

*ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ,*

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова*

Всероссийское совещание  
по прецизионной физике  
и фундаментальным физическим  
КОНСТАНТАМ

(Workshop on Precision Physics and Fundamental Physical Constants)

**Тезисы докладов**

Дубна, 1–4 декабря 2009

## Организационный комитет

### Сопредседатели:

С.Г. Каршенбойм (ВНИИМ)  
В.И. Коробов (ОИЯИ)  
И.Н. Мешков (ОИЯИ)

### Члены Организационного комитета:

А.В. Малых (ОИЯИ), уч. секретарь  
А.Б. Арбузов (ОИЯИ)  
С.Н. Багаев (ИЛФ СО РАН)  
Ю.М. Быстрицкий (ОИЯИ)  
Д.А. Варшалович (ФТИ РАН)  
Э.А. Кураев (ОИЯИ)  
С.Н. Неделько (ОИЯИ)  
С.З. Пакуляк (УНЦ)  
Р.Н. Фаустов (ВЦ РАН)  
Д.В. Фурсаев (ун-т "Дубна")  
И.Б. Хриплович (ИЯФ СО РАН)  
В.А. Шелюто (ВНИИМ)  
С.И. Эйдельман (ИЯФ СО РАН)

Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам (Workshop on Precision Physics and Fundamental Physical Constants) проводится Лабораторией теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ совместно с Рабочей группой РНК КОДАТА по фундаментальным физическим константам.

Совещание организуется 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, Университета Дубны, Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева, Particle Data Group и International CODATA Task group on fundamental constants.

Совещание проводится при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-06198 г).

---

Workshop on Precision Physics and Fundamental Physical Constants is organized by Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics (BLTP) of the Joint Institute for Nuclear Research and Russian National Task Group on fundamental physical constants of Russian National CODATA Committee.

The workshop is endorsed by RAS Scientific Council on Metrology and Standartization, Russian National Committee on Data for Science and Technology, University of Dubna, D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Particle Data Group and International CODATA Task group on fundamental constants.

The organization of the workshop is supported in part by the Russian Foundation for Basic Research under grant # 09-02-06198.

# Содержание

---

## Пленарные доклады

---

<u>А.Б. Арбузов.</u> Определение параметров электрослабых взаимодействий из распада мюона . . . . .	9
<u>Д.Д. Бакалов, В.И. Коробов.</u> Эффекты внешних магнитных полей в простых атомных системах. Спектр $\text{HD}^+$ . . . . .	10
<u>С.Н. Гниненко.</u> Измерение спектра фотонов при энергиях $E_\gamma \ll m_e$ и поиск пространственной анизотропии в распадах ортопозитрония . . . . .	11
<u>А. Деревянко.</u> Нарушение четности в атомах и высокоточное определение констант электрослабого взаимодействия . . . . .	12
<u>А.Е. Дорохов.</u> $g - 2$ мюона, редкие распады $P \rightarrow l^+l^-$ и переходные формфакторы $P \rightarrow \gamma\gamma^*$ . . . . .	13
<u>M. Jentschel, P. Becker, L. Ferroglio, J. Krempel, G. Mana.</u> Measurement of the molar Planck constant $N_A h$ via the energy/mass equivalence principle .	14
<u>В.А. Ерохин, К. Пахуцки и Дж. Сапирштейн.</u> Тонкая структура атома гелия . . . . .	15
<u>А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович.</u> Астрономические методы исследования возможного космологического изменения фундаментальных физических констант . . . . .	16
<u>С. Г. Каршенбойм.</u> Международная система единиц и ее реализация в эталонах: современное состояние и ближайшие перспективы . . . . .	17
<u>А.Л. Катаев.</u> Структура высших поправок КЭД к аномальным магнитным моментам лептонов: нерешенные теоретические и вычислительные проблемы . . . . .	18
<u>М. Г. Козлов.</u> Использование инверсионных переходов в аммиаке для поиска вариации отношения масс $m_e/m_p$ . . . . .	19
<u>Н.Н. Колачевский, А.Н. Матвеев, Я. Алнис, К. Партей, Т. Удем, Т.В. Хэнш.</u> Поиск дрейфа постоянной тонкой структуры в лаборатории . . . . .	20
<u>В.И. Коробов.</u> Прецизионная спектроскопия $\text{H}_2^+$ и антипротонного гелия . .	21
<u>А.И. Ахмедов, Э.А. Кураев, М.К. Волков.</u> Вклады в аномальный магнитный момент мюона от каналов конверсии тяжелого фотона в скалярный (псевдоскалярный) мезон и фотон . . . . .	22
<u>С. А. Левшаков.</u> Пространственные вариации $m_e/m_p$ : ограничения, полученные из спектров высокого разрешения молекулярных облаков в нашей галактике . . . . .	23
<u>И.Б. Логащенко.</u> Будущее измерений аномального магнитного момента мюона . . . . .	24
<u>А.П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов, Е. Н. Элекина.</u> Тонкая и сверхтонкая структура спектра энергии легких мюонных атомов . . . . .	25
<u>С. Михайлов, Н. Стефанис.</u> Фотон-пионный переходной формфактор: шансы и вызовы для КХД из эксперимента BaBar . . . . .	26

<u>В. К. Миллюков.</u> Ньютоновская гравитационная постоянная: современный статус экспериментального определения . . . . .	27
<u>В.Д. Овсянников, Е.Ю. Ильинова, С.И. Мармо, В.Г. Пальчиков, А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, Х. Катори, К. Хашигучи.</u> Нелинейные и мультипольные эффекты в частотном стандарте на атомах в оптической решетке . . . . .	28
<u>М.С. Онегин.</u> Современные ограничения на временные изменения постоянной тонкой структуры . . . . .	29
<u>Е. В. Питьева.</u> Численные постоянные для фундаментальной астрономии .	30
<u>М. Pospelov.</u> Extended gauge sector below the weak scale and g-2 of the muon	31
<u>V.N. Rudenko.</u> Current results of searching for gravitational wave signals with bar detectors and big interferometers . . . . .	32
<u>В.Г. Сербо.</u> Поправки порядка $(Z\alpha)^n$ в процессах образования лептонов и фотонов на ускорителях с тяжелыми ядрами RHIC и LHC . . . . .	33
<u>A. A. Starobinsky.</u> Fundamental constants of modern cosmology . . . . .	34
<u>О.В. Тарасов.</u> Новые методы вычисления фейнмановских диаграмм . . . . .	35
<u>О.В. Теряев.</u> Принцип эквивалентности и элементарные частицы . . . . .	36
<u>М.П. Файфман.</u> Определение физических характеристик мезоатомов и мезомолекул методами мю-катализа . . . . .	37
<u>В.П. Измайлов, О.В. Карагиоз, В.М. Шахпаронов.</u> Дестабилизирующие факторы при измерении гравитационной постоянной . . . . .	38
<u>С.И. Эйдельман.</u> $e^+e^- \rightarrow$ адроны при низких энергиях и статус предсказания $(g - 2)/2$ мюона в Стандартной Модели . . . . .	39

---

## Стендовые доклады

---

<u>К.А. Бронников.</u> Многомерная космология с ускоренным расширением Вселенной и малой вариацией гравитационной постоянной . . . . .	43
<u>В.Н. Мельников, В.Д. Иващук.</u> О временной вариации гравитационной постоянной в СТТ и многомерных моделях гравитации . . . . .	44
<u>Е.Ю. Ильинова, В.Д. Овсянников, Х. Катори, К. Хашигучи.</u> Оптическая решетка для стандарта частоты, не зависящего от движения атома . .	45
<u>М.И. Калинин, С.А. Кононогов.</u> Об определении постоянной Больцмана и единицы термодинамической температуры . . . . .	46
<u>Е.Ю. Корзинин, В.Г. Иванов, С.Г. Каршенбойм.</u> Вклады поляризации вакуума старших порядков в лэмбовский сдвиг в легких мюонных атомах	47
<u>А.И. Майстров, С.Г. Parthey, Н.Н. Колачевский, Th. Udem, А.Н. Матвеев, J. Alnis, T.W. Hänsch.</u> Высокопроизводительное моделирование процесса возбуждения атомов водорода для задачи подгонки линий в эксперименте по спектроскопии двухфотонного перехода 1s-2s в атоме водорода на основе технологии CUDA . . . . .	48
<u>С. А. Запрягаев, Н. Л. Манаков, С. И. Мармо, И. С. Ненашев.</u> Обобщенные штурмовские разложения релятивистской кулоновской функции Грина	49

<i>Я. Алнис, А.Н. Матвеев, К. Партай, К. Пределъ, Т. Вилкен, Н.Н. Колачевский, Р. Хольцварт, Т. Удем, Т.В. Хэни.</i> Подготовка измерения оптической частоты перехода $1s - 2s$ в атомах водорода и дейтерия с использованием стабильной опорной оптической частоты, получаемой через телекоммуникационную сеть . . . . .	50
<i>А.Н. Матвеев, С.Г. Parthey, J. Alnis, Н.Н. Колачевский, Т.В. Hänsch.</i> Лазерная система и стандарт частоты для прецизионной спектроскопии перехода $1s-2s$ в атоме водорода . . . . .	51
<i>Н.Л. Манаков, А.А. Некипелов.</i> Поляризация вакуума кулоновским полем: асимптотика потенциала . . . . .	52
<i>Е. В. Питьева, Н. П. Питьев.</i> Оценки возможных изменений гравитационной постоянной, массы Солнца и полуосей планет по современным наблюдениям планет и космических аппаратов . . . . .	53
<i>Л.Г. Прохоров.</i> Влияние электрических зарядов в высокочувствительных измерительных системах с пробными телами . . . . .	54
<i>А.Я. Силенко.</i> Возможность проверки сохранения <i>CPT</i> -симметрии в гравитационном взаимодействии с помощью метода “замораживания” спина в накопительных кольцах . . . . .	55
<i>Г.М. Трунов.</i> О предстоящем переопределении килограмма . . . . .	56
<i>Г.М. Трунов, А.Г. Трунов.</i> О предстоящем переопределении ампера . . . . .	57
<i>В.В. Хрущев.</i> О возможном определении единицы массы и фиксации значений фундаментальных физических констант . . . . .	58
<i>В. А. Шелото, С. Г. Каршенбойм, С. И. Эйдельман.</i> Адронные вклады в сверхтонкое расщепление основного состояния в мюонии . . . . .	59



## Пленарные доклады





# Определение параметров электрослабых взаимодействий из распада мюона

А.Б. Арбузов

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ*

Среди всех параметров стандартной модели физики элементарных частиц при высоких энергиях наиболее точно измерена фермиевская константа связи  $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ . Постоянная тонкой структуры при малых энергиях определена с точностью десяти значащих цифр, но на масштабе массы  $Z$ -бозона  $\alpha^{-1}(M_Z) = 128.957 \pm 0.020$ , т.е. она менее хорошо измерена по сравнению с  $G_F$  и массой  $Z$ -бозона,  $M_Z$ . Большая погрешность связана с неопределенностью из-за существенных вкладов непертурбативных сильных взаимодействий. Если же брать в качестве точки нормировки для постоянную Ферми, то неопределенность в теоретическом описании электрослабых процессов существенно уменьшается. Таким образом, измерение времени жизни мюона служит в качестве одного из фундаментальных нормировочных процессов в физике элементарных частиц.

Последние наиболее точные данные по определению этой константы из времени жизни мюона получены в PSI экспериментами  $\mu\text{LAN}$  [1] и FAST [2]. Проводятся также опыты на мини-установках настольного формата, работающие с мюонами из космических лучей. Извлеченная и времени жизни мюона постоянная Ферми используется в дальнейшем для получения прецизионных теоретических предсказаний в рамках стандартной модели и проверки последней. Константа  $G_F$  с помощью известного соотношения связана с другими параметрами стандартной модели, включая массу бозона Хиггса, однако точность определения всех входящих в формулу параметров недостаточна для нахождения  $M_H$ .

Недавние результаты по расчету радиационных поправок ко времени жизни мюона и к дифференциальным распределениям по углам и энергиям продуктов его распада позволили существенно повысить точность теоретического описания различных мод распада мюона. Из дифференциальных распределений продуктов распада мюона извлекается дополнительная нетривиальная информация о структуре слабых взаимодействий, вводимой в описание модельно независимым образом с помощью параметров Мишеля. Современные данные о значениях этих параметров позволяют получать ограничения на модели новой физики.

---

[1] D. B. Chitwood *et al.* [MuLan Collaboration], “Improved Measurement of the Positive Muon Lifetime and Determination of the Fermi Constant,” *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 032001.

[2] A. Barczyk *et al.* [FAST Collaboration], “Measurement of the Fermi Constant by FAST,” *Phys. Lett. B* **663** (2008) 172.

# Эффекты внешних магнитных полей в простых атомных системах. Спектр $\text{HD}^+$

Д.Д.Бакалов<sup>a</sup>, В.И. Коробов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ИЯИЯЭ БАН, София, Болгария

<sup>b</sup> БЛТФ ОИЯИ, Дубна, Россия

Отношение масс электрона и протона известно с относительной точностью  $0.4 \cdot 10^{-9}$  [1]. Перспективным методом дальнейшего уменьшения неопределенности величины  $m_e/m_p$  являются прецизионные измерения спектра молекулярного йона  $\text{HD}^+$  и сопоставление результатов с теоретическими расчетами. В настоящее время экспериментальная точность спектроскопии  $\text{HD}^+$  достигла  $2 \cdot 10^{-9}$  [3]. Того же порядка и неопределенность недавних теоретических вычислений резонансных частот переходов между ро-вибрационными уровнями с учетом квантово-электродинамических поправок высших порядков [2]. Сверхтонкое расщепление спектральных линий было вычислено для т.н. “сильных” коомпонент сверхтонкой структуры с точностью  $10^{-10}$  [4].

Необходимым следующим шагом является оценка эффектов внешних магнитных полей, заведомо присутствующих из-за отсутствия экранировки. В работе рассмотрена сверхтонкая структура спектральных линий переходов между ро-вибрационными состояниями молекулярного йона  $\text{HD}^+$  в постоянном однородном магнитном поле умеренной интенсивности  $B < 10$  Г. Поскольку Зеемановское расщепление уровней при таких полях ниже разрешающей способности, вычислена частота наблюдаемого в этом случае взвешенного центра магнитного мультиплета как функцию  $B$  с учетом возмущенной интенсивности отдельных магнитных компонент. Для полей порядка магнитного поля Земли частотный сдвиг превосходит допустимую теоретическую неопределенность и должен быть принят во внимание при анализе экспериментальных данных.

---

[1] P. J. Mohr and B. N. Taylor, Rev. Mod. Phys. **77** (2005)1, updated 2008.

[2] V. I. Korobov, Phys. Rev. A **74** (2006) 052506.

[3] J. C. J. Koelemeij *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 173002.

[4] D. Bakalov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 243001.

# Измерение спектра фотонов при энергиях $E_\gamma \ll m_e$ и поиск пространственной анизотропии в распадах ортопозитрония

С.Н. Гниненко

*Институт Ядерных Исследований РАН (Москва)*

Обсуждаются планируемые эксперименты с позитронием с целью измерения спектра фотонов при энергиях  $E_\gamma \ll m_e$  [1]. Помимо прецизионной проверки QED, дополнительной мотивацией для проведения данных работ является возможность экспериментальной проверки пространственной анизотропии в распадах ортопозитрония ( $oPs$ ) путем поиска запрещенного распада  $oPs \rightarrow 2\gamma$ . Обсуждается возможность проведения этих исследований на установках AEGIS в CERNe и LEPTA в ОИЯИ.

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

# Нарушение четности в атомах и высокоточное определение констант электрослабого взаимодействия.

Андрей Деревянко

*Физический факультет университета Невады, Рино, США*

Нарушение четности в атомах накладывает мощные ограничения на новую физику за пределами стандартной модели элементарных частиц. Измерения интерпретируются с помощью слабого заряда ядра, характеризующего силу электрослабого взаимодействия атомных электронов и кварков ядра. Мы сообщаем самые точные на сегодняшний день результаты по определению этого взаимодействия. Объединяя предыдущие прецизионные измерения группы Ваймана (Boulder, USA) с нашими высокоточными атомными расчетами  $^{133}\text{Cs}$ , мы нашли значение слабого заряда ядра цезия. Наш результат находится в полном согласии с предсказаниями стандартной модели.

В сочетании с результатами экспериментов на коллайдерах, наша работа подтверждает энергетическую зависимость электрослабого взаимодействия на энергетическом диапазоне охватывающим четыре порядка (от 10 МэВ до 100 ГэВ). Более того, наш расчет позволил получить более сильное ограничение на массу дополнительных  $Z$  бозонов ( $Z'$ ). Предыдущее ограничение было извлечено непосредственно из экспериментальных данных полученных на коллайдерах.

---

[1] S. G. Porsev, K. Beloy, and A. Derevianko, Phys. Rev. Lett. 102, 181601 (2009)

# $g - 2$ мюона, редкие распады $P \rightarrow l^+l^-$ и переходные формфакторы $P \rightarrow \gamma\gamma^*$

А.Е. Дорохов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия*

Аномальный момент мюона  $g - 2$  и редкие распады мезонов служат для проверки стандартной модели (СМ) при низких энергиях. В последние годы значительно возросла точность экспериментальных измерений. Теоретическая погрешность в основном связана с оценкой вклада больших расстояний, на которых неприменима теория возмущений СМ. Однако, в ряде случаев теоретический результат может быть существенно улучшен за счет связи вклада больших расстояний с результатами измерений других процессов. Такой подход, в частности, оказывается применим при оценке адронного вклада в  $g - 2$  мюона, а также в случае редких распадов легких псевдоскалярных мезонов ( $P : \pi^0, \eta, \eta'$ ) в лептонную пару ( $l : e^+e^-, \mu^+\mu^-$ ) [1, 2]. В рамках киральной теории возмущений показано, что информация о нетривиальной динамике, определяющей вклад процесса рассеяния света на свете в  $g - 2$  мюона и в редкий распад  $P \rightarrow l^+l^-$ , содержится в одной и той же низкоэнергетической константе. В [1] данная константа была выражена через обратный момент переходного формфактора псевдоскалярного мезона в симметричной кинематике  $F_{P\gamma^*\gamma^*}(Q^2, Q^2)$ . Такое представление позволяет использовать данные CELLO [3], CLEO [4] и BABAR [5] по измерению переходных формфакторов и, тем самым, установить нижнюю (верхнюю) границу для брэнчингов данных распадов в электронную (мюонную) моды. Используя также ограничения на переходные формфакторы, следующие из КХД, можно сделать модельно-независимое предсказание для величины брэнчинга  $Br(\pi^0 \rightarrow e^+e^-) = (6.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-8}$ , которое на  $3.3\sigma$  ниже значения, полученного в наиболее точном эксперименте KTeV (Fermilab) [6]. Поэтому желательны новые прецизионные измерения ширины данного распада, поскольку до сих пор предсказания СМ находили блестящие экспериментальные подтверждения. Отметим, что если найденный эффект будет подтвержден, то это может свидетельствовать в пользу вариантов расширения СМ с легкими ( $10 - 100$  MeV) частицами. Также для проверки СМ перспективными будут измерения распадов  $\eta' \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

- 
- [1] А.Е. Dorokhov and М.А. Ivanov, Phys. Rev. **D75** (2007) 114007.
  - [2] А.Е. Dorokhov, М.А. Ivanov and S.G. Kovalenko, Phys. Lett. B **677** (2009) 145.
  - [3] H.J. Behrend *et al.*, Z. Phys. **C49** (1991) 401.
  - [4] J. Gronberg *et al.*, Phys. Rev. **D57** (1998) 33.
  - [5] B. Aubert *et al.* [The BABAR Collaboration], Phys. Rev. D **80** (2009) 052002.
  - [6] E. Abouzaid *et al.*, Phys. Rev. **D75** (2007) 012004.

# Measurement of the molar Planck constant $N_A h$ via the energy/mass equivalence principle

M. Jentschel<sup>a</sup>, P. Becker<sup>b</sup>, L. Ferroglio<sup>a,c</sup>, J. Krempel<sup>a,b</sup>, G. Mana<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*

<sup>b</sup> *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*

<sup>c</sup> *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle cacce 91, 10135 Torino, Italy*

The energy mass equivalence principle allows the direct comparison of relative atomic masses and gamma ray wave lengths. The conversion between these quantities is done via the molar Planck constant  $N_A h$ . Therefore precise measurements of the atomic masses and neutron binding energies allows a determination of  $N_A h$ . The talk gives an overview on the experimental techniques involved in these measurements and discusses their current and future limitations. It will be shown that the neutron binding energy measurements are closely related to the current determination of the Avogadro constant  $N_A$ . Finally a small overview on spin off experiments profiting from the instrumental developments will be given.

## Тонкая структура атома гелия

В.А. Ерохин<sup>a</sup>, К. Пахуцки<sup>b</sup> и Дж. Сапирштейн<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Центр перспективных исследований,  
Государственный политехнический университет,  
Политехническая 29, Санкт-Петербург 195251, Россия*

<sup>b</sup> *Institute of Theoretical Physics, University of Warsaw,  
Hoża 69, 00-681 Warsaw, Poland*

<sup>c</sup> *Department of Physics, University of Notre Dame,  
Notre Dame, IN 46556, USA*

Чтобы объяснить расхождение между предсказаниями теории и результатами эксперимента в тонкой структуре атома гелия мы проверили и пересчитали все теоретические вклады до порядков  $m\alpha^7$  и  $m^2/M\alpha^6$ . Предыдущее значение поправки  $m\alpha^7$  было существенно скорректировано благодаря более точному вычислению релятивистской поправки к логарифму Бете.

# **Астрономические методы исследования возможного космологического изменения фундаментальных физических констант**

А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович

*Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

В докладе будет представлен обзор современного состояния астрономических методов исследования возможного космологического изменения фундаментальных физических констант. Современные теории физики фундаментальных взаимодействий предсказывают такие изменения. Различные теории предсказывают разные амплитуды изменений констант и на разных временных масштабах. В современных лабораторных экспериментах получены жесткие пределы на возможное изменение констант в настоящую эпоху, однако это не исключает возможности их изменения на космологических временах и пространственно удаленных областях нашей Вселенной. Исследования спектров квазаров, свойств реликтового излучения и первичного нуклеосинтеза являются мощными инструментами определения возможного отклонения фундаментальных констант от их современных значений.



# Международная система единиц и ее реализация в эталонах: современное состояние и ближайшие перспективы

С. Г. Каршенбойм

*ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева, 190005, Санкт-Петербург, Россия*  
*Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 85748 Garching, Germany*

Международная система единиц СИ выступает в физике в двух ипостасях. Когда речь идет об образовании, эта система оказывается не более, чем удобным языком представления данных. Причем создатели СИ больше беспокоятся об удобстве для “простых пользователей”, нежели об адекватности этого языка современным взглядам на природу.

Этот же язык достаточно эффективен и в том случае, когда речь идет о не слишком точных измерениях. В случае же необходимости измерять с высокой точностью ситуация кардинально меняется. Здесь важно, как устроены эталоны. Система определений постоянно модифицируется так, чтобы можно было наиболее успешно воспроизводить и поддерживать единицы измерений.

В докладе будет обсуждаться реализация современных определений Международной системы единиц, проблемы и недостатки этой системы, перспективы ее развития. Будет также, в частности, показано, что практика измерений устроена так, что многие величины, например, температура на самом деле измеряются в практических единицах, а не в единицах СИ.

Будет также обсуждаться вопрос о переходе к единицам, основанным на фундаментальных физических константах [1]. Этот вопрос рассматривается сейчас метрологическим сообществом с полной серьезностью в виду практических преимуществ при применении квантовых макроскопических эффектов.

---

[1] С.Г. Каршенбойм, УФН **176**, 975 (2006).

# Структура высших поправок КЭД к аномальным магнитным моментам лептонов: нерешенные теоретические и вычислительные проблемы

А.Л. Катаев

*Институт ядерных исследований Российской Академии Наук,  
Москва, Российская Федерация*

Дан обзор современного статуса вычислений поправок квантовой электродинамики к аномальным магнитным моментам электрона, мюона и  $\tau$ -лептона. Отмечено, что сравнение теоретических предсказаний КЭД с недавними экспериментальными данными по измерению аномального магнитного момента электрона требует более точного вычисления вкладов 8-го порядка КЭД и оценок поправок 10-го порядка. Указано на то, что существующие неопределенности в численном значении поправок 8-го порядка и грубых оценок 10-го порядка КЭД несколько выше экспериментальных неопределенности, что влияет на точность извлечения значения постоянной тонкой структуры из недавних экспериментальных данных группы из США. Дан обзор статуса работ по уменьшению теоретических неопределенностей.

Подчеркнута интересная теоретическая особенность, выявленная в аналитических вычислениях ряда вкладов в аномальный магнитный момент электрона, проделанных в работе M. Caffo, S. Turini, E. Remiddi в 1978 году. Эти вычисления демонстрируют, что вклад лестничных диаграмм в высших порядках теории возмущений намного превосходит вклад диаграмм с одной ренормальной цепочкой. Обсуждаются следствия данного наблюдения. Перечислен ряд теоретических проблем, которые могут быть решены при дальнейших более точных вычислениях вкладов некоторых диаграмм КЭД в аномальный магнитный момент мюона и тау-лептона. Отмечена перспективность дальнейших более точных измерений массы  $\tau$ -лептона для уточнения некоторых теоретических неопределенностей в вычислениях вкладов КЭД в аномальный магнитный момент мюона и тау-лептона. Подчеркнута существующая проблема надежного извлечения аномального магнитного значения тау-лептона из экспериментальных данных, теоретическое значение которого особо чувствительно к рассмотрению возможности существования новых физических эффектов, выходящих за рамки Стандартной Модели сильных и электрослабых взаимодействий.

Доклад подготовлен по программе исследований, частично поддерживаемых Грантом РФФИ N 08-01-00686

# Использование инверсионных переходов в аммиаке для поиска вариации отношения масс $m_e/m_p$

М. Г. Козлов

*Петербургский институт ядерной физики*

В настоящее время идет активный поиск возможных вариаций фундаментальных постоянных  $\alpha = e^2/(\hbar c)$  и  $\mu = m_e/m_p$ . Такие поиски ведутся на больших пространственно-временных масштабах в астрофизике, и на малых масштабах в экспериментах с атомными часами. До недавнего времени, большая часть астрофизических наблюдений проводилась в оптическом диапазоне. Однако, для оптических линий типична довольно слабая чувствительность к фундаментальным константам, особенно к отношению масс  $\mu$ . Гораздо большей чувствительностью к вариации  $\mu$  обладают молекулярные вращательные линии, которые лежат в СВЧ и ИК диапазонах. К сожалению, все они имеют одинаковую чувствительность и возможные сдвиги вращательных частот за счет вариации  $\mu$  невозможно отличить от сдвигов, связанных с общим красным смещением. Поэтому, необходимо иметь линии с *разными* коэффициентами чувствительности  $Q_\mu$ , которые определены так, что  $\delta\omega/\omega = Q_\mu\delta\mu/\mu$ . Для вращательных линий  $Q_\mu = 1$ .

Одной из таких СВЧ линий с существенно отличной величиной  $Q_\mu$  является инверсионная линия аммиака,  $\text{NH}_3$  ( $\lambda = 1.2$  см). Этот переход связан с тунелированием трех ядер водорода через потенциальный барьер, создаваемый молекулярными электронами. Поэтому неудивительно, что эта линия обладает повышенной чувствительностью к вариации отношения масс электрона и протона. Численное значение коэффициента чувствительности  $Q_\mu = 4.5$  легко получить, например, используя квазиклассическое приближение. Сравнивая отношение частот инверсионного перехода в аммиаке с одной из вращательных молекулярных линий в лаборатории с аналогичным отношением для какого-то удаленного астрофизического объекта можно получить информацию об изменении постоянной  $\mu$ . Наиболее жесткие ограничения на вариацию  $\mu$  получены с использованием инверсионной линии аммиака и вращательных линий молекул  $\text{CO}$ ,  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CCS}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$  и др. К сожалению, для некоторых из этих молекул лабораторные значения частот вращательных переходов известны с недостаточной точностью.

Дополнительные возможности появляются при использовании линий частично дейтерированного аммиака  $\text{NH}_2\text{D}$ . В этом случае чисто инверсионные переходы запрещены по симметрии и имеют место смешанные вращательно инверсионные переходы. Для таких переходов коэффициенты чувствительности сильно зависят от квантовых чисел. Для переходов между уровнями с вращательным квантовым числом  $J \leq 2$  и температурой возбуждения  $T \leq 50$  К коэффициенты  $Q_\mu$  меняются в пределах от 0.1 до 1.6. Отметим, что инверсионно-вращательные линии молекулы  $\text{NH}_2\text{D}$  наблюдались в целом ряде молекулярных облаков в нашей галактике. Использование линий одной и той же молекулы с разными коэффициентами чувствительности позволяет избавиться от одной из самых опасных систематических ошибок, связанных с возможным различием в пространственных распределениях разных молекул в молекулярных облаках.

# Поиск дрейфа постоянной тонкой структуры в лаборатории

Н.Н. Колачевский,<sup>a</sup> А.Н. Матвеев,<sup>a,b</sup> Я. Алнис,<sup>b</sup> К. Партей,<sup>b</sup> Т. Удем,<sup>b</sup> Т.В. Хэнш<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Россия*

<sup>b</sup> *Институт по квантовой оптике общества Макса Планка, Hans-Kopfermann Str. 1, 85748 Garching, Germany*

В течение последнего десятилетия наблюдался значительный прогресс в области лабораторных исследований возможного дрейфа постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Успехи, достигнутые в методах подготовки и опроса атомов и ионов, лазерной спектроскопии и измерения оптических частот привели к существенному снижению погрешности измерений. В результате лабораторные измерения частот атомных переходов заняли место наиболее чувствительных тестов стабильности  $\alpha$  в текущий момент времени (табл. 1).

Год	Атом	$\dot{\alpha}/\alpha$ , год <sup>-1</sup>	Метод	Ссылка
2004	H, Yb <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup>	$(-0.9 \pm 2.9) \times 10^{-15}$	абс. част.	[1]
2004	H, Yb <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup>	$(-0.3 \pm 2.0) \times 10^{-15}$	абс. част.	[2]
2006	Yb <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup>	$(-2.6 \pm 3.9) \times 10^{-16}$	абс. част.	[3]
2007	Dy	$(-2.7 \pm 2.6) \times 10^{-15}$	радиочаст.	[4]
2008	Sr, H, Yb <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup>	$(-3.3 \pm 3.0) \times 10^{-16}$	абс. част.	[5]
2008	Hg <sup>+</sup> , Al <sup>+</sup>	$(-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}$	прямое ср.	[6]

Таблица 1: Некоторые модельно-независимые ограничения на дрейф  $\alpha$ , полученные в лаборатории. Данные [1, 2, 3, 5] получены с помощью измерения абсолютных частот, результат [6] – прямым сравнением оптических частот, а [4] – радиочастотным возбуждением.

В докладе обсуждаются основные методы подготовки атомных ансамблей, способы лазерной стабилизации, измерения и сравнения оптических частот, а также обработки данных, открывшие возможность столь чувствительных тестов.

---

[1] M. Fischer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 230802 (2004).

[2] E. Peik *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 170801 (2004).

[3] E. Peik *et al.*, arXiv:physics/0611088.

[4] A. Cingöz *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 040801 (2007).

[5] S. Blatt *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 140801 (2008).

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

# Прецизионная спектроскопия $\text{H}_2^+$ и антипротонного гелия

В.И. Коробов

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова,  
Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия*

В последние годы было выполнено несколько экспериментов по прецизионной спектроскопии антипротонного гелия [1] и молекулярного иона водорода  $\text{HD}^+$  [2]. Основная цель этих экспериментов — получить отношение масс  $m_e/m_p$  (электрона к (анти)протону) с относительной точностью порядка  $10^{-10}$ .

В предлагаемом докладе дается обзор современного состояния теоретических расчетов, полученных в рамках нерелятивистской КЭД. Представляются результаты вычислений релятивистских и радиационных поправок до порядка  $m\alpha^6$  включительно и частично  $m\alpha^7$ , полученные в [3] для атома антипротонного гелия и в [4] для молекулярных ионов изотопов водорода. Обсуждается вычисление однопетлевой радиационной поправки для связанного электрона в задаче двух центров в порядке  $m\alpha^7$ , нелогарифмический вклад. Ожидается, что относительная погрешность в интервалах вибрационных переходов после полного учета вкладов  $m\alpha^7$  достигнет уровня  $10^{-10}$ . Неопределенность в энергии перехода, определяемая ошибкой в среднем радиусе протона, равна  $\sim 5 \cdot 10^{-12}$  и пока не является существенным ограничением в теоретических расчетах.

Сравнение теории и эксперимента в спектроскопии антипротонного гелия позволило определить атомную массу электрона с высокой точностью:

$$A_r(e) = 0.000\,548\,579\,908\,81(91)[1.7 \times 10^{-9}]$$

и было впервые включено в корректировку фундаментальных констант CODATA06 [5].

Недавние измерения (см. [2]) ро-вибрационного перехода  $(v, L) : (0, 2) \rightarrow (4, 3)$  в ионе  $\text{HD}^+$  находятся в хорошем согласии с теоретическими расчетами:

$$\begin{aligned} E_{\text{exp}} &= 214\,978\,560.6(5) \text{ MHz} \\ E_{\text{th}} &= 214\,978\,560.88(7) \text{ MHz} \end{aligned}$$

- 
- [1] M. Hori, *et al.* Phys. Rev. Lett. **96**, 243401 (2006); and references therein.
  - [2] J.C.J. Koelemeij, B. Roth, A. Wicht, I. Ernsting, and S. Schiller, Phys. Rev. Lett. **98**, 173002 (2007).
  - [3] V.I. Korobov, Phys. Rev. A **77**, 042506 (2008).
  - [4] V.I. Korobov, Phys. Rev. A **77**, 022509 (2008).
  - [5] P.J. Mohr, B.N. Taylor, and D.B. Newell, Rev. Mod. Phys. **80**, 633 (2008).

# Вклады в аномальный магнитный момент мюона от каналов конверсии тяжелого фотона в скалярный (псевдоскалярный) мезон и фотон.

А.И.Ахмедов, Э.А.Кураев, М.К.Волков

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова,  
Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия*

Оценки вклада процессов  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow p(s)\gamma$  в аномальный магнитный момент мюона  $10^{10}$ . Рассмотрена возможность измерения формфакторов скалярного и псевдоскалярного мезонов в канале аннигиляции. Проводится сравнение с результатами опытов по образованию мезонов в канале рассеяния. Обсуждается справедливость гипотезы о кросс-инвариантности.

# Пространственные вариации $m_e/m_p$ : ограничения, полученные из спектров высокого разрешения молекулярных облаков в нашей галактике

С.А. Левшаков

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

Изучается зависимость отношения масс электрона к протону,  $\mu = m_e/m_p$ , от локальной плотности вещества методами радиоастрономических наблюдений. Данная зависимость предполагается в рамках космологических моделей со скалярными полями. Повышенная чувствительность частоты инверсионного перехода в молекуле аммиака  $\text{NH}_3$  ( $J, K$ ) = (1, 1) к изменению  $\mu$  по сравнению с чисто вращательными переходами в других молекулах позволяет проводить оценку параметра  $\Delta\mu/\mu \equiv (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}}$  из измерений относительных частот молекул  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$  в межзвездных молекулярных облаках и лабораторных условиях, при которых локальные плотности отличаются более чем в  $10^{14}$  раз.

В 2008/2009 гг. нами были проведены спектральные наблюдения холодных молекулярных облаков ( $T_{\text{kin}} \sim 10\text{K}$ ) в линиях  $\text{NH}_3$  ( $J, K$ ) = (1, 1),  $\text{HC}_3\text{N}$  ( $J = 2 - 1$ ), и  $\text{N}_2\text{H}^+$  ( $J = 1 - 0$ ) на трех радиотелескопах: 32-м (Medicina), 100-м (Effelsberg) и 45-м (Nobeyama). Результаты наблюдений показали статистически значимый сдвиг лучевых скоростей вращательных переходов в молекулах  $\text{HC}_3\text{N}$  и  $\text{N}_2\text{H}^+$  относительно инверсионного перехода в аммиаке:  $\Delta V \equiv V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = 23 \pm 4_{\text{stat}} \pm 3_{\text{sys}}$  м/с. Мы не нашли какой-либо систематический эффект на уровне 20 м/с, который проявлялся бы в измерениях относительных лучевых скоростей вращательных и инверсионных переходов на различных телескопах с использованием различных спектрометров.

Если интерпретировать найденную величину сдвига  $\Delta V$  как изменение параметра  $\mu$ , тогда  $\Delta\mu/\mu = (22 \pm 4_{\text{stat}} \pm 3_{\text{sys}}) \times 10^{-9}$ . В любом случае, полученные высокоточные спектральные данные приводят к консервативной верхней границе  $|\Delta\mu/\mu| \leq 3 \times 10^{-8}$ , которая в 100 раз более жесткая, чем ограничения, основанные на наблюдениях оптических спектров квазаров.

Радиоастрономические методы позволяют также найти жесткие ограничения на изменения постоянной тонкой структуры,  $\alpha$ . Из сравнения лучевых скоростей перехода  $J = 1 - 0$  в  $\text{C I}$  с вращательными переходами  $J = 1 - 0, 2 - 1$  в  $^{13}\text{CO}$  нами получен предел  $|\Delta\alpha/\alpha| < 10^{-7}$ . Для примера отметим, что наиболее аккуратные оптические измерения квазаров соответствуют верхней границе  $|\Delta\alpha/\alpha| < 2 \times 10^{-6}$ .

# Будущее измерений аномального магнитного момента мюона

И.Б. Логашенко

*Институт Ядерной Физики СО РАН*

История измерений магнитного момента мюона насчитывает более 50 лет. Интерес к измерению  $(g-2)_\mu$  связан с тем, что петлевые вклады в аномальный магнитный момент в случае мюона усилены в  $\sim (m_\mu/m_e)^2 \approx 40000$  раз, и поэтому вклады взаимодействий за рамками Стандартной Модели в  $(g-2)_\mu$  могут проявиться и при существующем уровне точности.

Наиболее точное на данный момент измерение аномального магнитного момента мюона было произведено в 1997-2001 в Брукхейвенской Национальной Лаборатории. Полученный результат приблизительно на 3 стандартных отклонения выше, чем значение, ожидаемое в рамках Стандартной Модели. Различие на уровне  $3\sigma$  не позволяет утверждать о наличии новых типов взаимодействий, однако оно вызвало широкий интерес во всем мире как к более точному измерению значения  $(g-2)_\mu$ , так и к более точной оценке теоретического значения в рамках СМ.

В настоящее время планируется новое измерение аномального магнитного момента мюона в Fermilab (USA), с целью улучшить точность измерения в 4 раза. Схема эксперимента в целом повторяет методику предыдущего измерения, с большим количеством улучшений. Независимое новое измерение  $(g-2)_\mu$  планируется в JPARC (Japan), с использованием абсолютно новой методики измерения.

В докладе обсуждаются текущий статус измерений аномального магнитного момента мюона и планы новых измерений.



# Тонкая и сверхтонкая структура спектра энергии легких мюонных атомов

А.П. Мартыненко<sup>a</sup>, Р. Н. Фаустов<sup>b</sup>, Е. Н. Элекина<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Самарский государственный университет

<sup>b</sup> Вычислительный центр РАН им. Дородницына

Легкие мюонные атомы (мюонный водород, мюонный дейтерий, ионы мюонного гелия, мюонный гелий) 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  $\alpha^5$  и  $\alpha^6$  в тонкой и сверхтонкой структуре  $S$ - и  $P$ -уровней энергии мюонного водорода и иона мюонного гелия  $(\mu {}^3_2He)^+$ , роль которых является определяющей для увеличения теоретической точности. Полученные нами результаты для сверхтонкой структуры  $S$ - и  $P$ -уровней энергии [3] представлены в таблице 1.

Мюонный атом	$\Delta E^{hfs}(1S)$ , мэВ	$\Delta E^{hfs}(2S)$ , мэВ	$\Delta E^{hfs}(2P_{1/2})$ , мкэВ	$\Delta E^{hfs}(2P_{3/2})$ , мкэВ
$(\mu p)$	182.62	22.813	7819.80	3248.03
$(\mu {}^3_2He)^+$	-1334.56	-166.62	-58712.90	-24290.69

Таблица 2: Сверхтонкое расщепление  $S$ - и  $P$ -состояний в мюонном водороде  $(\mu p)$  и ионе мюонного гелия  $(\mu {}^3_2He)^+$ .  $(\Delta E^{hfs}(nS) = E(n^3S_{1/2}) - E(n^1S_{1/2}))$ ,  $\Delta E^{hfs}(2P_{1/2}) = E(2^3P_{1/2}) - E(2^1P_{1/2})$ ,  $\Delta E^{hfs}(P_{3/2}) = E(2^5P_{3/2}) - E(2^3P_{3/2})$ .

Численные значения интервала тонкой структуры  $P$ -уровней энергии мюонного водорода и иона мюонного гелия равны соответственно [3]:  $\Delta E^{fs}(\mu p) = E(2P_{3/2}) - E(2P_{1/2}) = 8352.08$  мкэВ,  $\Delta E^{fs}((\mu {}^3_2He)^+) = E(2P_{3/2}) - E(2P_{1/2}) = 144803.15$  мкэВ. Полученные результаты могут служить надежной оценкой при сравнении с будущими экспериментальными данными, а интервалы сверхтонкой структуры  $\Delta_{12} = 8\Delta E^{hfs}(2S) - \Delta E^{hfs}(1S)$

$$\Delta_{12}(\mu p) = -0.120 \text{ мэВ}, \quad \Delta_{12}((\mu {}^3_2He)^+) = 1.64 \text{ мэВ}$$

для проверки предсказаний квантовой электродинамики с точностью 0.01 мэВ.

---

[1] E.Borie, G.A.Rinker, Rev. Mod. Phys. **54** (1982) 67.

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

[3] А. П. Мартыненко, Р. Н. Фаустов, ЖЭТФ **125** (2004) 48; А. Р. Martynenko, Phys. Rev. A **71** (2005) 022506; ЯФ **71** (2008) 126; ЖЭТФ **133** (2008) 794; Е. Н. Elekina, А. Р. Martynenko, arXiv:0909.2759.

## Фотон-пионный переходной формфактор: шансы и вызовы для КХД из эксперимента ВаВаг.

С. Михайлов, Н. Стефанис

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова,  
Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия*

Приводятся результаты вычислений переходного формфактора пиона  $F^{\gamma\pi}(Q^2)$  в КХД, включая часть поправок третьего порядка. Сравнивая наши теоретические предсказания с экспериментальными данными установлено очень хорошее согласие с данными CELLO и CLEO и хорошее согласие с частью данных ВаВаг. Напротив, высокоэнергетические данные ВаВаг несовместимы с предсказаниями и, более того, противоречат коллинеарной КХД в целом. Мы обсуждаем попытки возможных объяснений этого эффекта, что ведёт к новым теоретическим представлениям и призываем к экспериментальной проверке ВаВаг данных, что возможно на BELLE.

# Ньютоновская гравитационная постоянная: современный статус экспериментального определения

В. К. Миллюков<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ГАИШ МГУ

Ньютоновская гравитационная постоянная  $G$ , вместе с постоянной Планка и скоростью света  $c$ , относится к универсальным константам природы, представляющих фундаментальные предельные величины:  $c$  - максимальная скорость света,  $\hbar$  - минимальный момент количества движения,  $G$  - гравитационный радиус единичной массы (максимальный радиус сферы внутри которой происходит релятивистский гравитационный коллапс). В силу слабости гравитационного взаимодействия точность экспериментального определения  $G$  существенно ниже точности других фундаментальных констант. Современное значение ньютоновской гравитационной постоянной, рекомендованное CODATA в 2006 году, основано на данных, доступных на конец 2006 года, и равно  $G = (6.67428 \pm 0.00067) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Точность лучших экспериментальных результатов достигает 15-40 ppm, хотя разброс между ними достаточно большой. Поэтому относительная ошибка значения CODATA равна 100 ppm (ppm - part per million, т.е. ). До сих пор нет убедительных объяснений такому большому расхождению значений гравитационной постоянной, полученных в различных экспериментах. Поэтому новые эксперименты на уровне точности 10-30 ppm весьма актуальны. В данной работе содержится обзор лучших современных экспериментов по определению Ньютоновской гравитационной константы, рассмотрен ряд проблем, существенно влияющих на ее определение. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-92217-ГФЕН-а).

# Нелинейные и мультипольные эффекты в частотном стандарте на атомах в оптической решетке

В.Д. Овсянников<sup>a</sup>, Е.Ю. Ильинова<sup>a</sup>, С.И. Мармо<sup>a</sup>, В.Г. Пальчиков<sup>b</sup>, А.В. Тайченачев<sup>c</sup>, В.И. Юдин<sup>c</sup>, Х. Катори<sup>d</sup>, К. Хашигучи<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Воронежский госуниверситет, 394006 Воронеж, Университетская пл. 1

<sup>b</sup>ВНИИФТРИ, 141579, Московская обл., Менделеево

<sup>c</sup>Институт лазерной физики, СО РАН, 630090 Новосибирск

<sup>d</sup>Университет Токио, Бункио-Ку, 1138656, Токио, Япония

Оптические решетки с магической длиной волны рассматриваются в настоящее время в качестве возможных кандидатов для создания новейшего стандарта частоты и времени. Отталкивательный штарковский потенциал решетки с магической длиной волны, смещенной в фиолетовую область относительно первого штарковского резонанса, представляется более перспективным по сравнению с притягивающим, поскольку локализует атомы в окрестности узлов стоячих волн с минимальным значением действующего на атомы внешнего поля, позволяя свести влияние нелинейных эффектов на точность стандарта до уровня  $10^{-18}$  и ниже [1].

Эффекты неоднородности и магнитного поля решетки приводят к отличию пространственного распределения M1 и E2 взаимодействия от распределения E1 взаимодействия атома с решеткой. Поэтому использование магической длины волны, определенной для бегущей волны, где все взаимодействия распределены в пространстве равномерно, приводит к неопределенности частоты стандарта, обусловленной различием штарковских потенциалов для нормального и возбужденного атома [2].

Существуют две возможности устранения зависящих от движения атома неопределенностей частотного стандарта:

- 1) согласование (например, с использованием различных поляризаций падающей и отраженной компонент стоячей волны) пространственных распределений M1 и E2 сдвигов с распределением E1 сдвига;
- 2) переопределение магической длины волны так, чтобы штарковские вибрационные потенциалы для нормального и возбужденного атома были бы одинаковы.

Определена возможность использования четных изотопов в решетках с круговой поляризацией и получены оценки нелинейных и мультипольных эффектов для фиолетовой магической решетки атомов Sr .

---

[1] H. Katori, M. Takamoto, S.I. Marmo et al, Phys.Rev.Lett. **102**(2009) 063002.

[2] A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, V.D. Ovsiannikov et al. Phys.Rev.Lett. **101** (2008) 193601.

# Современные ограничения на временные изменения постоянной тонкой структуры

М.С. Онегин

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

В докладе рассматриваются три наиболее сильных ограничения на вариацию постоянной тонкой структуры полученные тремя различными методами: в лабораторном эксперименте по измерению стабильности отношения частот оптических переходов в однозарядных ионах  $Al^+$  и  $Hg^+$  [1]; по измерении скорости  $\beta$  распада ядра  $^{187}Re$  в метеоритах [2, 3]; и следующих из геохимического анализа проб реактора Окло [4].

Обсуждается возможность значительного улучшения ограничения следующего из анализа проб Окло.

---

- [1] T. Rosenband *et al.*, Science **319** (2008) 1808.
- [2] K.A. Olive *et al.*, Phys. Rev. D **69** (2004) 027701.
- [3] Y. Fujii and A.Iwamoto, Phys. Rev. Lett. **91**(2003)261101.
- [4] Ю. В. Петров *et al.*, Препринт ПИЯФ №2767 (2008) 60с.

# Численные постоянные для фундаментальной астрономии

Е. В. Питьева

*Институт Прикладной Астрономии РАН*

Любая вычислительная задача в фундаментальной астрономии опирается на использование значений различных постоянных. С 90-х годов прошлого века Международный Астрономический Союз (IAU) учреждал рабочие группы (WG) по численным стандартам в фундаментальной астрономии (NSFA – Numerical standards for Fundamental Astronomy). Работой первой группы руководил М. Стэндиш (M. Standish), второй – Т. Фукушима (T. Fukushima). Цель этих рабочих групп – обновлять и поддерживать текущие лучшие оценки (Current Best Estimates – CBE) астрономических постоянных МАС.

Последние годы по современным оптическим и радиотехническим наблюдениям (ПЗС-матрицы, лазерные, радарные, РСДБ измерения) принесли значительное улучшение всего набора постоянных для фундаментальной астрономии, поэтому новая рабочая группа (NSFA WG), возглавляемая Б. Лазумом (B. Luzum), была учреждена 26-ой Генеральной Ассамблеей МАС в 2006 г. (<http://maia.usno.navy.mil/NSFA.html>). Рабочая группа выбрала, обсудила и предложила для утверждения 27-ой Генеральной Ассамблеи МАС в качестве лучших текущих значений список констант (31 величина) для фундаментальной астрономии, некоторые из которых были определены автором вместе с М. Стэндишем. 27-ая Генеральная Ассамблея МАС приняла резолюцию, утверждающую список CBE (текущие лучшие оценки) в качестве системы астрономических постоянных МАС.

В сообщении дается принятый список численных значений констант для фундаментальной астрономии <http://maia.usno.navy.mil/NSFA/CBE.html> вместе с краткой характеристикой постоянных, методов получения их значений и точностей. Этот список составляют константы для эфемеридной астрономии (величина астрономической единицы, массы тел Солнечной системы, гравитационные постоянные), параметры вращения Земли и константы, характеризующие связь релятивистских координатных систем.

# Extended gauge sector below the weak scale and $g-2$ of the muon

M. Pospelov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Perimeter Institute and University of Victoria*

I will review recent development in the search for new U(1) forces at the sub-GeV scale. Vector and Higgs particles from this sector are subject to the constraints from precision measurements at low energy, fixed target and collider searches.

# Current results of searching for gravitational wave signals with bar detectors and big interferometers

V.N. Rudenko

*Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia*

Analysis of recent results concerning a search for Gravitational Radiation of astrophysical origin is presented. Review overlaps the cryogenic bar detector world net and big gravitational interferometers of the LIGO and VIRGO collaboration. Four principal programs of search associated with special type of sources are considered in details: radiation from compact binary coalescences, merging and ring down bursts as well as radiation of pulsars and stochastic GW-background. Current upper limits for all these type of signals are presented and perspective of improvement is discussed. In the final part of talk a current status of national project OGRAN (opto-acoustical gravitational wave detector) is described.



# Поправки порядка $(Z\alpha)^n$ в процессах образования лептонов и фотонов на ускорителях с тяжелыми ядрами RHIC и LHC

В.Г. Сербо<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Новосибирский государственный университет

Рассмотрены эффекты сильного электромагнитного поля в соударениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на ускорителях RHIC и LHC. Поскольку параметр  $Z\alpha$  в этом случае не мал ( $Z\alpha \approx 0.6$  для Au-Au и Pb-Pb соударений), то весь ряд по этому параметру должен быть отсуммирован, чтобы получить сечение процесса с достаточной точностью.

Для процесса образования лептонных пар в соударениях тяжелых ядер представлены новые результаты, относящиеся к кулоновским поправкам (соответствующих много-фотонному обмену образованных лептонов с ядрами) и к унитарным поправкам (соответствующих обмену между ядрами блоками виртуального рассеяния света на свете). Для тормозного излучения ядер рассчитаны унитарные поправки, а также рассмотрен специальный случай тормозного излучения, идущего через блок виртуального дельбрюковского рассеяния.

# Fundamental constants of modern cosmology

Alexei A. Starobinsky

*Landau Institute for Theoretical Physics, Moscow, 119334, Russia*

The modern 'standard' cosmological model is based on four fundamental parameters (constants) which may not be reduced to the known fundamental constants of elementary particle physics and which follow, at the present state-of-the-art, from observational data only:

- 1) the constant energy density of dark energy (the cosmological constant);
- 2) the ratio of the baryon density to that of all non-relativistic particles (including cold non-baryonic dark matter);
- 3) the baryon-to-photon ratio;
- 4) the scale-invariant amplitude of primordial scalar (density) perturbations.

The accuracy with which they are measured is no worth than  $\sim 10\%$  at present.

In contrast to the other two parameters of the minimal  $\Lambda$ CDM model (the Hubble constant  $H_0$  and the optical width after recombination), these parameters are indeed both constant and fundamental, in the sense that they are related to some micro-physical parameters of corresponding underlying theories (not yet determined uniquely): a theory of dark energy, a theory of non-baryonic cold dark matter, a theory of generation of the baryon asymmetry in the early Universe and a theory of initial conditions for the early Universe (e.g., inflation). The fact that these four theories remain almost completely unrelated at the present level of knowledge shows that the present cosmology, while sufficiently fundamental already, is far from being unified. Thus, we cannot reduce the number of these fundamental constants. However, the same refers to the modern theory of elementary particles, which has a significantly larger number of fundamental parameters (constants).

I discuss the present situation with the first and the last constants in more detail. While present observational data do not require more constants to describe dark energy (in other words, no statistically reliable deviation of dark energy from an exact cosmological constant has been found), a deviation of the slope of the primordial spectrum of scalar perturbations from the scale-invariant one  $n_s = 1$  has been determined at  $\sim 3\sigma$  level (though under some assumptions). Anyway, the interpretation of existing data requires introducing more parameters than one to describe the perturbation spectrum. However, here a fundamental theory (inflation, in this case) may help us to keep the number of independent fundamental constants at the same level. Namely, there exist viable one-parameter inflationary models predicting both the observed spectrum of scalar perturbations and the spectrum of primordial gravitational waves (still to be discovered), and I present some examples of them.

# Новые методы вычисления фейнмановских диаграмм

О.В. Тарасов

*Объединённый институт ядерных исследований, Дубна*

Теоретические предсказания для планируемых экспериментов на ЛНС и других ускорителях, требуют знания прецизионных радиационных поправок. Сложность вычисления таких поправок связана в частности, с необходимостью вычисления фейнмановских диаграмм, зависящих от большого числа аргументов - масс и кинематических переменных. Дальнейший прогресс в аналитическом вычислении фейнмановских диаграмм требует привлечения новых математических методов.

К числу таких новых методов можно отнести метод обобщённых рекуррентных соотношений [1] и метод функциональных уравнений [2], разрабатываемых автором на протяжении последних нескольких лет. Приводится краткое изложение метода обобщённых рекуррентных соотношений и его сравнение с хорошо известным методом интегрирования по частям [3]. Показано, что на основе обобщённых рекуррентных соотношений можно построить более эффективные методы вычисления диаграмм.

Дано описание общего метода для получения функциональных уравнений для фейнмановских интегралов. Идея метода проиллюстрирована на примере однопетлевых интегралов пропагаторного типа и интегралов соответствующих диаграммам с 3-мя внешними линиями. Показано, что данные функциональные уравнения могут быть использованы для аналитического продолжения интегралов как функций кинематических переменных во все кинематические области.

---

[1] O. V. Tarasov, Phys. Rev. D **54** (1996) 6479.

[2] O. V. Tarasov, Phys. Lett. B **670** (2008) 67;  
B. A. Kniehl and O. V. Tarasov, Nucl. Phys. B **820** (2009) 178.

[3] F. V. Tkachov, Phys. Lett. B **100** (1981) 65;  
K. G. Chetyrkin and F. V. Tkachov, Nucl. Phys. B **192** (1981) 159.

## Принцип эквивалентности и элементарные частицы

О.В. Теряев<sup>а</sup>,

<sup>а</sup> *БЛТФ, ОИЯИ*

Принцип эквивалентности (ПЭ) проявляется в экспериментах не только с макроскопическими телами, но и с элементарными частицами. Так как в ОТО связь частиц с гравитацией описывается тензором энергии-импульса, косвенную информацию о его матричных элементах можно извлечь из экспериментов вообще без участия гравитационного поля. При этом возникает возможность проверять ПЭ для кварков и глюонов по отдельности. Обсуждается статус проявлений ПЭ, открытых Кобзаревым и Окунем в 1962 г. и связанных с обращением в нуль гравитационных аналогов электрического дипольного и аномального магнитного моментов. Предлагается новое следствие ПЭ для частиц со спином 1, приводящее к правилам сумм для тензорных спиновых структурных функций. Обсуждается его проверка в экспериментах с поляризованными дейтронами.

# Определение физических характеристик мезоатомов и мезомолекул методами мю-катализа

М.П. Файфман

*Российский научный центр „Курчатовский институт“*

Исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза в смеси изотопов водорода предоставляют уникальные возможности для изучения структуры систем нескольких частиц. Результаты таких исследований широко используются для решения различных проблем атомно-молекулярной и ядерной физики (см., например, [1]). В частности, недавно законченный анализ данных серии экспериментов [2] по мю-катализу, проведенных в PSI (Швейцария), позволил проверить правильность теоретических моделей, развитых для решения кулоновской задачи трех тел, а также для расчетов ядерных реакций. В докладе представлено детальное сравнение теоретических результатов с данными экспериментов [2] и обсуждаются пути усовершенствования теоретических методов для расчетов таких физических характеристик, как сверхтонкая структура  $d\mu$ -атома, энергия слабосвязанного состояния  $dd\mu$ -молекулы с учетом релятивистских эффектов, отношение вероятностей зарядово-симметричных каналов ядерного  $dd$ -синтеза и других.

---

[1] С. С. Герштейн, Ю. В. Петров, Л. И. Пономарев, УФН **160** (1990) 3.

[2] D. V. Balin *et al.*, Proc. Int. Conf. **MCF-07**, Dubna (2008) 67.

## Дестабилизирующие факторы при измерении гравитационной постоянной

В.П. Измайлов, О.В. Карагиоз  
Национальный институт авиационных технологий,  
119285, Москва, ул. Пырьева, д.5, стр.12  
E-mail: info@tribotech.ru

В.М. Шахпаронов  
МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики колебаний,  
119991, ГСП-1, Москва E-mail: shah@phys.msu.ru

При длительных измерениях были обнаружены вариации значений  $G$ . Требовалось выявить их природу. Последовательно исключали наиболее очевидные факторы. Нить подвеса подвергали термомеханической обработке в вакууме током высокой частоты, что снижало гистерезисные потери в ее материале. В ряде работ по рекомендации Куроды в результаты вычислений введена поправка на несовершенство упругих характеристик нити подвеса. Несостоятельность такой гипотезы очевидна. Внутреннее трение в металлических нитях имеет гистерезисную природу, характеризуется коэффициентом гистерезисных потерь и не зависит от частоты деформации.

Существенным дестабилизирующим фактором при измерении  $G$  может оказаться дополнительное магнитное взаимодействие. Многие специалисты его игнорируют, работают с притягивающими стальными массами, не защищают крутильную систему магнитным экраном. Исключить магнитное взаимодействие при отсутствии магнитного экрана практически невозможно даже при использовании притягивающих масс из немагнитных материалов. В практике авторов на одном из вариантов весов магнитное взаимодействие почти сравнялось по величине с гравитационным при наличии магнитного экрана и использовании латунных шаровых притягивающих масс.

Очевидным дестабилизирующим фактором являются микросейсмы. Крутильная система была тщательно демпфирована, что снижало их влияние. Предпринимались попытки повлиять на результаты какими-либо внешними воздействиями. В частности, измеряли  $G$  при колебаниях точки подвеса. Полученные данные не позволяли обнаружить какой-либо стабильный и заметный эффект. Реакция на такие возмущения была и малая, и неоднозначная.

Большое количество накопленных данных в виде неэквидистантных рядов измерений  $G$  позволило провести спектральный анализ результатов и выявить некоторые характерные периодичности. Трудности, связанные с отсутствием программ для реализации таких исследований, не позволяли ранее осуществить качественный анализ и выявить скрытые дестабилизирующие факторы. В процессе анализа неэквидистантных рядов была создана эффективно работающая программа, позволившая проводить детальные исследования в широком диапазоне периодичностей.

Все выявленные периодичности и суточные вариации  $G$  связаны с воздействием микросейсм на точку подвеса весов, неравновесными потоками разреженного газа, вариациями температуры и ее градиентов. Высокий вакуум значительно ослабил влияние неравновесных потоков. Технические микросейсмы более сильно влияют в дневное время и приводят к росту дисперсии. Ночью их влияние заметно ослабевает. Чем меньше амплитуда скрытых периодичностей, тем слабее влияние дестабилизирующих факторов и, соответственно, выше качество измерений.

$e^+e^- \rightarrow$  адроны при низких энергиях и статус предсказания  
 $(g - 2)/2$  мюона в Стандартной Модели

С.И. Эйдельман

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,  
Новосибирск, 630090, Россия*

Обсуждается предсказание для аномального магнитного момента мюона в Стандартной Модели в свете новых данных по  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны при низких энергиях с детекторов KLOE и BaBar. Величина ведущего адронного вклада вычислена с заметно более высокой точностью, чем ранее, что впервые дает более высокую точность теоретического предсказания, чем в эксперименте. В скором времени точность предсказания будет ограничена адронным вкладом света на свете, для которого по-прежнему наблюдается большой разброс оценок. Сегодня экспериментальное значение аномального магнитного момента мюона на 3.2 стандартных отклонения превышает теоретическое предсказание. Рассмотрена возможность использования данных по распаду тау-лептона для уточнения теоретического предсказания ведущего адронного вклада. Новое модельнозависимое вычисление поправок на нарушение  $SU(2)$  симметрии приводит к лучшему чем ранее согласию тау-лептонных оценок с  $e^+e^-$ .





## Стеновые доклады



# Многомерная космология с ускоренным расширением Вселенной и малой вариацией гравитационной постоянной

К.А. Бронников

*ВНИИМС, 119361, Москва, Озерная ул. 4б;  
РУДН, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

В подходе Калуцы-Клейна на основе теории гравитации с нелинейным по кривизне лагранжианом рассмотрен класс космологических моделей с одним компактным дополнительным пространством произвольной размерности [1]. В этих моделях как наблюдаемый масштабный фактор  $a(t)$ , так и масштабный фактор дополнительных измерений  $b(t)$  растут экспоненциально в позднюю эпоху, однако  $b(t)$  растет достаточно медленно, чтобы зависящие от него вариации эффективной гравитационной постоянной  $G$  оставались в пределах, совместимых с наблюдениями. Такие модели предсказывают значительные изменения физических законов в отдаленном будущем за счет роста дополнительных измерений до наблюдаемых размеров и эволюции постоянной  $G$ , приводящей к ослаблению гравитационного взаимодействия.

- 
- [1] К.А. Bronnikov, S.A. Kononogov, V.N. Melnikov, and S.G. Rubin, *Grav. Cosmol.* **14** (2008), 230.

# О временной вариации гравитационной постоянной в СТТ и многомерных моделях гравитации

В.Н. Мельников, В.Д. Иващук

*Центр гравитации и фундаментальной метрологии ВНИИМС и  
Институт гравитации и космологии РУДН,  
Озерная ул. 46, Москва 119361*

Дан краткий обзор проблемы временной вариации гравитационной постоянной  $G$  в скалярно-тензорных теориях (СТТ) и многомерных моделях гравитации. Как известно, в многомерной космологии эффективная 4-мерная гравитационная постоянная  $G$  (в йордановской картине) имеет следующий вид:  $G(t) = \text{const}V^{-1}(t)$ , где  $V(t)$  - объем внутреннего пространства. Рассмотрен ряд многомерных космологических моделей, определенных на произведении риччи-плоских многообразий: а) вакуумной с двумя фактор-пространствами ненулевой кривизны; б) с материей в виде анизотропной жидкости и со степенным и экспоненциальным поведением масштабных факторов; в) в модели с полями форм и скалярными (фантомными) полями. Показано, что в данных моделях при некоторых соотношениях между параметрами существует интервал временной переменной, в котором относительная вариация гравитационной постоянной  $\delta = (dG/dt)/(GH)$  (где  $H$  - параметр Хаббла) удовлетворяет наблюдательному ограничению  $|\delta| < 0,01$ , и при этом рассмотренные модели описывают ускоренное расширение трехмерного фактор-пространства в согласии с современными космологическими данными. (Современная оценка для вариации  $G$  по движению планет, спутников и лазерной локации Луны:  $|\dot{G}/G| < 5 \cdot 10^{-13-1}$  - Е.В. Питьева (2008); В.Г. Турышев (2009)).

---

[1] V.N. Melnikov, Int. J. Mod. Phys. A **24** (2009) 1473.

[2] V.N. Melnikov, Frontiers of Physics **4** (2009) 75.

[3] V.D. Ivashchuk, S.A. Kononogov and V.N. Melnikov, Grav. Cosmol. **14** (2008) 235.

# Оптическая решетка для стандарта частоты, не зависящего от движения атома

Е.Ю. Ильинова<sup>а</sup>, В.Д. Овсянников<sup>а</sup>, Х. Катори<sup>б</sup>, К. Хашигучи<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Воронежский госуниверситет, 394006 Воронеж, Университетская пл. 1

<sup>б</sup>Университет Токио, Бункио-Ку, 1138656, Токио, Япония

Точность атомных часов в настоящее время достигнута на уровне  $10^{-16}$  [1, 2]. Для продвижения на более высокий уровень точности помимо ограничений, накладываемых на естественную ширину спектральной линии часового перехода, требуется искать способы для преодоления других неблагоприятных факторов, способных привести к неопределенности стандарта частоты. Среди них необходимо выделить: зависимость потенциала взаимодействия атом-поле от внутреннего электронного состояния атома, тепловое излучение, взаимодействие между атомами в решетке, нелинейные и недипольные эффекты взаимодействия атома с полем решетки.

Неопределенности, обусловленные нелинейными эффектами (гиперполяризуемостью) можно существенно снизить в решетке с отталкивательным потенциалом, воспользовавшись высокочастотной (фиолетовой) магической длиной волны [3]. Эффекты неоднородности и магнитной компоненты поля решетки приводят к неопределенностям с корневой зависимостью от интенсивности лазерной волны [4], обусловленным недипольными взаимодействиями.

Мы предлагаем методы построения решеток, позволяющих исключить неопределенность частоты часового перехода, обусловленную вибрационным движением атома в штарковских потенциальных ямах, различающихся для верхнего и нижнего часовых уровней вследствие магнитодипольного и электроквадрупольного взаимодействия атома с полем [5].

---

[1] A.D. Ludlow et al. Science **319** (2008) 1805.

[2] N.D. Lemke et al. Phys.Rev.Lett. **103**(2009) 063001.

[3] H. Katori, M. Takamoto, S.I. Marmo et al. Phys.Rev.Lett. **102** (2009) 063002.

[4] A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, V.D. Ovsiannikov et al. Phys.Rev.Lett. **101** (2008) 193601.

[5] H. Katori, K. Hashiguchi, E.Yu. Ilinova and V.D. Ovsiannikov. Phys.Rev.Lett. **103** (2009) 153004.

## Об определении постоянной Больцмана и единицы термодинамической температуры

М.И. Калинин<sup>а</sup>, С.А. Кононогов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы*

В связи с предполагаемым в 2011 году переопределением единицы термодинамической температуры (кельвина) анализируется возможность точного определения постоянной Больцмана – фундаментальной физической константы, связанной с тепловыми явлениями, а также термометрический метод определения её величины. Показано, что точное значение постоянной Больцмана, соответствующее современному определению кельвина, принципиально определяется в статистической механике только в термодинамическом пределе. Это связано с тем, что функция распределения, а значит и уравнение состояния конечной системы являются аналитическими функциями термодинамических параметров (плотности, температуры, давления). То есть в таких системах, строго говоря, нет фазовых переходов [1]. А значит и не существует скачкообразного перехода от одной фазы к другой. Имеются протяжённые переходные области в пространстве термодинамических параметров, хотя практически и очень малые, однако имеющие ненулевой объём. Следовательно в конечных молекулярных системах строго говоря нет тройной точки, а есть некоторая конечная область плавного перехода трёх фаз друг в друга. При переходе к бесконечной системе (в термодинамическом пределе) функции распределения и уравнения состояния приобретают скачкообразные разрывы, соответствующие поверхностям и линиям сосуществования фаз [1]. Следовательно в термодинамическом пределе существует тройная точка и можно в принципе определить её параметры через характеристики молекулярного взаимодействия методами статистической механики. В случае, когда молекулярной системой является вода, эти параметры однозначно определяют постоянную Больцмана с помощью современного определения единицы термодинамической температуры. Это – прямое определение величины постоянной Больцмана.

Поскольку в настоящее время методы статистической механики не позволяют выполнить такие расчеты, величина постоянной Больцмана определяется на практике с помощью газовых термометров, теоретической основой работы которых является вириальное уравнение состояния реальных газов. Точность таких уравнений строго не оценена до сих пор, что не позволяет быть уверенными в современных оценках неопределённости значения величины постоянной Больцмана [2, 3].

---

[1] С. N. Yang, T. D. Lee., Phys. Rev. **87** (1952) 404.

[2] С. А. Кононогов. Метрология и фундаментальные физические константы. М., Стандартинформ, 2008.

[3] М.И. Калинин, С.А. Кононогов., Теплофизика высоких температур. **1** (2009) № 6 (в печати).

# Вклады поляризации вакуума старших порядков в лэмбовский сдвиг в легких мюонных атомах

Е.Ю. Корзинин<sup>a</sup>, В.Г. Иванов<sup>b,a</sup> и С.Г. Каршенбойм<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева, 190005, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 196140  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 85748 Garching, Germany

Исследование мюонных атомов представляет значительный интерес в связи с определением зарядовых радиусов различных ядер. В частности, в настоящее время предпринимаются усилия по измерению лэмбовского сдвига в мюонном водороде и дейтерии.

В данной работе представлены расчеты вклада электронной поляризации вакуума третьего порядка в лэмбовский сдвиг  $2s - 2p$  в мюонном водороде, дейтерии и ионе гелия.

При вычислении мы следовали методам, развитым в работах [1–3].

- 
- [1] С.Г. Каршенбойм, Е.Ю. Корзинин, В.Г. Иванов, Письма в ЖЭТФ **88** (2008), 737; **89** (2009), 240.
- [2] V.G. Ivanov, E.Yu. Korzinin, and S.G. Karshenboim, Phys. Rev. D **80**, 027702 (2009).
- [3] V.G. Ivanov, E.Yu. Korzinin, and S.G. Karshenboim, eprint arXiv:0905.4471.

# Высокопроизводительное моделирование процесса возбуждения атомов водорода для задачи подгонки линий в эксперименте по спектроскопии двухфотонного перехода 1s-2s в атоме водорода на основе технологии CUDA

А.И. Майстров<sup>a,c</sup>, С.G. Parthey<sup>a</sup>, Н.Н. Колачевский<sup>a,b</sup>, Th. Udem<sup>a</sup>, А.Н. Матвеев<sup>a,b</sup>,  
J. Alnis<sup>a</sup>, T.W. Hänsch<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *MPQ, Max Planck Institute of Quantum Optics, 85748 Garching, Germany*

<sup>b</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский Проспект 53, 119991 Москва, Россия*

<sup>c</sup> *TUM, Technische Universität München, 80333, Arcisstr.21, Germany*

Для повышения точности определения абсолютной частоты перехода 1s-2s в атоме водорода [2], необходим метод определения частоты невозмущенного резонанса по экспериментально измеренным линиям перехода. Поскольку в сдвиг и уширение спектральной линии дает вклад ряд эффектов, таких как эффект Доплера второго порядка, динамический штарковский сдвиг, ионизация и времяпролетное уширение, необходимо детальное и высокоэффективное моделирование динамики возбуждения для осуществления подгонки спектрального контура. Задача, поставленная в данной работе, заключается в создании эффективного алгоритма подгонки, обеспечивающего точность в несколько герц при спектральной ширине линии около 2 кГц.

Монте-Карло симуляция [2] процесса возбуждения, включающая решение системы уравнений Блоха для каждого атома, позволяет получить численную модель формы линии для проведения адекватной подгонки экспериментальных кривых. Однако, использование методики в обработке реальных данных до сих пор ограничивалось вычислительными возможностями современных компьютеров. Применение графических карт (GPU) позволяет решить задачу высокоэффективного численного моделирования за счет многопроцессорности (GPU Nvidia GTX 295 включает 480 счетных ядер) и эффективного программного средства разработки CUDA, которое позволяет абстрагировать код программы от непосредственного программирования отдельных ядер.

Реализация модели формы линии для одной задержки по 40 частотным отстройкам для 10000 атомов на карте Nvidia GTX 295 занимает менее секунды, в то время как аналогичная задача в среде Mathematica 5 на процессоре Core 2 Duo E4300 занимает порядка 10 минут. Таким образом, использование GPU-карт и реализация Монте-Карло симуляции процесса возбуждения атомов водорода при помощи программных средств разработки CUDA делает возможным реализацию методики подгонки экспериментально измеренных линий перехода к их модельным эквивалентам, и тем самым позволяет увеличить точность определения абсолютной частоты перехода 1s-2s в атоме водорода.

---

[1] N. Kolachevsky *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 213002.

[2] M. Haas *et al.*, Phys. Rev. A **73** (2006) 052501.



# Обобщенные штурмовские разложения релятивистской кулоновской функции Грина

С. А. Запругаев, Н. Л. Манаков, С. И. Мармо, И. С. Ненашев

*Воронежский государственный университет*

Эффективный метод расчета электромагнитных переходов в многозарядных ионах состоит в использовании замкнутых выражений для релятивистской кулоновской функции Грина (РКФГ), наиболее удобным из которых является ее штурмовское разложение. Штурмовское разложение РКФГ (которое представляет собой ряд по полиномам Лагерра) позволяет избежать численного интегрирования при расчете фейнмановских диаграмм и свести задачу к суммированию рядов из гипергеометрических функций. Однако эти ряды быстро сходятся лишь при энергиях поглощаемого фотона, меньших энергии связи электрона в ионе  $\hbar\omega < |E_0|$ , а в надпороговой области частот  $\hbar\omega > |E_0|$  оказываются расходящимися. В настоящей работе проведено преобразование штурмовского разложения РКФГ, которое делает возможным ее использование для расчета надпороговых процессов. Основная идея преобразования состоит в введении в штурмовское разложение свободного параметра, выбором которого удастся достичь сходимости штурмовских рядов для амплитуд электромагнитных переходов между связанными состояниями при  $\hbar\omega > |E_0|$  (ср. аналогичное преобразование в [1] для нерелятивистской КФГ). Рассмотрены две формы обобщенного штурмовского разложения: первая получена непосредственным преобразованием РКФГ линейного уравнения Дирака; вторая возникает при преобразовании функции Грина квадрированного уравнения Дирака и последующем действии на нее оператора квадрирования. В качестве примера применения развиваемой техники расчета проведены вычисления релятивистской электрически-дипольной динамической поляризуемости основных состояний водородоподобных ионов с  $Z < 137$  ( $Z$  — заряд ядра) при надпороговых частотах. Проверена численная эквивалентность двух форм обобщенного штурмовского разложения РКФГ, достигнуто полное согласие с результатами работы [2].

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.

[2] V. Yakhontov Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 093001.

# Подготовка измерения оптической частоты перехода 1s - 2s в атомах водорода и дейтерия с использованием стабильной опорной оптической частоты, получаемой через телекоммуникационную сеть

Я. Алнис<sup>a</sup>, А.Н. Матвеев<sup>a,b</sup>, К. Партай<sup>a</sup>, К. Предель<sup>a</sup>, Т. Вилкен<sup>a</sup>,  
Н.Н. Колачевский<sup>a,b</sup>, Р. Хольцварт<sup>a</sup>, Т. Удем<sup>a</sup>, Т.В. Хэнш<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *MPQ, Max Planck Institute of Quantum Optics, 85748 Garching, Germany*

<sup>b</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский Проспект 31, 119991 Москва, Россия*

Благодаря значительному прогрессу, достигнутому в последние годы, современные оптические стандарты частоты превзошли по точности и стабильности микроволновые, позволяя измерять частоты с 17-значной точностью [1]. Важным преимуществом оптических часов является возможность достижения высокой стабильности на коротких временах. Для прецизионного сравнения частот излучения, лежащих в оптическом диапазоне, используется фемтосекундная гребенка частот [2].

В настоящее время активно ведутся работы над созданием оптоволоконных линий для распространения излучения оптических стандартов частоты по телекоммуникационным сетям [3] с сохранением кратковременной стабильности сигнала. Прогресс в этом направлении позволит использовать оптические часы, созданные в одних лабораториях, для прецизионных измерений, проводимых в других, причем расстояние между ними может достигать сотен километров. В рамках данной работы обсуждается возможность использования стандартов, работающих в институте РТВ в Брауншвайге, для измерения частоты перехода 1s-2s в атомарном водороде на установке, располагающейся в институте MPQ в Гархинге [4].

В качестве опорного излучения, передаваемого по телекоммуникационным сетям, в данном проекте будет использоваться излучение 1500 нм, привязанное по фазе к сигналу оптического стандарта. Переданное излучение будет использоваться в роли опорного сигнала для стабилизации фемтосекундной гребенки частот в MPQ. Ожидаемая стабильность принятого излучения составляет  $4 \cdot 10^{-15}$  за 1 с. Для исследования возможных систематических эффектов, связанных с гребенкой, предполагается одновременное использование двух независимых фемтосекундных лазеров.

---

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

[2] N. Kolachevsky *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 213002.

[3] G. Grosche *et al.*, *Opt. Lett.* **34** (2009) 2270.

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

# Лазерная система и стандарт частоты для прецизионной спектроскопии перехода 1s-2s в атоме водорода

А.Н. Матвеев<sup>a,b</sup>, С.G. Parthey<sup>a</sup>, J. Alnis<sup>a</sup>, Н.Н. Колачевский<sup>a,b</sup>, Т.W. Hänsch<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *MPQ, Max Planck Institute of Quantum Optics, 85748 Garching, Germany*

<sup>b</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский Проспект 31, 119991 Москва, Россия*

Прогресс, достигнутый в области ультрастабильных лазерных систем для прецизионной спектроскопии, открывает возможность создания источников перестраиваемого излучения с субгерцовой спектральной шириной линии [1]. Высочайшая стабильность лазерных систем ставит вопрос о калибровке их частоты на уровне точности, соответствующем нескольким единицам в пятнадцатом знаке. Одним из доступных способов высокоточного измерения частоты лазерной системы является использование фемтосекундной гребенки частоты, привязанной к локальному радиочастотному стандарту, калибруемому с помощью глобальных систем позиционирования GPS и GLONASS.

Для эксперимента по спектроскопии двухфотонного перехода 1s-2s в атоме водорода была создана лазерная система, построенная на базе полупроводникового лазера с внешним резонатором, активно стабилизируемого по частоте и фазе относительно ультрастабильного резонатора Фабри-Перо. Измерение частоты лазерной системы осуществлялось с помощью волоконного фемтосекундного лазера, излучение которого привязывается по фазе к сигналу активного водородного лазера. Калибровка лазера проводится на ежедневной основе на основании обработки данных сравнения сигнала лазера с сигналами группировки спутников GPS. Консервативная оценка неопределенности измерения показывает возможность достижения точности  $2 \times 10^{-15}$  за один день усреднения.

Построенная лазерная система была успешно использована для измерения частоты сверхтонкого расщепления уровня 2s в атомарном водороде [2]. Обсуждаются перспективы ее использования для измерения изотопического сдвига в атомарном дейтерии и абсолютной частоты перехода 1s-2s в атоме водорода.

---

[1] J. Alnis *et al.*, Physical Review A **77** (2008) 053809.

[2] N. Kolachevsky *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 213002.

# Поляризация вакуума кулоновским полем: асимптотика потенциала

Н.Л. Манаков, А.А. Некипелов

*Воронежский государственный университет*

Вклад эффектов поляризации вакуума сильным кулоновским полем при расчете спектров многозарядных ионов с учетом фейнмановских диаграмм различных порядков рассматривался рядом авторов (ссылки см. в обзоре [1]). Одной из технических трудностей таких расчетов является проблема вычисления поляризационного потенциала при больших расстояниях  $r$  от ядра. Как известно, при малых  $r$  члены парциального разложения поляризационного потенциала достаточно быстро ( $\sim k^{-8}$ ) убывают с ростом квантового числа  $k = j + 1/2$  ( $j = 1/2, 3/2, \dots$ ), в то время как при больших  $r$  эти слагаемые вначале растут с увеличением  $k$  (до значений  $k$  порядка  $r$ ) и лишь затем начинают убывать. Это создает проблемы с численным суммированием парциального ряда. В частности, в работе [2] вначале рассчитывались отдельные слагаемые парциального разложения для поляризационных поправок в энергии, а затем выполнялось численное суммирование парциального ряда.

В настоящем сообщении мы используем полученную нами ранее асимптотику поляризационного потенциала (справедливую вплоть до  $\alpha Z \sim 1$ ) [3] при расчете однопетлевых поправок для энергии водородоподобных ионов с ядром конечных размеров. Результаты полностью согласуются с данными работы [2], в которой рассчитаны также поляризационные поправки для ионов, изоэлектронных атомам щелочных металлов. Показано, что использование предлагаемого нами способа учета поляризационного потенциала является эффективным и в этом случае.

---

[1] Шабаев В.М., УФН **178**, 1220 (2008)

[2] J. Sapirstein and K.T. Cheng, Phys.Rev. A. **68**, 042111 (2003)

[3] A.G. Fainstein, N.L. Manakov and A.A. Nekipelov, J. Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys. **23**, 559 (1990)

# Оценки возможных изменений гравитационной постоянной, массы Солнца и полуосей планет по современным наблюдениям планет и космических аппаратов

Е. В. Питьева<sup>a</sup>, Н. П. Питьев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Институт Прикладной Астрономии РАН*

<sup>b</sup> *Астрономический Институт им. В. В. Соболева СПбГУ*

Возможное изменение по времени гравитационной постоянной  $G(t)$  ведет к изменению взаимных сил притяжения и ускорений между телами. Аналогичные изменения ускорений появляются, если массы или масса одного из тел меняются во времени. В уравнения движения тел входят произведения гравитационной постоянной и массы тел  $GM_i$ . Можно показать, что при изменении массы центрального тела  $GM_\odot$  ( $G$  или  $M_\odot$ ) интеграл площадей сохраняется:  $GM_\odot(t) \cdot a(t) = \text{const}$ , тогда  $G\dot{M}_\odot/GM_\odot = -\dot{a}_i/a_i$ , т.е. в случае уменьшения силы притяжения от центрального тела второе тело будет двигаться по траектории, постепенно удаляющейся от центрального тела. Современные радарные наблюдения планет, а особенно значительно более точные данные космических аппаратов, находящихся около или на поверхности планет, позволяют уточнять не только орбитальные элементы планет, но и находить значения некоторых физических параметров и оценивать их возможную переменность на основе построенных высокоточных планетных эфемерид.

Около 550000 позиционных наблюдений планет и КА разных типов, в основном, радиотехнических (1961–2008 гг.), были использованы для оценок возможных изменений гравитационной постоянной и полуосей планет. Анализ наблюдений проводился на основе эфемерид ЕРМ2008 ИПА РАН, построенных совместным численным интегрированием уравнений движения девяти больших планет, Солнца, Луны, астероидов и транс-нептуновых объектов, выполненным в постньютоновском приближении.

Было показано, что во-первых, в настоящее время нет возможности различить изменение гравитационной постоянной  $\dot{G}/G$  от изменения гелиоцентрической гравитационной постоянной  $G\dot{M}_\odot/GM_\odot$ :  $\dot{G}/G \simeq G\dot{M}_\odot/GM_\odot = (-5.9 \pm 4.4) \cdot 10^{-14}$  в год. Во-вторых, были найдены положительные вековые изменения больших полуосей планет, из которых может быть получена другая оценка  $\dot{G}/G$ . Положительные значения  $\dot{a}_i/a_i$  соответствуют вековому уменьшению гелиоцентрической гравитационной постоянной, вызванного потерей массы Солнца благодаря излучению и солнечному ветру. Однако средневзвешенное (по планетам) значение  $\dot{a}/a = (1.63 \pm 1.50) \cdot 10^{-16}$  в год, полученное, в основном по изменениям полуосей Земли и Марса из-за подавляющего числа КА около Марса, приводит к предварительному, значительно меньшему значению  $G\dot{M}_\odot/GM_\odot = (-1.63 \pm 1.50) \cdot 10^{-16}$  в год, которое нуждается в дальнейшем уточнении.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что возможное изменение гравитационной постоянной не превосходит  $1 \cdot 10^{-13}$  в год.

# Влияние электрических зарядов в высокочувствительных измерительных системах с пробными телами

Л.Г. Прохоров

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет*

Измерение малых сил, действующих на пробные тела, требует тщательного исследования всех флуктуационных воздействий на систему. Одним из источников флуктуационных сил являются вариации силы электрического взаимодействия пробной массы с окружением. В настоящей работе исследуются вариации распределения электрических зарядов на кварцевых образцах. Выбор материала обусловлен участием автора в проекте создания гравитационно-волновых детекторов LIGO[1]. Учет рассмотренных эффектов и использование полученных данных необходимы в ряде экспериментов, связанных с измерением малых сил.

Во-первых, электрическое взаимодействие пробной массы с окружением приводит к внесению дополнительного затухания в колебания пробной массы - а следовательно, и к дополнительным флуктуационным силам. Их величина существенно зависит от материалов пробной массы и окружения, расстояния между ними и от заряда пробной массы.

Во-вторых, изменение заряда пробной массы приводит к изменению сил электрического взаимодействия. Причинами изменения электрического заряда могут быть космические лучи, адсорбция и десорбция молекул с поверхности пробной массы, фоновая радиоактивность. Флуктуации электрического заряда могут как напрямую приводить к флуктуациям электрических сил, так и способствовать увеличению заряда пробной массы, воздействуя через внесение дополнительной диссипации.

Третий механизм, который необходимо учитывать при изучении зарядов на диэлектрических пробных массах, связан с электропроводностью. Перераспределение электрических зарядов под действием собственных и внешних электрических полей также приводит к изменению сил взаимодействия пробной массы с окружением.

Проведенное экспериментальное исследование этих механизмов позволяет учитывать флуктуационное влияние электрических зарядов на высокочувствительные измерительные системы с пробными телами, в частности на гравитационно-волновой детектор LIGO.

---

[1] Abramovichi A., et al. (LIGO Scientific collaboration), LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory // Science, 1992, 256, p.325.

# Возможность проверки сохранения $CPT$ -симметрии в гравитационном взаимодействии с помощью метода “замораживания” спина в накопительных кольцах

А.Я. Силенко

*НИУ Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь*

В прецизионных спиновых экспериментах по проверке сохранения  $CPT$ -симметрии, ранее проведенных в накопительных кольцах и ловушках Пеннинга, сравнивались частоты прецессии спина электронов и позитронов в магнитном поле. Установленное с высокой точностью равенство аномальных магнитных моментов электронов и позитронов позволяет говорить о сохранении  $CPT$ -симметрии в электромагнитном взаимодействии. В [1] был предложен подобный эксперимент по проверке сохранения  $CPT$ -симметрии в гравитационном взаимодействии. Использовался тот факт, что все лабораторные эксперименты проводятся с неинерциальной системе отсчета, связанной с вращающейся Землей. Принцип эквивалентности устанавливает тождественность неинерциальных систем отсчета и гравитационного поля. Ее доказательством для стационарного гравитационного поля, эквивалентного вращающейся системе отсчета, является успешное наблюдение эффекта Лензе-Тирринга.

В отличие от работы [1], мы предлагаем не выделять слабый эффект, обусловленный вращением Земли на фоне гораздо более сильной  $(g - 2)$ -прецессии с угловой частотой  $\Omega = eaB/m$ , а использовать метод “замораживания” спина для полного подавления данной прецессии. Этот метод позволяет устранить не только  $(g - 2)$ -прецессию для фиксированной величины импульса частиц  $p_0$ , но и линейные и квадратичные члены в разложении угловой частоты  $(g - 2)$ -прецессии по степеням  $(p - p_0)/p_0$  [2]. Предлагаемый эксперимент во многом подобен разрабатываемому в настоящее время эксперименту по поиску электрических дипольных моментов частиц в накопительных кольцах [2]. Как и в последнем эксперименте, необходимо увеличение времени когерентности спина до  $\sim 1000$  с вследствие малости частоты вращения Земли ( $11.6 \mu\text{Гц}$ ). В предлагаемом эксперименте можно использовать накопительные кольца как только с магнитным полем (при  $\gamma = 1/a = 862.33$ ,  $E = 440.65$  МэВ), так и только с электрическим полем [3] (при  $\gamma = \sqrt{1 + 1/a} = 29.382$ ,  $E = 15.014$  МэВ).

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Ф08Д-001).

---

[1] A. J. Silenko and O. V. Teryaev, Phys. Rev. D **76** (2007) 061101(R).

[2] D. Anastassopoulos *et al.* (EDM Collaboration), “AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the  $10^{-29}e \cdot \text{cm}$  level,” [http://www.bnl.gov/edm/deuteron\\_proposal\\_080423\\_final.pdf](http://www.bnl.gov/edm/deuteron_proposal_080423_final.pdf)

[3] Y. K. Semertzidis, AIP Conf. Proc. **1149** (2009) 48.

## О предстоящем переопределении килограмма

Г.М. Трунов

*Пермский государственный технический университет, Пермь, Россия*

В журнале "Metrologia" [1] были предложены к обсуждению следующие переопределения килограмма с использованием фиксированного значения постоянной Планка:

(кг-1a) Килограмм есть масса тела, эквивалентная энергии которого равна энергии такого числа фотонов, сумма частот которых равна точно  $[(299\ 792\ 458)^2/662\ 606\ 93] \times 10^{41}$  герц.

(кг-1b) Килограмм есть масса тела, для которого частота де Бройль-Комптона точно равна  $[299\ 792\ 458/(6.626\ 0693 \times 10^{-34})]$  герц.

На наш взгляд, новые определения килограмма очень сложны для восприятия и некорректны с физической точки зрения.

В частности, сами авторы [1] в комментарии к определению (кг-1b), отметили, что частота де Бройля-Комптона для тела массы 1 кг является "скорее нефизическим свойством" и "нереально большой частотой ( $\nu_{КОМ,1kg} \approx 1.36 \times 10^{50}$  Гц)".

В соответствии с уравнением  $E = mc^2$  определение (кг-1a) можно было бы записать следующим образом:

"Килограмм есть масса тела, эквивалентная энергии которого равна  $(299\ 792\ 458)^2$  джоулей".

Но такое определение противоречит одному из основных правил построения систем единиц: *"Не допускается формулировка определения основных величин через производные величины"*.

Поэтому авторам [1] пришлось дополнительно использовать еще и уравнение  $E = h\nu$ . Поэтому в определении (кг-1a) появилась фраза:

"...эквивалентная энергия которого равна энергии такого числа фотонов, сумма частот которых равна точно  $[(299\ 792\ 458)^2/662\ 606\ 93] \times 10^{41}$  герц". Эта фраза некорректна с физической точки зрения, т.к. частота фотона есть его индивидуальная интенсивная характеристика (т.е. не подчиняющаяся закону аддитивности), и поэтому нет смысла складывать частоты этих колебаний!

Предложено вернуться к переопределению килограмма с использованием фиксированного значения постоянной Авогадро.

---

[1] I. M. Mills *et al.*, Metrologia **43** (2006) 227.

[2] Г.М. Трунов, Метрология **7** (2007) 3.



## О предстоящем переопределении ампера

Г.М. Трунов<sup>а</sup>, А.Г. Трунов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Пермский государственный технический университет, Пермь, Россия

<sup>б</sup> Университет, Карлсруе, Германия

В работе показано, что предложенное новое определение ампера [1] : "Ампер есть сила электрического тока в направлении потока, содержащего точно  $1/(1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19})$  элементарных зарядов в секунду" является некорректным.

Анализ [2] нового определения ампера показал, что оно основано на уравнении:  $I = (N_e e)/t$  (1), где  $e$  - элементарный заряд;  $N_e = 1/(1.602\ 176\ 53 \times 10^{-19})$  - число элементарных зарядов. Следовательно, единица силы тока [I], ампер, определяется через единицу электрического заряда [e]:  $1A = [e]/(1c)$  (2).

Таким образом, при определении единицы силы электрического тока [I] из уравнения (2) была одновременно определена и единица электрического заряда:  $[e] = (1A) \cdot (1c) = (1A \cdot c) = 1$  Кл (кулон).

Это противоречат основному правилу построения систем единиц: "Из одного уравнения связи между величинами должна определяться только одна единица физической величины и ее размерность".

Предложено вернуться к рассмотрению возможности замены четвертой основной единицы СИ ампера на кулон с размерностью  $dim Q = Q$ . С учетом дискретности электрического заряда:  $Q = N e$  (3), где  $N = 1, 2, 3, \dots$ , единица электрического заряда определяется следующим образом: "Кулон - электрический точечный заряд, равный точному числу  $1/(1.602\ 176\ 53 \times 10^{-19})$  элементарных зарядов".

Такая замена позволит восстановить естественный порядок определения электрических величин (сначала определятся электрический заряд  $Q$ , затем сила электрического тока  $I = Q/t$ ). Необходимо использовать этот исторический шанс, позволяющий "исправить" СИ в области электромагнетизма!

Кроме того, особо отметим, что замена ампера на кулон не вызовет "глобальной реструктуризации СИ", а приведет только к изменению размерностей электромагнитных величин, в которых символ "I" будет заменен символами "QT-1".

Замена ампера на кулон сделает СИ более гармоничной системой единиц, т.к. в этом случае СИ будет основываться на системе величин  $LMTQ$ , в которой основные величины длина  $L$  и время  $T$  отражают фундаментальные свойства пространства-времени, а масса  $M$  и электрический заряд  $Q$  определяют, соответственно, фундаментальные гравитационное и электрическое взаимодействия.

---

[1] I. M. Mills *et al.*, *Metrologia* **43** (2006) 227.

[2] G. M. Trunov, A. G. Trunov, 14 *Congres international de metrologie: actes des conferences / Collège Français de Métrologie*. - Paris, 2009.

## **О возможном определении единицы массы и фиксации значений фундаментальных физических констант**

В.В. Хрущев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *ВНИИМС, Москва*

Обсуждаются способы повышения точности значений постоянных Планка и Авогадро в экспериментах с ватт-весами и с шарами из кристаллического кремния, что необходимо для перехода к новым определениям килограмма и моля. Рассмотрены преимущества и недостатки фиксации ряда фундаментальных физических констант при введении определений единиц СИ, в частности, при введении нового определения единицы массы на основе фиксированного значения постоянной Авогадро.

# Адронные вклады в сверхтонкое расщепление основного состояния в мюонии

В. А. Шелюто<sup>a</sup>, С. Г. Каршенбойм<sup>a,b</sup>, С. И. Эйдельман<sup>c</sup>

<sup>a</sup> ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева, 190005, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 85748 Garching, Germany

<sup>c</sup> Институт ядерной физики им. Г.И.Буджера СО РАН, 630090, Новосибирск

Мюоний является одной из немногих чисто лептонных систем, доступных для прецизионных экспериментов. Характер вычислений в случае связанных состояний качественно отличается от расчетов для свободных частиц и многие эффективные методы, могущие найти применение для сильновзаимодействующих частиц, проверяются на лептонных атомах.

Исследование сверхтонкого расщепления основного состояния в мюонии позволяет провести одну из наиболее точных проверок применения квантовой электродинамики к проблеме связанных состояний.

Однако, и в случае лептонных атомных систем адронные эффекты неизбежно возникают в суммах по всем виртуальным промежуточным состояниям и их учет ограничивает возможности проверки вычислений.

Учитывая ожидаемое появление новых интенсивным источников мюонов, которые в свою очередь могут привести к более точным измерениям в мюонии, мы рассматриваем адронные вклады в его сверхтонкое расщепление.

Настоящая работа является продолжением работ [1–4]. Мы систематически вычисляем все вклады следующего порядка малости, которые происходят от жесткого двухфотонного обмена, доминирующего в силу логарифмических усилений. При этом используются методы расчетов, развитые для учета вкладов мюонной поляризации вакуума в СТР в мюонии [5].

Мы также уточняем ведущий вклад (на основе новых экспериментальных данных, используемых для насыщения дисперсионной весовой функции адронной поляризации вакуума), применяя методы вычислений, апробированные ранее в расчетах адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона [6].

- 
- [1] A. Czarnecki, S. I. Eidelman and S. G. Karshenboim, Phys. Rev. D**65** (2002).
  - [2] S.G. Karshenboim and V. A. Shelyuto, Phys. Lett. **517B**, 32 (2001).
  - [3] S.I. Eidelman, S.G. Karshenboim and V.A. Shelyuto, Can. J. Phys. **80**, 1297 (2002).
  - [4] S.G. Karshenboim, V.A. Shelyuto and A.I. Vainshtein, Phys. Rev. D**78**, 065036 (2008).
  - [5] M.I. Eides and V.A. Shelyuto, Phys. Rev. Lett. **103**, 133003 (2009).
  - [6] S. Eidelman, Acta Phys. Polon. B **38**, 3499 (2007).