экспериментов и сделал их конкурентноспособными по сравнению с астрофизическими наблюдениями, где имеется возможность исследовать гораздо большие пространственно-временные интервалы.

В настоящее время все лабораторные эксперименты указывают на неизменность таких фундаментальных констант, как постоянная тонкой структуры $\alpha \equiv e^2/\hbar c$ и отношение масс электрона и протона $\mu \equiv m_e/m_p$. До самого последнего времени наиболее жесткие ограничения получались в экспериментах с использованием атомных часов [3]. Лишь совсем недавно появились сопоставимые по точности результаты молекулярных экспериментов [4]. В первую очередь это относится к ограничениям на вариацию отношения масс μ . Дело в том, что вращательно-колебательные спектры молекул имеют существенно большую чувствительность к вариации μ , чем оптические спектры атомов. Еще более высокую чувствительность к вариации μ могут иметь частоты переходов между компонентами Λ -дублетов и инверсионные переходы в таких молекулах, как аммиак [5]. Кроме этого, в молекулах могут существовать случайные вырождения уровней различной природы. В таких случаях может существенно усиливаться чувствительность как к вариации μ , так и к вариации α [6].

Сейчас происходит бурный прогресс в методах получения ультрахолодных молекул. Это должно существенно повысить точность молекулярных экспериментов. Соответственно, обсуждение возможных молекулярных экспериментов по поиску вариации фундаментальных постоянных представляется весьма своевременным.

[1] P. A. M. Dirac, Nature **139**, 323 (1937).

[2] V. V. Flambaum and M. G. Kozlov (2007), arXiv:0711.4536.

[3] T. Rosenband et al., Science p. 1154622 (2008).

[4] A. Shelkownikov, et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 150801 (2008).

[5] J. van Veldhoven, et al., Eur. Phys. J. D **31**, 337 (2004).

[6] V. V. Flambaum and M. G. Kozlov, Phys. Rev. Lett. **99**, 150801 (2007).

Двухфотонная спектроскопия атома водорода и дейтерия и измерение сверхтонкого расщепления 2s состояния

Н. Н. Колачевский^{a,b}, А. Н. Матвеев^{a,b}, Я. Алнис^b, К. Партей^b, Т. В. Хэнш^b

^a Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991
Москва, Россия

^b Институт по квантовой оптике общества Макса Планка, Hans-Kopfermann
Str. 1, 85748 Garching, Germany

Успехи в области стабилизации лазеров, измерения оптических частот, а также лазерного охлаждения атомов открыли возможность сравнивать оптические частоты вплоть до 17 знака после запятой [1], что превысило точность реализации секунды (СИ) с помощью Cs фонтанов [2]. Кроме этого впечатляющего результата можно привести и ряд других примеров, когда оптические методы позволяют достичь более высокой точности, чем классические методы радиочастотной спектроскопии.

Нами разработан новый оптический метод измерения сверхтонкого расщепления 2S уровня $f_{\text{hfs}}(2S)$ в атомном водороде и дейтерии [3], основывающийся на двухфотонной спектроскопии перехода 1S-2S. Интерес к величине обусловлен возможностью выполнять чувствительные тесты квантовой электродинамики, которые базируются на анализе специфической разности $D_{21} = 8f_{\text{hfs}}(2S) - f_{\text{hfs}}(1S)$ [4].

В 2002-2004 гг. были выполнены измерения в атомах водорода и дейтерия, получены значения 177 556 860(16) Гц и 40 924 454(7) Гц (соответственно), погрешность которых оказалась в несколько раз ниже, чем у известных радиочастотных измерений. В 2008 г. была проведена серия измерений в атоме водорода с использованием нового сверхстабильного опорного лазерного источника. Ширина спектра данного источника составляла 0.5 Гц при том, что дрейф частоты находился на уровне 50 мГц/с [5]. Использование этой системы позволило снизить разброс данных и выполнить более тщательный анализ ряда систематических эффектов, дающих вклад в сдвиги частоты. В результате предварительного анализа получено значение 177 556 834.3(6.7) Гц, находящееся в прекрасном согласии с теоретическим предсказанием, основывающимся на вычислении разности D_{21} . Измерения в водороде и дейтерии позволяют проанализировать малые поправки КЭД, гармонично дополняя результаты анализа D_{21} для иона He⁺.

[1] T. Rosenband *et al.*, *Science* **319**, 1808 (2008).

[2] S. Bize *et al.*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38**, S44968 (2005).

[3] N. Kolachevsky *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 033003 (2004).

[4] S.G. Karshenboim, V.G. Ivanov, *Phys. Lett. B* **524**, 259 (2002).

[5] J. Alnis *et al.*, *Phys. Rev. A* **77**, 053809 (2008).

Метод учета виртуальных переходов в континууме в теории многозарядных ионов

С. А. Запрягаев, Н. Л. Манаков, С. И. Мармо, С. А. Свиридов

Воронежский государственный университет

Создание источников интенсивного когерентного излучения высокой частоты (лазеры на свободных электронах, высшие гармоники оптических лазеров) открывает возможности экспериментального наблюдения упругого и неупругого рассеяния рентгеновского излучения, включая рассеяние на внутренних оболочках тяжелых атомов или многозарядных ионов. Основная трудность в теоретическом описании таких процессов состоит в вычислении суммы по промежуточным состояниям кулоновского континуума в том случае, когда энергия поглощаемого фотона превосходит энергию связи электрона в атоме: $\hbar\omega > |E_0|$. В этом случае хорошо известное стандартное штурмовское разложение кулоновской функции Грина (КФГ) уравнения Дирака не может быть использовано, поскольку оно приводит к сходящемуся ряду для амплитуд электромагнитных переходов только при $\hbar\omega < |E_0|$. В работе показано, что использование обобщенного штурмовского разложения КФГ уравнения Дирака, которое содержит свободный параметр α (ср. аналогичное преобразование в [1] для нерелятивистской КФГ), приводит к достаточно быстро сходящимся рядам для релятивистских двухфотонных матричных элементов в надпороговой области энергий фотонов при соответствующем выборе (комплексного) свободного параметра α . В качестве примера применения развиваемой техники расчета релятивистских двухфотонных амплитуд в надпороговой области энергий фотонов проведены вычисления электрически-дипольной динамической поляризуемости основных состояний водородоподобных ионов с $Z < 137$ (Z — заряд ядра). Полученные результаты показывают, что предложенный метод вычисления составных матричных элементов, позволяющий аналитически выполнить интегрирование по радиальным переменным и свести задачу к суммированию ряда из гипергеометрических функций, является перспективным для расчета радиационных переходов в многозарядных водородоподобных ионах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №07-02-00574).

[1] А.А. Крыловецкий, Н.Л. Манаков, С.И. Мармо, ЖЭТФ **119** (2001) 45.

Сверхтонкая структура легких мюонных атомов

А. П. Мартыненко^a, Р. Н. Фаустов^b

^a Самарский государственный университет

^b Вычислительный центр РАН им. Дородницына

Легкие мюонные атомы (мюонный водород, мюонный дейтерий, ионы мюонного гелия) выделяются среди всех водородоподобных атомов тем, что положение их уровней энергии в большей степени зависит от эффектов поляризации вакуума, отдачи, структуры и поляризуемости ядра [1, 2]. Мы выполнили расчет вкладов порядка α^5 и α^6 в сверхтонкой структуре S - и P -уровней энергии мюонного водорода и иона мюонного гелия $(\mu \text{ } ^3_2\text{He})^+$, связанных с электронной поляризацией вакуума, эффектами отдачи и структуры ядра, релятивистскими поправками, роль которых является определяющей для увеличения теоретической точности. Полученные нами результаты для сверхтонкой структуры S -уровней энергии [3, 4] представлены в таблице 1.

Мюонный атом	$\Delta E^{HFS}(1S)$, мэВ	$\Delta E^{HFS}(2S)$, мэВ
Мюонный водород	182.62	22.813
Ион мюонного гелия	-1334.56	-166.62

Таблица 1: Сверхтонкое расщепление $1S$ - и $2S$ -состояний в мюонном водороде (μp) и ионе мюонного гелия $(\mu \text{ } ^3_2\text{He})^+$.

В случае мюонного водорода численные значения тонкой и сверхтонкой структуры P -уровней энергии равны соответственно [4]: $\Delta E^{fs} = E(2P_{3/2}) - E(2P_{1/2}) = 8352.08$ мкэВ, $\Delta E^{HFS}(2P_{1/2}) = 7819.80$ мкэВ, $\Delta E^{HFS}(2P_{3/2}) = 3248.03$ мкэВ. Все полученные результаты могут служить надежной оценкой при сравнении с будущими экспериментальными данными, а интервалы сверхтонкой структуры:

$$\Delta_{12}(\mu p) = 8\Delta E^{HFS}(2S) - \Delta E^{HFS}(1S) = -0.120 \text{ мэВ},$$

$$\Delta_{12}((\mu \text{ } ^3_2\text{He})^+) = 8\Delta E^{HFS}(2S) - \Delta E^{HFS}(1S) = 1.64 \text{ мэВ}$$

для проверки предсказаний квантовой электродинамики с точностью 0.01 мэВ.

[1] E. Borie, Z. Physik A **278** (1976) 127.

[2] K. Pachucki, Phys. Rev. A **53** (1996) 2092.

[3] А. П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов, ЖЭТФ **125** (2004) 48.

[4] А. Р. Martynenko, Phys. Rev. A **71** (2005) 022506; ЯФ **71** (2008) 126; ЖЭТФ **133** (2008) 794.

Гравитационная постоянная и ее возможные вариации

В. Н. Мельников^а

^аВНИИМС, Москва, 119361, Озерная ул. 46

Гравитация как фундаментальное взаимодействие, управляющее всеми явлениями на больших и малых расстояниях, но все ещё недостаточно понятное на квантовом уровне, является недостающим существенным звеном в проблеме объединения всех фундаментальных физических взаимодействий. Открытие современного ускорения Вселенной, а также возникшие в связи с этим проблемы описания темной материи и темной энергии также являются существенным вызовом современной физике, который может привести к новой революции в наших знаниях. Многомерные интегрируемые модели гравитации и космологии представляют собой адекватные подходы к изучению этих фундаментальных проблем, а также объектов в сильных полях, ранней и современной стадий эволюции Вселенной, стабильности фундаментальных констант.

Проблемы измерения абсолютного значения G и её возможных вариаций по времени и пространству являются отражением проблем объединения взаимодействий. Описываются выбор, природа, классификация и точность определения фундаментальных физических констант, а также их роль к планируемому в 2001 г. переходу к новым определениям единиц СИ, основанным на фундаментальных физических константах. Обсуждается также проблема вариаций фундаментальных констант по времени, вариации G по времени и пространству в частности. Указана необходимость дальнейших измерений абсолютного значения и вариаций G . Кратко описан проект космического эксперимента SEE, предназначенного для измерения G и её стабильности по времени и пространству, который позволит улучшить имеющиеся оценки на 3-4 порядка.

Работа поддержана частично грантом РФФИ 07-02-13614-офи-ц.

-
- [1] V.N. Melnikov. Proc.2000 NASA/JPL Conf. "Fundamental Physics in Microgravity", NASA Document D-21522, (2001), 4.1-4.17.
 - [2] V.N. Melnikov. AIP Conf. Proc. **861** (2006) 109.
 - [3] С.А. Кононогов, В.Н. Мельников, Измерит. Техника, **6** (2005) 3.
 - [4] V.N. Melnikov, Grav. & Cosm., **13** (2007) 81.
 - [5] V.N. Melnikov. Progr. Theor. Phys., Suppl., **172** (2008) 182.

Эксперименты с моноэнергетическим пучком позитрония

И. Н. Мешков

ОИЯИ, Дубна

В Объединённом Институте Ядерных Исследований (Дубна) сооружён и находится в стадии запуска накопитель позитронов с электронным охлаждением LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator). Накопитель является генератором направленных потоков ортопозитрония (o-Ps), который генерируется при рекомбинации пучка позитронов, циркулирующих в накопителе, с однопролётным электронным пучком. Основным преимуществом такого метода является генерация позитрония в чистых вакуумных условиях. Среди других достоинств метода - малый угловой (~ 1 мрад) и энергетический ($\leq 10^{-3}$) разбросы потока атомов и возможность прецизионной перестройки энергии (скорости) атомов в диапазоне $4 \div 10$ кэВ/частицу.

В докладе представлено состояние работ по вводу накопителя в действие и программа экспериментов по физике позитрония, включающая:

1. Исследование процесса электрон-позитронной рекомбинации.
2. Экспериментальную проверку квантовой электродинамики в измерениях времени жизни парапозитрония (эксперимент PALM).
3. Экспериментальную проверку СРТ теоремы, поиск CP и P нарушений в распадах позитрония:
 - 3.1. Редкие и запрещённые распады o-Ps.
 - 3.2. Редкие и запрещённые распады p-Ps.
 - 3.3. Поиск циркулярно поляризованных фотонов в распадах p-Ps $\rightarrow \gamma\gamma$.
 - 3.4. Измерение верхнего предела разности электрических зарядов электрона и позитрона на потоках o-Ps.
4. Экспериментальную проверку квантовой электродинамики в спектроскопии Ps:
 - 4.1. Спектроскопию сверхтонкой структуры основного состояния Ps.
 - 4.2. Спектроскопию структуры возбуждённых состояний Ps, измерение лэмбовского сдвига.
5. Поиск лёгкого аксиона.
6. Прецизионные измерения времени жизни o-Ps и проверка гипотезы “Зеркальной Вселенной”.
7. Исследования по физике твёрдого тела на специализированном канале моноэнергетических позитронов.

Об исследовании ЯМР спектров простейших газов для определения магнитных моментов легчайших ядер

Ю. И. Неронов^а

^а ВНИИМ им. Д.И. Менделеева

За последние годы погрешность определения атомных масс легчайших ядер существенно уменьшена [1] и следует ожидать снижение погрешности при определении магнитных моментов легчайших ядер.

С минимальной погрешностью магнитный момент дейтрона в единицах магнитного момента протона $\mu_d/\mu_p = 0.307\,012\,207\,85(35)$ был определен [2] с помощью ЯМР спектроскопии при одновременной регистрации сигналов от протонов и дейтронов молекулярного дейтериевого водорода HD. Причем, использовалось поле сверхпроводящего магнита (4.7 Тл), но без стабилизации поля по ЯМР сигналу от третьего ядра. Далее эта ФФК определялась в работе [3] в поле 7,05 Тл, однако сигналы от протонов и дейтронов регистрировали не одновременно, а последовательно и связь двух шкал (протонных и дейтронных сигналов) осуществляли с помощью сигналов от изотопной смеси: $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ и $(\text{CD}_3)_2\text{CO}$. Оба способа не являются оптимальными для достижения минимальной погрешности и для этой ФФК планируются новые эксперименты.

Магнитный момент трития $\mu_t/\mu_p = 1.066639908(3)$ был определен более 30 лет назад в экспериментах [4] с использованием водорода с изотопным замещением HT. Причем, поскольку авторы [4] смогли изготовить образец с радиоактивным тритием при давлении около 130 атмосфер, то повторить такую работу, подтвердить или опровергнуть результат, будет очень трудно.

Магнитный момент гелия-3 с сопоставимой малой погрешностью определяли в работах [5], с результатом $\mu_{(\text{He}_3)}/\mu_{(\text{H}_2)} = 0.761786635(4)$, и [6], с результатом $\mu_{(\text{He}_3)}/\mu_{(\text{H}_2\text{O})} = 0.7617861313(33)$. Как видим, в этих работах ЯМР сигналы от гелия-3 регистрировали относительно протонов водорода и протонов воды. Однако разность экранирования протонов в водороде и в воде доступна для прямых достаточно точных измерений. С учетом данных по разности экранирования протонов в воде и водороде [5], два представленных результата для $\mu_{(\text{He}_3)}$ [5,6] расходятся на более чем на десять стандартных отклонений и требуются новые измерения.

[1] P.J. Mohr *et al.*, Rev. Mod. Phys., **72**, No. 2, April 2000.

[2] М. В. Горшков *и др.*, ДАН СССР, **305**, № 6, (1989) 1362.

[3] Yu.I. Neronov, S.G. Karshenboim, Physics Letters A **318**, (2003) 126.

[4] Ю.И. Неронов, А.Е. Барзах., ЖЭТФ, **72** (1977) 1695.

[5] Ю.И. Неронов, А.Е. Барзах., ЖЭТФ, **75** (1978) 1521.

[6] J.L. Flowers *et al.*, Metrologia **30** (1993) 75.

Ограничения на изменение фундаментальных констант, следующие из анализа геофизических данных природного реактора в Окло

М. С. Онегин

Петербургский институт ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН

Кратко описывается история открытия природного ядерного реактора в Окло (Африка, Габон), а также история возникновения идеи о возможности получения ограничений на изменение фундаментальных констант, исходя из геохимического анализа породы содержащей его продукты деления. Поскольку сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами ^{149}Sm и $^{155,157}\text{Gd}$ определяется положением низколежащего резонанса, полученные из анализа сечения захвата нейтрона указанными ядрами приводят к ограничениям на сдвиг резонанса за 2 млрд лет, прошедших с момента функционирования реактора в Окло. Приводятся ограничения на изменение константы электромагнитного взаимодействия, полученные в результате анализа накопления изотопов ^{149}Sm и Gd в работах Дамура и Дайсона (см. [1]) и Фуджи и др. (см. [2]).

Показана важность корректного учета нейтронного спектра в реакторе для определения положения резонанса исходя из данных по сечению радиационного захвата. Использование реалистического реакторного спектра (характерного для состава зоны 2 природного реактора) приводит к новым ограничениям на сдвиг низколежащего резонанса в ядре ^{149}Sm ([3, 4]). Приводятся результаты компьютерного тестирования методики определения эффективного флюенса нейтронов по накоплению изотопа ^{143}Nd и сечения захвата нейтрона ядром ^{149}Sm по изотопному составу изотопов Sm в руде.

Анализируется влияние изменения параметров электромагнитного и сильного взаимодействия на положение резонанса. Приводятся ограничение на изменение параметров сильного ($X_q = m_q/\Lambda_{QCD}$) и электромагнитного взаимодействий (α), следующие из полученных данных по положению низколежащего резонанса в ^{149}Sm во время работы реактора. Анализируется влияние гипотезы Великого объединения на приведенные ограничения.

[1] T. Damour and F. Dayson, Nucl. Phys. B**480** (1996) 37.

[2] Ya. Fujii *et al.*, Nucl. Phys. B**573** (2000) 377.

[3] Yu. V. Petrov *et al.*, Phys. Rev. C**74** (2006) 064610.

[4] C. R. Gould, E. I. Sharapov and S.K. Lamoreaux, Phys. Rev. C**74** (2006) 024607.

Адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона

А. А. Пивоваров

*Институт ядерных исследований РАН
117312 Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а*

Дан обзор теоретических вычислений аномального магнитного момента мюона в стандартной модели взаимодействий элементарных частиц.

Проверка теории относительности и ограничения на вековое изменение гравитационной постоянной по современным наблюдениям планет и космических аппаратов

Е. В. Питьева

Институт Прикладной Астрономии РАН

Точность классических меридианных наблюдений планет составляла $0''5$, что вполне соответствовало аналитическим теориям движения планет, использовавшимся до 60-х годов прошлого века. Прогресс в развитии техники, введение в астрономическую практику Международной шкалы атомного времени и новых радиотехнических наблюдательных методов (локация планет и Луны, траекторные измерения, интерферометрия спутников и квазаров) привели к революции в астрометрии и эфемеридной астрономии. Точность радарных наблюдений космических аппаратов (КА), на которых основываются эфемериды внутренних планет, достигает 1 м (10^{-12} в расстояниях). Точность радиоинтерферометрических наблюдений КА около планет на фоне квазаров, которые определяют ориентацию планетных эфемерид, составляет меньше миллисекунды дуги. В настоящее время оптические наблюдения планет и их спутников – это ПЗС наблюдения, точность их уже достигла $0''05$.

Современные высокоточные позиционные наблюдения планет и КА позволяют улучшать не только орбитальные элементы планет, и константы, связанные с эфемеридами, такие как величина астрономической единицы, массы и вращение планет, но и определять некоторые физические параметры, характеризующие фундаментальные свойства нашего физического пространства.

Более 400000 позиционных наблюдений планет и КА разных типов, в основном, радиотехнических (1961–2008 гг.), были использованы для тестирования релятивистских параметров и оценки изменения гравитационной постоянной. Анализ наблюдений проводился на основе эфемерид ЕРМ ИПА РАН, построенных совместным численным интегрированием уравнений движения девяти больших планет, Солнца, Луны, астероидов и транс-нептуновых объектов, выполненным в постньютоновском приближении.

Главный и лучше всего определяемый релятивистский эффект в солнечной системе — это вековое движение перигелия Меркурия, который определяется линейной комбинацией ППН параметров (β , γ) и сжатием Солнца (J_2). Однако, β , γ и J_2 вызывают различные вековые и периодические эффекты в орбитальных элементах всех планет, и поэтому их удалось получить из совместного решения: квадрупольный момент Солнца $J_2 = (2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-7}$, $|\beta - 1| < 0.0002$, $|\gamma - 1| < 0.0002$, верхний предел на возможное изменение гравитационной постоянной $|\dot{G}/G| < 5 \cdot 10^{-13}$ в год.

Из наблюдаемых поправок к теоретическим значениям движения перигелия внутренних планет можно получить оценку на верхний предел плотности темной материи в Солнечной системе, а значения поправок для внешних планет существенно ограничивают альтернативные теории гравитации, привлекаемые для объяснения аномального ускорения КА Pioneers.

Результаты измерений величины R с детекторами КМД-2 и СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2М.
Перспективы улучшения точности до уровня 10^{-3} в экспериментах с детектором КМД-3 на ВЭПП-2000

Г. В. Федотович^а

^а *Институт ядерной физики им. Г.И. Буджера, Новосибирск, СО РАН*

^б *Новосибирский государственный университет*

В докладе обсуждаются результаты измерений адронных сечений с детекторами КМД-2 и СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2М в области низких энергий. Известно, что основной вклад в аномальный магнитный момент мюона дает канал двух пионной аннигиляции. Сечение этого процесса было измерено при сканировании по энергии в широком диапазоне от 0.34 до 1.9 ГэВ² с точностью лучше чем 1% [1], [2]. При наборе статистики в каждой точке измерялась средняя энергия электрон-позитронных пучков, используя метод резонансной деполяризации, с систематической ошибкой меньше 10^{-4} . Это позволило значительно уменьшить вклад в ошибку при вычислении адронных сечений из-за неточности знания энергии пучков в коллайдере ВЭПП-2М. Анализ экспериментальных данных показал, что основными источниками систематических ошибок при вычислении адронных сечений являются: эффективность первичного триггера и реконструкции событий, определение углового акцептанса детектора и процедуры разделения событий, радиационные поправки и потери пионов, вызванные ядерным взаимодействием с веществом детектора. Чтобы уменьшить систематическую ошибку при измерении адронных сечений до уровня точности 10^{-3} в предстоящих экспериментах с детектором КМД-3 на новом электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000, необходимо улучшить как точность вычисления радиационных поправок, так и значительно повысить координатное разрешение трековой системы детектора и энергетического разрешения электромагнитного калориметра. В настоящее время детектор СНД готов к набору статистики, а на КМД-3 заканчивается модернизация подсистем детектора и изготовление и наладка оцифровывающей электроники.

[1] R.R.Akhmetshin *et al.*, Phys.Lett. **578** (2004) pp. 285 - 289

[2] M.N.Achasov *et al.*, J. Exp. and Theor. Phys. **103** (2006) pp. 380 - 384

Аномальный магнитный момент мюона: измерение в BNL и перспективы

Б. И. Хазин^{a,b}

^a *Институт ядерной физики им. Г.И. Буджера, Новосибирск, СО РАН*

^b *Новосибирский государственный университет*

В 2004 году был опубликован результат эксперимента по измерению аномального магнитного момента мюона [1] в Брукхэйвенской национальной лаборатории, США, который оказался равным $a_\mu = 11659208.0(5.4)(3.3) \times 10^{-10}$. В скобках приведены статистическая и систематическая неточности измерения, так что полная ошибка составляет 0.54 ppm. Точность измерения величины a_μ до этого эксперимента составляла 7 ppm, что примерно соответствует вкладу адронной поляризации вакуума и начальной целью нового эксперимента являлось обнаружение вклада слабых взаимодействий. Однако, за время подготовки и проведения эксперимента, точность измерения адронной поляризации и электрослабых расчетов выросли настолько, что сравнение измеренной величины a_μ с расчетом превратилось в чувствительный тест Стандартной Модели. Согласно последним оценкам, обзор которых будет представлен в докладе Г.В. Федотовича на этом совещании, отличие от расчета превышает три стандартных отклонения. Как видно из приведенных статистической и систематической ошибок, увеличение статистики могло бы в 1.5 раза улучшить точность измерения, однако финансовые трудности не позволили его продолжить.

Идея эксперимента заключалась в измерении калориметрическими счетчиками зависимости скорости счета лептонов в распаде $\mu \rightarrow l\nu\bar{\nu}$ от угла между направлениями спина и импульса мюона, которая возникает вследствие несохранения четности в этом распаде. Пучок продольно поляризованных мюонов инжектировался в кольцо радиусом 6.6 метров с магнитным полем 1.45 Тл. Аномальная часть магнитного момента приводила к повороту спина относительно направления импульса мюонов, и стоящие внутри кольца калориметрические счетчики регистрировали модуляцию скорости счета распадных лептонов. Частота этих модуляций прямо связана с величиной a_μ .

Развитие теоретических методов расчета и ожидаемое увеличение точности в определении вклада адронной поляризации вакуума стимулируют продолжение экспериментов по измерению величины a_μ . В настоящее время обсуждаются возможности этих измерений в лаборатории им. Энрико Ферми, США и JPARC, Япония с точностью в 5 - 10 раз лучше достигнутой.

[1] G. W. Bennet *et al.*, Phys.Rev.Lett. **92** (2004) 161802.

Электрические дипольные моменты элементарных частиц, от электрона до t-кварка

И. Б. Хриплович

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

Обсуждаются ограничения на дипольные моменты элементарных частиц, следующие из экспериментов при высоких энергиях и из поисков ЭДМ электрона.

Квантовая электродинамика тяжелых ионов и атомов

В. М. Шабаев

Санкт-Петербургский государственный университет

Рассмотрена квантовая электродинамика (КЭД) тяжелых ионов и атомов. В отличие от легких атомов, которые представляют собой слабосвязанные системы, исследование тяжелых ионов дает уникальную возможность проверки КЭД в случае сильной связи. В приближении бесконечно тяжелого ядра это отвечает проверке КЭД в сильных полях. Перечисляются последние достижения теории и эксперимента в рассматриваемой области и обсуждаются приложения этих исследований к прецизионному определению фундаментальных констант. Также обсуждается недавний прогресс в расчетах КЭД поправок к эффекту несохранения четности в нейтральном цезии и его значение для проверки Стандартной Модели.

Сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона в накопителе

Ю. М. Шатунов

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

В докладе дается описание эксперимента по сравнению аномальных магнитных моментов релятивистских электронов и позитронов, проведенного на накопителе ВЭПП-2М в 1987 году. В эксперименте было показано, что разница не превышает величины $1 \cdot 10^{-8}$ на уровне достоверности 95%. Обсуждается также возможность повышения точности сравнения на 2-3 порядка.

Сверхтонкое расщепление в мюонии. Радиационные поправки к отдаче

В. А. Шелюто^а, М. И. Эйдес^{б,с}

^а ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург

^б Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина

^с Department of Physics and Astronomy, University of Kentucky, USA

Рассматриваются трехпетлевые радиационные поправки к отдаче к сверхтонкому расщеплению основного состояния мюонии. Ведущие вклады, содержащие куб и квадрат логарифма отношения масс мюона и электрона, получены много лет назад (см., например, обзор в [1]). Позднее были вычислены линейные логарифмы и константы для ряда калибровочно-инвариантных наборов диаграмм (подробно в [2]). В данной работе найден вклад диаграмм, содержащих вставку электронной и мюонной поляризации вакуума в радиационный фотон, прикрепленный к электронной либо мюонной линии. На Рис. 1 в качестве примера изображен калибровочно-инвариантный набор диаграмм, соответствующий вставке электронной поляризации

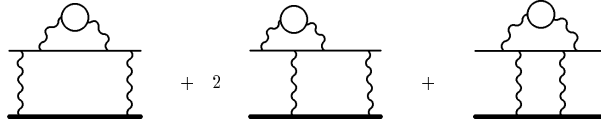


Рис. 1: Типичные трехпетлевые радиационные поправки

в радиационный фотон, связанный с электронной линией. Кроме него в данной работе вычислены еще три симметричных набора диаграмм: мюонная поляризация в электронной линии, электронная поляризация в мюонной линии и мюонная поляризация в мюонной линии. Сумма всех четырех калибровочно-инвариантных наборов диаграмм равна

$$\delta E = \frac{\alpha^3}{\pi^3} \frac{m}{M} E_F \left[\left(3\zeta(3) - 2\pi^2 \ln 2 + \pi^2 - \frac{67}{12} \right) \ln \frac{M}{m} + 17.072 \right],$$

где m и M – электронная и мюонная массы, E_F – энергия Ферми, α – постоянная тонкой структуры, ζ – дзета-функция Римана.

[1] M. I. Eides, H. Grotch and V. A. Shelyuto, Theory of Light Hydrogenic Bound States, 260 pages, Springer, Berlin – Heidelberg – New York, 2007.

[2] M. I. Eides, H. Grotch and V. A. Shelyuto, Three-Loop Radiative Corrections to Lamb Shift and Hyperfine Splitting, Can. J. of Physics, **85** (2007) 509.

Прецизионные измерения магнитного поля и гиромагнитное отношение протона и гелиона

В. Я. Шифрин^а

^а ВНИИМ им. Д.И. Менделеева

Со времени начала международного сотрудничества метрологов в области экспериментального определения ФФК - с 60-х годов 20-го века – ВНИИМ им. Менделеева активно участвовал в этих исследованиях в части определения и уточнения гиромагнитного отношения протона γ'_p . Во ВНИИМ было выполнено 3 полных цикла экспериментального определения γ'_p , в которых погрешность в конечном итоге была снижена до $1,8 \cdot 10^{-7}$ в единицах СИ, что является одним из лучших результатов в мире.

Совместный эксперимент ВНИИМ и KRISS позволил определить более точные значения γ'_p , гиромагнитных отношений гелиона и атома гелия-4. Результаты, полученные при выполнении работы, являются научно-технической основой создания и развития эталонной базы в области магнитных измерений, а также используются в качестве входных данных CODATA при согласовании и уточнении рекомендованных значений ФФК.

Эксперимент по определению γ'_p включает в себя две части - измерение геометрической константы токнесущей обмотки соленоида, имеющей размерность Тл/А, и определение отношения магниторезонансной частоты образца, помещенного в рабочее пространство соленоида к его магнитной индукции. Размерность определяемого во второй части эксперимента отношения – $(\text{с} \cdot \text{Тл})^{-1}$.

Основной особенностью данной работы является применение метода двойного радиооптического атомного магнитного резонанса (АМР) в газовых образцах смеси гелия-4 и цезия вместо традиционного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в образцах воды для измерений Зеемановской частоты.

АМР-техника в ^4He с использованием гелий-щелочных газообразных рабочих веществ имеет существенные преимущества по сравнению не только с традиционным протонным резонансом, но и с ЯМР в ^3He . Это определяется, прежде всего, в сотни раз большими частотами АМР, а также гораздо более эффективным оптическим методом детектирования сигнала. Оказывается возможным существенно снизить относительную погрешность определения действительной частоты АМР в ^4He по сравнению с протонным резонансом. Поэтому техника АМР в ^4He была эффективно применена в данном эксперименте для преобразования магнитной индукции в Зеемановскую частоту.

Две важные для прогресса в повышении точности определения γ'_p идеи, предложенные в NIST (США), также были реализованы. Это однослойный кварцевый соленоид с пятитоковой системой питания для воспроизведения высокооднородного поля и индукционно-лазерный метод измерений размеров обмотки соленоида.

Экспериментально измеренное в NPL (Великобритания) отношение $\gamma_{^3\text{He}}/\gamma'_p$ (СКО $4 \cdot 10^{-9}$) и полученная нами константа $\gamma_{^4\text{He}}/\gamma_{^3\text{He}}$ (СКО $3 \cdot 10^{-8}$) были приняты для перехода от $\gamma_{^4\text{He}}$ к γ'_p , а также для определения гиромагнитного отношения гелиона.

Стендовые доклады

g -фактор многозарядных ионов и постоянная тонкой структуры

Д. А. Глазов^а, А. В. Волоotka^б, В. М. Шабает^а, И. И. Тупицын^а, Г. Плюниен^б

^а*Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,
198504 Петергоф, Санкт-Петербург, Россия*

^б*Institut für Theoretische Physik, TU Dresden, D-01062 Dresden, Germany*

Высокоточные измерения g -фактора водородо-подобных ионов углерода и кислорода, проведённые недавно в университете г. Майнц в Германии (Mainz-GSI collaboration) в сочетании с необходимыми теоретическими расчётами позволили определить массу электрона с точностью, превышающей точность принятого на тот момент значения в 4 раза. В рамках проекта HITRAP в GSI планируется проведение аналогичных экспериментов с тяжёлыми ионами. В нашей работе [1] было показано, что при рассмотрении специфической разности значений g -фактора тяжёлых водородо-и боро-подобного ионов с одинаковым ядром эти эксперименты позволят определять значение постоянной тонкой структуры с точностью на уровне самых последних экспериментов со свободным электроном [2].

В данной работе представлен высокоточный квантовоэлектродинамический расчет g -фактора основного состояния бороподобных ионов в широком диапазоне заряда ядра. Используемые методы вычислений уже применялись для литиеподобных ионов в работах [3, 4]. Однопетлевые КЭД поправки вычислены в эффективном экранирующем потенциале. Насколько нам известно, это первый полностью корректный расчет КЭД поправок к g -фактору состояния $2p$. Поправка на однофотонный обмен вычислена в рамках КЭД. Для учета поправок высших порядков по межэлектронному взаимодействию применен метод взаимодействия конфигураций в базисе орбиталей Дирака-Фока-Штурма. В результате получены наиболее точные на сегодня значения g -фактора бороподобных ионов.

[1] V. M. Shabaev *et al.*, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 253002.

[2] G. Gabrielse *et al.*, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 120801.

[3] D. A. Glazov *et al.*, Phys. Rev. A 70 (2004) 062104.

[4] D. A. Glazov *et al.*, Phys. Lett. A 357 (2006) 330.

Техника Фелла и возможности ее обобщения при расчетах тонких сдвигов методом квазипотенциала

С. В. Клещевская^a, Ю. Н. Тюттяев^a, Р. Н. Фаустов^b

^a ГОУ ВПО Саратовский государственный университет

^b Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН

1. Квазипотенциальный подход дает для вычисления логарифмического вклада по постоянной тонкой структуре α во втором порядке теории возмущений ту же величину, что и исходный интеграл, исследуемый в работе [1]. Этот вклад в технике Фелла [2] дается интегралом $i = \int \frac{d^3q}{q^2 + \alpha^2\mu^2} \int \frac{d^3k}{(k^2 + \alpha^2\mu^2)(\mathbf{k} - \mathbf{q})^2}$, который по Феллу в

логарифмическом промежутке $\mu\alpha \leq p \leq \mu$ эквивалентен $i = 4\pi^4 \int_{\mu\alpha}^{\mu} dk/k = 4\pi^4 \ln \alpha^{-1}$.

2. Возможная аппроксимация этого интеграла i всюду сходящимися выражениями дается интегралом типа $i_1 = m_1^2 m_2 \int \frac{d^3q}{q^2 + \alpha^2\mu^2} \int \frac{d^3k}{(k^2 + \alpha^2\mu^2)(k^2 + m_1^2)\varepsilon_{2k}(\mathbf{k} - \mathbf{q})^2}$,

$$\varepsilon_{2k} = \sqrt{k^2 + m_2^2}.$$

Этот интеграл позволяет исследовать промежуток интегрирования по k от m_1 до ∞ . Он дает тот же логарифмический вклад, что и i , и позволяет получить дополнительные поправки, пропорциональные $\alpha^6(\mu^3/m_1 m_2)$.

3. Все эти интегралы являются частными случаями выражения

$$S = -\frac{1}{4\pi^4} \alpha^6 \mu^4 \int \frac{d^3q}{q^2 + \alpha^2\mu^2} \int \frac{d^3k}{(k^2 + \alpha^2\mu^2)(k^2 + m_1^2)(\mathbf{k} - \mathbf{q})^2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{2k}} + \frac{1}{\varepsilon_{2kq}} \right). \quad (1)$$

Логарифмический вклад этого интеграла тот же, что и в предыдущих случаях. А вклад же, пропорциональный α^6 , отличается от i_1 : $\delta E_{2T} = -2\alpha^6(\mu^3/m_1 m_2)(\ln \alpha^{-1} - 2G/\pi)$.

Таким образом, для получения точного вклада, пропорционального $\alpha^6(\mu^3/m_1 m_2)$, необходим прецизионный учет релятивистских факторов $\varepsilon_{ik}, \varepsilon_{iq}$. Их разложение не приводит к истинной величине, пропорциональной $\alpha^6(\mu^3/m_1 m_2)$. Квазипотенциальный подход дает единственно верное обобщение "логарифмического" интеграла i .

4. Интеграл i не содержит вклада $\ln m_2/m_1$. Другие части квазипотенциала дают зависимость $\alpha^6(\mu^3/m_1 m_2)$ от параметра отношения масс частиц $\beta = m_1/m_2$. Обмен двумя кулоновскими фотонами дает дополнительную поправку [3]

$$\delta E_{2C} = \alpha^6(\mu^3/m_1 m_2) \left(\sqrt{\beta}/4 + 8\beta \ln \beta^{-1}/(9\pi^2) \right).$$

[1] I. V. Khriplovich *et al.*, Physica Scripta **T46** (1993) 252.

[2] R. N. Fell, Preprint - BUW 01742. Massachusetts, 1992.

[3] Н. А. Бойкова *и др.*, ТМФ **149** (2006) 325.

Расчеты эффекта отдачи и энергий перехода в литиеподобных ионах

Ю. С. Кожедуб^a, Д. А. Глазов^a, А. В. Волоotka^{a,b}, И. И. Тупицын^a, В. М. Шабаетв^a,
Г. Плюниен^b

^a *Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,
198504 Петергоф, Санкт-Петербург, Россия*

^b *Технический университет Дрездена, D-01062 Дрезден, Германия*

Традиционно измерение и вычисление изотопических сдвигов в атомных спектрах проводились в основном для изучения структуры атомного ядра. В последнее время появились новые предпосылки к изучению данного эффекта. Так, например, расчеты изотопических сдвигов в атомах и ионах могут быть важны для астрофизических исследований возможной вариации постоянной тонкой структуры α , где изотопический сдвиг дает значительную систематическую ошибку. Более того, изучение данного эффекта может обеспечить информацию об изотопическом составе ранней вселенной. Изучение изотопических сдвигов в многозарядных ионах имеет хорошие перспективы благодаря большей чувствительности к размеру ядра и релятивистским эффектам.

При рассмотрении изотопического сдвига наиболее трудоемкой задачей является вычисление эффекта отдачи. В данной работе мы провели вычисления поправки на конечную массу ядра для последовательности литиеподобных ионов. Полностью релятивистская теория эффекта может быть сформулирована только в рамках КЭД [1]. В низшем релятивистском приближении массовый сдвиг можно вычислить посредством использования релятивистского оператора отдачи. В рамках этого приближения поправка на отдачу была сосчитана на многоэлектронной волновой функции для того, чтобы учесть межэлектронное взаимодействие. Одноэлектронная и двухэлектронная поправки на конечную массу ядра учтены во всех порядках по αZ .

Также мы представляем наиболее точные на сегодняшний день теоретические предсказания $2p_{1/2}-2s$ и $2p_{3/2}-2s$ энергий перехода в литиеподобных ионах с средним значением заряда ядра. В работе собраны все известные вклады в энергию перехода. За исключением одноэлектронных двухпетлевых поправок все вклады второго порядка по α учтены строго в рамках КЭД, во всех порядках по αZ . Межэлектронное взаимодействие за рамками двухфотонного обмена вычислено в приближении Брейта методом многоконфигурационного взаимодействия в базисе орбиталей Дирака-Фока-Штурма. Результаты, полученные для энергий перехода, хорошо согласуются с последними экспериментальными данными. Случай литиеподобного скандия подробно рассмотрен в работе [2].

[1] V. M. Shabaev, Phys. Rev. A **57**, 59 (1998); Phys. Rep. **356**, 119 (2002).

[2] Y. S. Kozhedub *et al.*, Phys. Rev. A **76**, 012511 (2007).

Сверхтонкое расщепление в мюонном водороде: КЭД поправки порядка α^2

Е. Ю. Корзинин^a, В. Г. Иванов^{a,b}, С. Г. Каршенбойм^{a,c}

^a *Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им.
Д.И.Менделеева, Санкт-Петербург*

^b *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

^c *Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Germany*

Эксперимент по измерению лэмбовского сдвига в мюонном водороде, проводимый в PSI, требует повышение теоретической точности как для собственно лэмбовского сдвига, так и для сверхтонкого расщепления.

В докладе рассматриваются квантовоэлектродинамические поправки второго порядка по α к сверхтонкому расщеплению в мюонном водороде. Поправки связаны с эффектами поляризации вакуума второго порядка. Результаты получены для состояний $1s$ и $2s$ [1].

[1] С. Г. Каршенбойм, Е. Ю. Корзинин, В. Г. Иванов, Письма в ЖЭТФ **88** (2008) 737.

Сверхтонкая структура основного состояния мюонного гелия

А. А. Крутов^a, А. П. Мартыненко^a

^a Самарский государственный университет

Атом мюонного гелия ($\mu e \frac{4}{2}He$) представляет собой простейшую трехчастичную атомную систему. Взаимодействие между магнитными моментами мюона и электрона приводит к сверхтонкой структуре (СТС) уровней энергии. Частицы, образующие атом мюонного гелия имеют различные массы: $m_e \ll m_\mu \ll m_\alpha$. Поэтому мюон и α -частица образуют псевдоядро $(\mu e \frac{4}{2}He)^+$, и в первом приближении атом мюонного гелия можно рассматривать как двухчастичную систему. Сверхтонкое расщепление основного состояния мюонного гелия было измерено с достаточно высокой точностью [1]:

$$\Delta\nu_{exp}^{HFS} = 4465.004(29) \text{ МГц.} \quad (1)$$

В отличие от уровней энергии двухчастичных атомов, которые изучены в квантовой электродинамике с очень высокой точностью [2, 3], теоретические расчеты сверхтонкого расщепления основного состояния мюонного гелия ($\mu e \frac{4}{2}He$) были выполнены как в рамках теории возмущений, так и вариационным методом с меньшей точностью.

В рамках теории возмущений по постоянной тонкой структуре α и отношению масс электрона и мюона, сформулированной Лакдавалой и Мором [4], мы вычисляем ряд поправок, которые важны для получения более точной теоретической величины сверхтонкого расщепления основного состояния:

- однопетлевые поправки поляризации вакуума порядка $\alpha^5 M_e/M_\mu$;
- однопетлевые электронные вершинные поправки порядка α^5 ;
- поправки на структуру ядра порядка α^6 .

Полученный нами результат сверхтонкого расщепления основного состояния $\Delta\nu^{HFS} = 4465.526$ МГц [5] улучшает предыдущее вычисление [4] за счет учета новых вкладов. Остающееся различие между данным теоретическим результатом и экспериментальной величиной (1), равное 0.522 МГц, находится в пределах теоретической ошибки ± 0.7 МГц и требует вычисления вкладов более высокого порядка.

- [1] C. J. Gardner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1168.
[2] M. I. Eides, H. Grotch, V.A. Shelyuto, Phys. Rep. **342** (2001) 62.
[3] S. G. Karshenboim, Phys. Rep. **422** (2005) 1.
[4] S. D. Lakdawala, P. J. Mohr, Phys. Rev. A **22** (1980) 1572; **29** (1984) 1047.
[5] A. A. Krutov, A. P. Martynenko, Phys. Rev. A **78** (2008) 032513.

Метод лазерного двойного резонанса

В. Квинт (W. Quint)^a, Д. Л. Московкин^b, В. М. Шабаетв^b и М. Фогель (M. Vogel)^a

^a *Gesellschaft für Schwerionenforschung, Planckstrasse 1, D-64291 Darmstadt, Germany*

^b *Физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный университет, Ульяновская 1, Петродворец, Санкт-Петербург 198504, Россия*

Принцип двойного резонанса [1, 2] уже в течение многих лет используется в лазерной спектроскопии для проведения прецизионных измерений переходов в атомах и многозарядных ионах, прежде всего, для изучения сверхтонкой структуры (СТС) и зеемановского расщепления.

Рассматривается применение данного метода в микроволновой (МВ) области лазерных частот для высокоточного измерения атомных g_F -факторов тяжелых, многозарядных ионов с ненулевым спином ядра I , помещенных в ловушку Пеннинга (Penning trap) [2]. Эти эксперименты планируются в ближайшем будущем на установке HITRAP в GSI.

Для валентного электрона H- или Li-подобного иона (с $I \neq 0$) в основном состоянии полный угловой момент $j = 1/2$ и уровни СТС характеризуются полным атомным угловым моментом $F = I \pm 1/2$. Каждый из двух уровней СТС расщепляется в однородном, постоянном магнитном поле \vec{B} , используемом в ловушке, на $2F + 1$ зеемановских подуровней. Для тяжелых, многозарядных ионов переходы между уровнями СТС лежат в оптическом (видимом, ИК или УФ) диапазоне (порядка 10^{14} Гц), а переходы между зеемановскими подуровнями – в МВ области (десятки ГГц).

Здесь принцип МВ лазерного двойного резонанса состоит в использовании флуоресцентного света от оптических магнитных дипольных переходов между зеемановскими подуровнями различных уровней СТС H- или Li-подобного иона как индикатора для МВ переходов между соответствующими зеемановскими подуровнями, принадлежащими одному из уровней СТС, исходя из чего можно измерить g_F -фактор иона.

Необходимо различать три случая: 1) Ядерный магнитный момент μ положителен, и нижний уровень F расщеплен на подуровни, т.е. $F > 0$, что имеет место для ионов с $I > 1/2$ (^{209}Bi). 2) μ положителен, и нижний уровень F не расщеплен на зеемановские подуровни, т.е. $F = 0$, что реализуется для ионов с $I = 1/2$ (^{207}Pb). 3) μ отрицателен, и уровень СТС с бóльшим значением F находится ниже уровня с меньшим F (^{235}U).

Процессы экспериментального применения метода двойного резонанса для этих трех случаев будут различными.

[1] D.F.A. Winters, M. Vogel, D.M. Segal, R.C. Thompson, and W. Nörtershäuser, *Can. J. Phys.* **85**, 403 (2007).

[2] W. Quint, D.L. Moskovkin, V.M. Shabaev, and M. Vogel, *Phys. Rev. A* **78**, 032517 (2008).

Одно-, двух- и трехфотонные переходы между $2s$, $2p$ и $1s$ энергетическими уровнями для водородо-подобных атомов во внешнем электрическом поле и без него.

Д. А. Соловьев^a, Л. Н. Лабзовский^{a,b} и В. Ф. Шарипов^b

^a ¹ *С.-Петербургский Государственный Университет, С-Петербург, Россия.*

^b *С.-Петербургский Институт Ядерной Физики, С-Петербург, Россия.*

В нашей работе представлены вероятности распада $2s$ -, $2p$ -уровней атома водорода и водородоподобных систем с излучением одного, двух и трех фотонов. Все вычисления были произведены в приближении Паули. Процессы излучения были рассчитаны также во внешнем электрическом поле. Для расчетов двух и трехфотонного распада использовался метод кулоновской функции Грина. Значения вероятностей одно-, двух- и трехфотонного излучения представлены в таблице.

Кроме того в нашей работе были представлены различные формы записи для вероятности излучения в зависимости от калибровочной постоянной, получены соответствующие значения вероятностей распада. Вероятности двухфотонного распада $E1E2$ и $E1M1$ были рассчитаны в различных квантовых числах, характеризующих излученные фотоны (четность и момент фотона или вектор поляризации и волновой вектор фотона).

Мы описали процессы двухфотонного распада во внешнем электрическом поле. В частности, мы продемонстрировали появление интерференционных членов, линейно зависящих от внешнего поля, для $E1E1$ и $E1E2$, $E1M1$ распадов смешанных $2s$ и $2p$ электронных уровней атома водорода. Важным результатом является отличие спектров H и \bar{H} атомов во внешнем электрическом поле. Так для случая однофотонного распада $2s$ уровня отличие значений вероятностей излучения для атомов водорода и анти-водорода может достигать 20%, а в случае двухфотонного распада 1%.

Также мы сравнили радиационную поправку, рассчитанную U. D. Jentschura для двухфотонного распада $2s$ уровня в атоме водорода, с поправкой, возникающей за счет внешнего электрического поля, вычислили величину электрического поля когда обе поправки одинаковы, $|D_r| \approx 90V/cm$. Такие поля часто используются в спектроскопических экспериментах.

$2p \rightarrow 1s$	E1	$3.9 \cdot 10^{-2} m\alpha(\alpha Z)^4$	$6 \cdot 10^8 s^{-1}$
$2s \rightarrow 1s$	E1E1	$1.3 \cdot 10^{-3} m\alpha^2(\alpha Z)^6$	$8.229 s^{-1}$
$2p \rightarrow 1s$	E1E1E1	$2.6 \cdot 10^{-5} m\alpha^3(\alpha Z)^8$	$6 \cdot 10^{-8} s^{-1}$
$2s \rightarrow 1s$	M1	$\frac{1}{972} m\alpha(\alpha Z)^{10}$	$2.5 \cdot 10^{-6} s^{-1}$
$2p \rightarrow 1s$	E1M1	$2.9 \cdot 10^{-5} m\alpha^2(\alpha Z)^8$	$9.7 \cdot 10^{-6} s^{-1}$
$2p \rightarrow 1s$	E1E2	$1.9 \cdot 10^{-5} m\alpha^2(\alpha Z)^8$	$6.6 \cdot 10^{-6} s^{-1}$

Определение точных значений констант расширенной Стандартной модели

С. А. Кононогов, В. Н. Мельников, В. В. Хрущев

ВНИИМС

Приведены точные значения и некоторые методы определения констант расширенной Стандартной модели сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий, учитывающей также гравитационное взаимодействие и взаимодействие массивных нейтрино. Сравниваются экспериментально полученные относительные стандартные неопределенности констант на различных энергетических масштабах и оценки величин возможных временных вариаций констант.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 07-02-13614-офи-ц.

Нерезонансные поправки для измерений оптической частоты резонанса в атоме водорода.

Л. Н. Лабзовский^{a,b}, Г. И. Щедрин^a, Д. А. Соловьев^a, Г. Плюнен^c,
С.Г. Каршенбойм^{d,e}, Е.А. Черновская^a

^a *Научно-исследовательский институт физики им В. А. Фока*

^b *Петербургский институт ядерной физики*

^c *Institut für Theoretische Physik*

^d *ГНЦ “Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д. И. Менделеева”*

^e *Max-Planck Institut für Quantenoptik*

В работе рассматривается отклонение естественной формы спектральной линии от лоренцевского контура в измерениях оптической частоты резонанса. Это отклонение приводит к асимметрии, которая возникает в основном из-за нерезонансных поправок к резонансному лоренцевскому контуру. Изучены нерезонансные поправки для различных типов атомных резонансных экспериментов. Были проанализированы наиболее точные недавние оптические резонансные эксперименты, в частности, двухфотонное 1s-2s резонансное возбуждение атома водорода с запаздывающим распадом во внешнем электрическом поле. Описание нерезонансных поправок в этом случае требует использования КЭД с различными in- и out- гамильтонианами. Исследованы нерезонансные поправки для этих экспериментов и получены величины порядка 10^{-5} Гц, притом, что современное значение экспериментальной неточности составляет 34 Гц и в ближайшем будущем ожидается, что оно будет равно нескольким Гц. Рассматривается также планируемый 1s-2s эксперимент по резонансному возбуждению с обнаружением трех-фотонной ионизации.

Тезисы, поступившие после окончания регистрации

Международная система единиц СИ. Прошлое, настоящее, будущее.

С. Г. Семенчинский

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы»

Представлен краткий обзор истории международной системы единиц, способов ее реализации и ставившихся перед ней целей. Описано современное состояние СИ, а также проблемы, ограничивающие точность измерений с ее помощью. К таким проблемам относятся:

- несоответствие способов воспроизведения единиц их определениям
- наличие вещественных первичных эталонов (эталон килограмма), не позволяющих децентрализовать воспроизведение единиц
- точность электрических измерений в рамках СИ уже несколько десятилетий определяется неопределенностью размеров единиц электрических величин СИ.
- для обеспечения единства электрических измерений параллельно с СИ действует практическая система единиц, основанная на макроскопических квантовых эффектах.

Готовящаяся в ближайшем будущем реформа СИ должна существенно улучшить положение. В результате СИ должна стать независимой от вещественных эталонов, логичной и последовательной. Система будет основана только на фундаментальных физических постоянных, размеры которых будут приняты за точно известные (с нулевой неопределенностью). Будут признаны соотношения между физическими постоянными, доказанные современной физикой.

В докладе рассказано о вероятной структуре новой СИ и о практических способах воспроизведения ее единиц.

Обсуждаются также проблемы и неудобства, которые может повлечь за собой переопределение единиц СИ.