

Фундаментальные физические константы

С. Г. Каршенбойм

Институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ)

Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching)

MAX-PLANCK-INSTITUTE
OF QUANTUM OPTICS
GARCHING



Фундаментальные физические константы

С. Г. Каршенбойм

Институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ)

Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching)



MAX-PLANCK-INSTITUTE
OF QUANTUM OPTICS
GARCHING





Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – **не прост**. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.



Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – не прост. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.

- Основные принципы и определения должны быть предельно **просты** и **понятны** школьникам и людям, далеким от физики и метрологии.



Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – не прост. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.

- Основные принципы и определения должны быть предельно **просты** и **понятны** школьникам и людям, далеким от физики и метрологии. В то же время, эти принципы и определения и их реализация в виде эталонов должны использовать **новейшие** достижения науки.



Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – не прост. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.

- Основные принципы и определения должны быть предельно просты и понятны школьникам и людям, далеким от физики и метрологии. В то же время, эти принципы и определения и их реализация в виде эталонов должны использовать новейшие достижения науки.
- Единицы как бы **не меняются** на протяжении многих лет,



Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – не прост. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.

- Основные принципы и определения должны быть предельно просты и понятны школьникам и людям, далеким от физики и метрологии. В то же время, эти принципы и определения и их реализация в виде эталонов должны использовать новейшие достижения науки.
- Единицы как бы **не меняются** на протяжении многих лет, однако, это не более, чем **иллюзия**, поскольку их определения менялись и причем существенно. Единицы только выглядят неизменно.



Величины, единицы и эталоны

Мир физических величин, их единиц и эталонов этих единиц – **не прост**. Он полон противоречий из-за противоречивых задач.

- Основные принципы и определения должны быть предельно просты и понятны школьникам и людям, далеким от физики и метрологии. Их реализации – это самые современные достижения науки.
- Единицы как бы не менялись, однако, это не так. В процессе определения единиц только выгла

На протяжении истории метрической системы метр бы определен

- как некая определенная часть меридиана
 - при помощи специальной линейки
 - в терминах горячей линии излучения
- в терминах скорости света и частоты перехода в ультрахолодном атоме цезия.

При этом метр как бы не менялся.



Определения единиц и фундаментальные константы

Определения единиц часто оказываются не тем, чем кажутся.

Например, определения метра и ампера скорее определяют константы c и μ_0 ,

а уже эти константы определяют в свою очередь метр и ампер через различные уравнения, **не** входящие в определения СИ.

Это не одно и то же.

Определения метра и ампера не знают ничего об уравнениях Максвелла.



Введение

- Физика – это прежде всего **экспериментальная** наука и измерения – ее основа. Перед тем, как провести измерения, необходимо договориться о некоторых **единицах**.



Введение

- Физика – это прежде всего **экспериментальная** наука и измерения – ее основа. Перед тем, как провести измерения, необходимо договориться о некоторых **единицах**.
- Наш путь познания природы имеет **количественную** форму и приобретает вид определенных общих **законов**.



Введение

- Физика – это прежде всего **экспериментальная** наука и измерения – ее основа. Перед тем, как провести измерения, необходимо договориться о некоторых **единицах**.
- Наш путь познания природы имеет **количественную** форму и приобретает вид определенных общих **законов**.
- Эти законы сами по себе не могут дать **численных предсказаний**. Для этого мы используем значения определенных **параметров**, входящих в их выражения.



Введение

- Физика – это прежде всего **экспериментальная** наука и измерения – ее основа. Перед тем, как провести измерения, необходимо договориться о некоторых **единицах**.
- Наш путь познания природы имеет **количественную** форму и приобретает вид определенных общих **законов**.
- Эти законы сами по себе не могут дать численных **предсказаний**. Для этого мы используем значения определенных **параметров**, входящих в их выражения.
- Некоторые параметры входят в законы из самых **разных** областей физики и они являются **фундаментальными физическими константами (ФФК)**. **ФФК представляют собой механизм для количественного приложения основных законов к описанию природы.**



Фундаментальные константы и физические явления

Первые универсальные параметры появились века назад.
G и **g** входили в большое количество разных задач.



Фундаментальные константы и физические явления

Первые универсальные параметры появились века назад.

G и g входили в большое количество разных задач.

G – все еще фундаментальная константа,



Фундаментальные константы и физические явления

Первые универсальные параметры появились века назад.
 G и g входили в большое количество разных задач.
 G – все еще фундаментальная константа, g – уже нет.



Фундаментальные константы и физические явления

Первые универсальные параметры появились века назад.
 G и g входили в большое количество разных задач.
 G – все еще фундаментальная константа, g – уже нет.

Универсальность:

- *Теоретическая точка зрения:* фундаментальные константы – G , h , c



Фундаментальные константы и физические явления

Первые универсальные параметры появились века назад.
 G и g входили в большое количество разных задач.
 G – все еще фундаментальная константа, g – уже нет.

Универсальность:

- *Теоретическая точка зрения:* фундаментальные константы – G , h , c
- *Практическая точка зрения:* константы, необходимые для различных типов измерений (магнетон Бора, СТР в цезии ...)



Размерные и безразмерные величины

Считается, что размерные и безразмерные величины устроены по-разному. Это не вполне так. Поскольку несколько размерных констант имеют фиксированные значения:

- СТР в цезии, скорость света встроены в СИ
- Атомная единица массы, заряд электрона или магнетон Бора – аналогичные константа вне СИ.

Критический момент – единицы.

- Если единицы не указаны (например, мы говорим о частоте вообще) – размерность - вещь объективная.
- Когда единицы (например, Гц) указаны – размерные и безразмерные величины могут нести одинаковую нагрузку.

Например, нет никакой разницы в приведении частоты перехода в герцах и безразмерного отношения этой частоты к СТР в цезии: одна и та же информация и одна и та же погрешность.



"Плавающая размерность"

- Постоянная Авогадро:

$$N_A = 6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

- Масса прототипа килограмма в МБМВ в Париже:

$$M = 10^3 \times 6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23} \text{ а.е.м.}$$

- Масса атома углерода-12:

$$m = 12 / (6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23}) \text{ г.}$$

- Их отношение масс:

$$M/m = 10^3 / 12 \times 6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23}.$$

- Число атомов углерода-12 на единицу массы:

$$n = 1/12 \times 6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23} \text{ ат/г.}$$

Размерность "плавает" поскольку две размерных величины (масса прототипа $M = 1 \text{ kg}$ и масса атома углерода-12 $m = 12 \text{ u}$) встроены в единицы.

Фундаментальные константы и их численные значения

Необходимо ясно различать между фундаментальными константами и их численными значениями.

- **Постоянная Ридберга** определена через e , h , m_e , ε_0 and c .
Она не имеет никакого отношения к СТР в цезии и магнитному моменту ядра цезия-133.
- **Численное значение** постоянной Ридберга в атомных единицах имеет отношение к цезию и к СИ, а не к более фундаментальным константам

$$2 \{Ry\} = 9\,192\,631\,770 / \{Cs\ HFS\}_{At.un.}$$

Последствия наиболее отчетливо видны, если мы ищем изменение ФФК со временем.

Рабочая группа CODATA по фундаментальным константам



Существует с 1969 г.

Members:

Dr. Franco Cabiati ITALY

Dr. Kenichi Fujii JAPAN

Dr. Savely G. Karshenboim **RUSSIA**

Prof. Ingvar Lindgren SWEDEN

Prof. Werner Martienssen GERMANY

Prof. Boris A. Mamyrin **RUSSIA**

Dr. Peter Mohr USA

Dr. David Newell USA

Dr. Francois Nez FRANCE

Dr. Brian W. Petley GB

Dr. Terry J. Quinn BIPM

Dr. Barry N. Taylor USA

Dr. Wolfgang Wöger GERMANY

Dr. Barry M. Wood CANADA

Prof. Zhang Zhonghua CHINA

- E. R. Cohen and B. N. Taylor: 1973, 1986 (Adjustment).
- P. J. Mohr and B. N. Taylor, 1998, 2002 (Recommended values).
- **D. B. Newell, P. J. Mohr and B. N. Taylor, 2006 (Recommended values).**
- На русском языке: см. С. Г. Каршенбойм: УФН, 2005.

Структура Согласования



Согласование решает две задачи:

- ✓ проверить согласованность ВВОДНЫХ ДАННЫХ
- ✓ найти самосогласованный набор значений ФФК

Структура Согласования



Вначале было измерение.

Структура Согласования



Вначале было измерение.

Обычно измеряется не совсем то, что нужно.

Результат нужно обработать.

Структура Согласования



В результате мы имеем много данных, которые нужно выразить через некоторое число параметров (ФФК).

Структура Согласования



В результате мы имеем много данных, которые нужно выразить через некоторое число параметров (ФФК).

Эти данные нужно совокупно обрабатывать.

Структура Согласования



- Вспомогательные данные = Самые точные данные
- Данные, связанные с α
- Данные, связанные с h
- Линии (\rightarrow) – это уравнения согласования
- Некоторые данные не измеряются, а вычисляются
- Имеются независимые величины



Скорость света в вакууме c

Скорость света в вакууме явилась первой размерной фундаментальной константой, численное значение которой было фиксировано по соглашению (1983) как

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с (точно)}.$$

Результат КОДАТА (1973) был $c = 299\,792\,458.0(12) \text{ м/с}$.



Скорость света в вакууме c

Скорость света в вакууме явилась первой размерной фундаментальной константой, численное значение которой было фиксировано по соглашению (1983) как

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с (точно)}.$$

Результат КОДАТА (1973) был $c = 299\,792\,458.0(12) \text{ м/с}$.

- Означает ли такое определение c , что погрешность "исчезла"?

Нет! Теперь погрешность перешла в реализацию метра СИ.



Скорость света в вакууме c

Скорость света в вакууме явилась первой размерной фундаментальной константой, численное значение которой было фиксировано по соглашению (1983) как

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s (точно)}.$$

Результат КОДАТА (1973) был $c = 299\,792\,458.0(12) \text{ m/s}$.

- Означает ли такое определение c , что погрешность "исчезла"?

Нет! Теперь погрешность перешла в реализацию метра СИ.

- Означает ли такое определение c , что если c меняется, то это нельзя обнаружить?

Нет! На примере изменения скорости света в среде мы знаем, что есть различные качественные эффекты, связанные с ее градиентами и **не зависящие от выбора единиц измерений**.




Постоянная Ридберга R_∞

Постоянная Ридберга важна по ряду причин. Это – важнейшая константа атомной физики.

В то же время – это наиболее точно измеренная ФФК.

Прогресс составил 4 порядка за 30 лет.



1973	10 973 731.77(83)	m^{-1}	$[7.5 \times 10^{-8}]$
1986	10 973 731.534(13)	m^{-1}	$[1.2 \times 10^{-9}]$
1998	10 973 731.568 549(83)	m^{-1}	$[7.6 \times 10^{-12}]$
2002	10 973 731.568 525(73)	m^{-1}	$[6.6 \times 10^{-12}]$
2006	10 973 731.568 527(73)	m^{-1}	$[6.6 \times 10^{-12}]$

Отношение масс электрона и протона

Масса протона определена относительно точно в атомных единицах

$$m_p(2002) = 1.007\,276\,466\,88(13) \text{ а.е.м.} \quad [1.3 \times 10^{-10}],$$

электрон – гораздо легче и измерение его массы в тех же единицах – труднее.

Прогресс составил более трех порядков за 30 лет.



1973	1 836.152 52(72)	$[3.8 \times 10^{-7}]$
1986	1 836.152 701(37)	$[2.0 \times 10^{-8}]$
1998	1 836.152 667 5(39)	$[2.1 \times 10^{-9}]$
2002	1 836.152 672 61(85)	$[4.6 \times 10^{-10}]$
2006	1 836.152 672 47(80)	$[4.3 \times 10^{-10}]$

Постоянная тонкой структуры α и все-все-все

Некоторые величины известны очень точно (лучше, чем с погрешностью 10^{-9}):

- Постоянная Ридберга $Ry = \alpha^2 m_e c / 2h$;
- Отношение масс электрона и протона m_p / m_e ;
- Масса протона и других атомов и ядер в атомных единицах массы.

Поэтому ряд менее точных результатов скоррелирован:

$$\delta\alpha/\alpha \approx 1/2 \delta(h/m)/(h/m) \approx 1/2 \delta(hN_A)/hN_A$$

и формирует специальный блок данных.

Обратная величина постоянной тонкой структуры: α^{-1}

Эта константа играет ключевую роль в высокоточных проверках квантовой электродинамики и в воспроизведении ома.

Погрешность была уменьшена приблизительно в 200 раз за 30 лет.



1973	137.036 04(11)	$[8.2 \times 10^{-7}]$
1986	137.035 989 5(61)	$[4.5 \times 10^{-8}]$
1998	137.035 999 76(50)	$[3.7 \times 10^{-9}]$
2002	137.035 999 11(46)	$[3.3 \times 10^{-9}]$
2006	137.035 999 68(9)	$[6.8 \times 10^{-10}]$

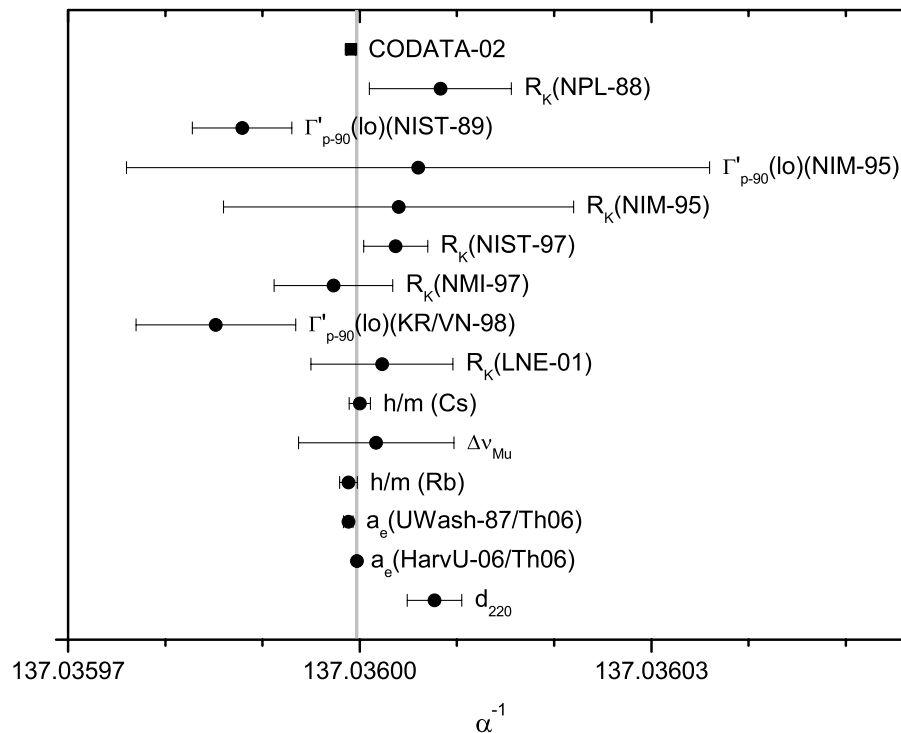


Как можно измерять α ?

- КЭД
 - $(g-2)_e$ – лучше всех!
- КЭД в СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИИ
 - СТР в мюонии & m_μ/m_e
 - Тонкая структура в He
- Атомная физика
 - h/m (Cs & Rb) & m_e/m_p – **второй лучший!**
- Авогадро и т.д.
 - h/m (n) & Si
- Электрические эталоны
 - Гиромангнитное отношение в слабом поле протона и гелиона
$$\gamma_p/K_J R_K \sim \mu_p/\mu_B \times h/m_e \times \alpha$$
 - $\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$
 - $K_J = 2e/h$
 - $R_K = h/e^2$
- Расчетный конденсатор: прямое измерение R_K

Постоянная тонкой структуры α^{-1}

Вертикальная
полоса -
CODATA
2006.



Молярная постоянная Планка hN_A

Константа – переводный множитель между измерением массы в единицах частоты (mc^2/h) и в атомных единицах массы ($m \times \{N_A\}$).

Прогресс – улучшение точности в 1000 за 30 лет.

1973	$3.990\ 313\ 0(64) \times 10^{-10} \text{ Js mol}^{-1}$	$[1.6 \times 10^{-6}]$
1986	$3.990\ 313\ 23(36) \times 10^{-10} \text{ Js mol}^{-1}$	$[8.9 \times 10^{-8}]$
1998	$3.990\ 312\ 689(30) \times 10^{-10} \text{ Js mol}^{-1}$	$[7.6 \times 10^{-9}]$
2002	$3.990\ 312\ 716(27) \times 10^{-10} \text{ Js mol}^{-1}$	$[6.7 \times 10^{-9}]$
2006	$3.990\ 312\ 682(6) \times 10^{-10} \text{ Js mol}^{-1}$	$[1.4 \times 10^{-9}]$





Второй блок данных: h - e - N_A

Две комбинации констант

- $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$
- hN_A

известны с погрешностью на уровне 10^{-9} , тогда как их составляющие известны хуже.

Это означает новую корреляцию

$$\delta e/e \approx 1/2 \delta h/h \approx 1/2 \delta N_A/N_A$$

и формирует еще один блок данных.



Постоянная Планка h

Прогресс в определении h , e и N_A –
приблизительно одинаков.

Прогресс – достаточно медленен, т.к. приходится
иметь дело **классическими макроскопическими**
объектами.

1973	6.626 176(36) $\times 10^{-34}$	Js	[5.4 $\times 10^{-6}$]
1986	6.626 075 5(40) $\times 10^{-34}$	Js	[6.0 $\times 10^{-7}$]
1998	6.626 068 76(52) $\times 10^{-34}$	Js	[7.8 $\times 10^{-8}$]
2002	6.626 069 3(11) $\times 10^{-34}$	Js	[1.7 $\times 10^{-7}$]
2006	6.626 068 96(33) $\times 10^{-34}$	Js	[5.0 $\times 10^{-8}$]





Как можно измерять h - e - N_A ?

- Вольт-весы:
измерение

$$K_J = 2e/h$$

- Ватт-весы:
измерение

$$K_J^2 \times R_K = 4/h \text{ — лучше}$$

всего

$$(R_K = h/e^2 = 2\alpha/\mu_0 c)$$

- Гирромагнитное
отношение в сильном
поле:

$$\gamma_p \times K_J \times R_K \sim$$

$$\mu_p/\mu_B \times h/m_e \times h$$

- Постоянная Авогадро

$$N_A = (hN_A)/h$$

- Постоянная Фарадея

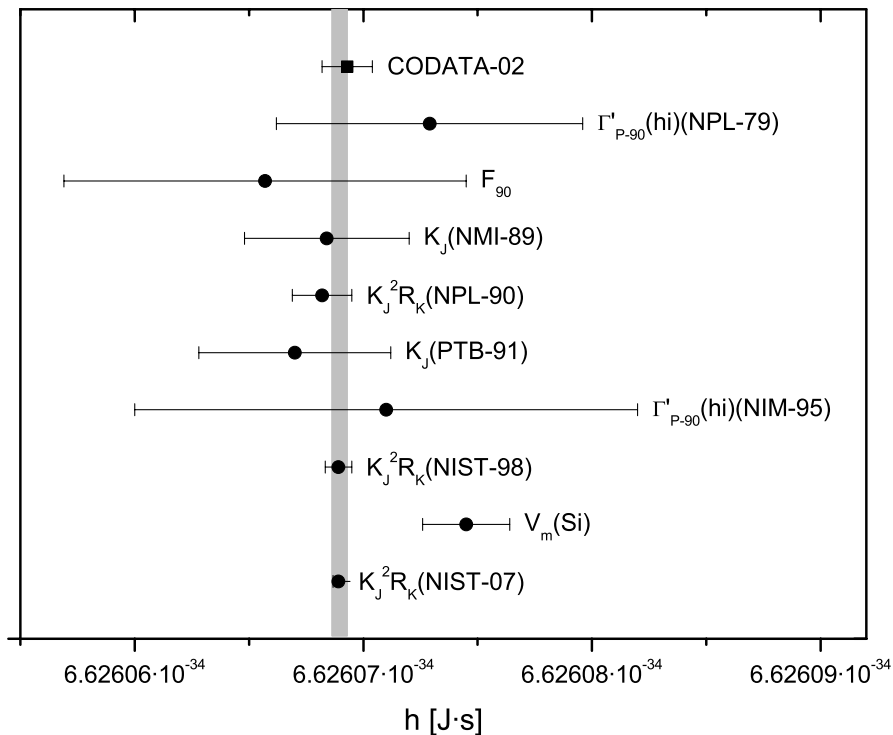
$$F = e N_A$$

на деле измеряется:

$$F \times K_J \times R_K \sim N_A$$

Постоянная Планка h

Вертикальная
полоса –
CODATA 2006.




Доминируют
ватт-весы,
которые не
согласуются с
 N_A .



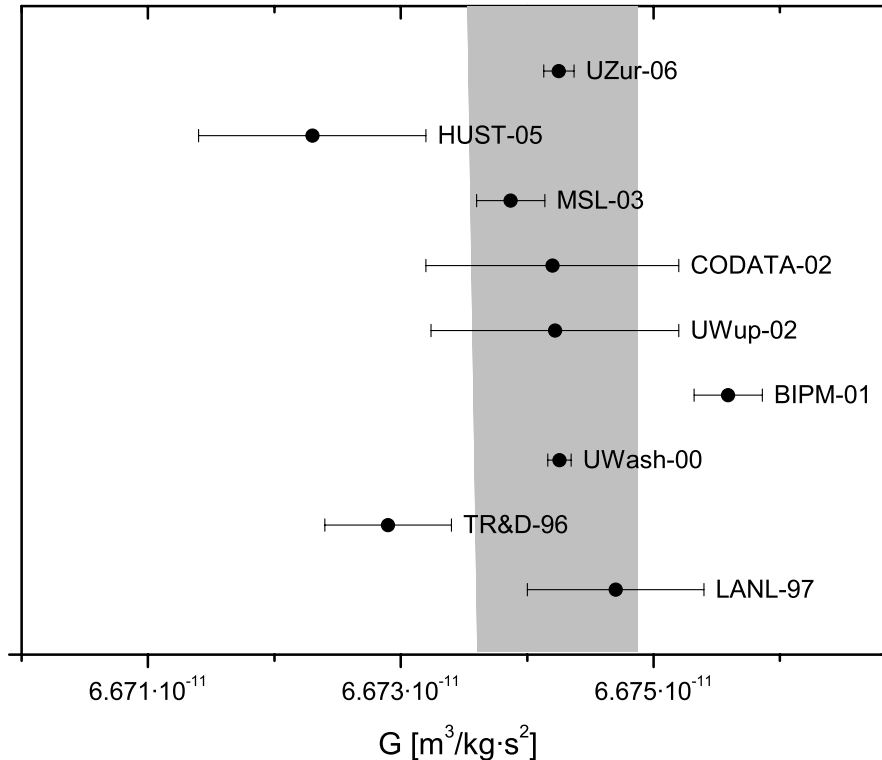
Гравитационная постоянная

G дает яркий пример того, как трудно работать с классическими макроскопическими объектами. Незначительный прогресс (если говорить о заявленной точности).



1973	$6.672\ 0(41)\times 10^{-11}$	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$	$[6.2\times 10^{-4}]$
1986	$6.672\ 59(85)\times 10^{-11}$	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$	$[1.3\times 10^{-4}]$
1998	$6.673(10)\times 10^{-11}$	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$	$[1.5\times 10^{-3}]$
2002	$6.674\ 2(10)\times 10^{-11}$	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$	$[1.5\times 10^{-4}]$
2006	$6.674\ 3(7)\times 10^{-11}$	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$	$[1.0\times 10^{-4}]$

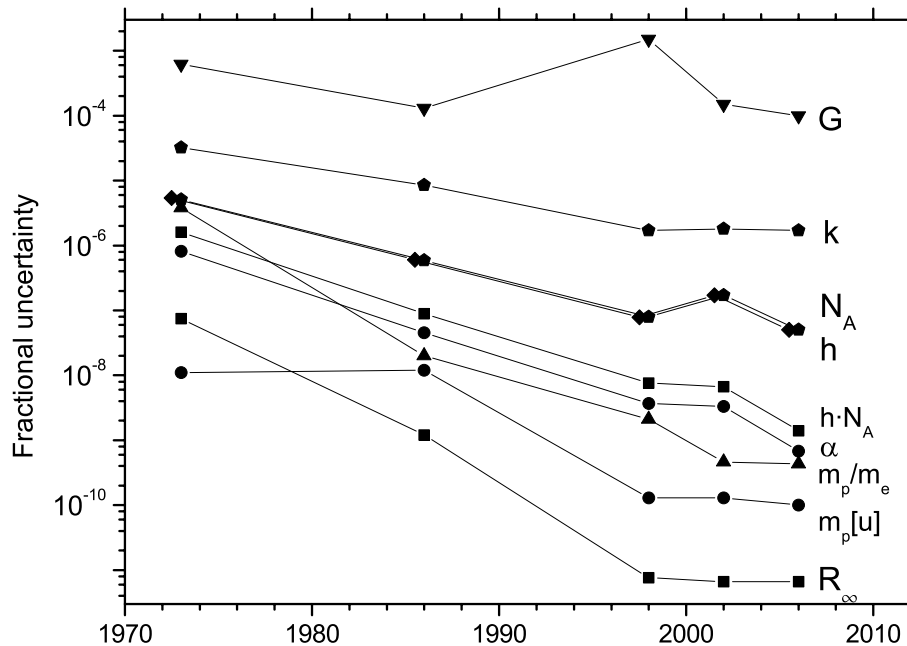
Гравитационная постоянная G : недавний прогресс



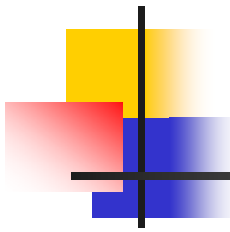
Вертикальная
полоса –
CODATA
2006.

Разброс
превышает
погрешности.

Прогресс в определении значений ФФК



Прогресс за все время существования рабочей группы КОДАТА. Замечательные результаты с некоторыми константами (R_∞ , m_e/m_p) и умеренные успехи с остальными.



Согласование – это не просто МНК ?

- Вводные данные сильно скоррелированы.
- Вводные данные различаются по типу.
- Теория глубоко вовлечена. Компиляция просто исходных экспериментальных данных (ср. Particle data group) не имеет смысла.
- Некоторые эксперименты используют эталоны. В этом случае эксперимент – лишь вершина айсберга. Имеется много метрологической работы по эталонам, и по ее итогам результат основного эксперимента может измениться.
- Согласование – это не составление компиляции данных и их совместная обработка по МНК, а прежде всего – работа с данными и переоценка их погрешности.

Фундаментальные константы & КЭД: уровни энергии

Водород & дейтерий: грубая & тонкая структура & лэмб. сдвиг	$\alpha(Z\alpha)^5Ry, \alpha^2(Z\alpha)^4Ry$	Ry
Ион гелия-4: грубая структура & лэмб. сдвиг	$\alpha(Z\alpha)^5Ry, \alpha^2(Z\alpha)^4Ry$	Ry
Мюоний: СТР	$(Z\alpha)^5(m/M)^2Ry, \alpha(Z\alpha)^4(m/M)^2Ry,$ $\alpha(Z\alpha)^5(m/M)Ry$	$\alpha, m_\mu/m_e$
Гелий: тонкая структура	Старшие пор. e-e взаимодействия	α
Мюонный водород: лэмбовский сдвиг	Старшие порядки в поправках на структуру ядра	$R_p \rightarrow Ry$
Спектр позитрония	α^5Ry	КЭД для μ HFS
Ион гелия-3: СТР в 2s (водород & дейтерий)	$(Z\alpha)^5(m/M)^2Ry, \alpha(Z\alpha)^4(m/M)^2Ry,$ $\alpha(Z\alpha)^5(m/M)Ry, \alpha^2(Z\alpha)^4(m/M)Ry$	КЭД для μ HFS & лэмб. сдвиг
Мюоний: 1s – 2s		m_μ/m_e

Фундаментальные константы & КЭД: магнитные моменты

Аномальный магнитный момент электрона	α^4 (& α^5 ?!)	α
Аномальный магнитный момент мюона	Адронные вклады	a_μ
СТР в водороде @ магн. поле	Кинематические поправки	μ_p/μ_e
СТР в дейтерии @ магн. поле	Кинематические поправки	μ_d/μ_e
Водородо-подобные C & O @ магн. поле	Двухпетлевые поправки старших порядков	m_p/m_e
СТР в мюонии @ магн. поле	Кинематические поправки	μ_μ/μ_p
HD @ магн. поле	Изотопические эффекты в экранировании	μ_d/μ_p



Единицы

Физика основывается на измерении, а любое измерение – это сравнение.

Однако, имеется существенное различие между **относительными** и **абсолютными** измерениями:

- **Относительные** измерения – мы выбираем, что сравнивать и с чем – и выбираем так, чтобы иметь какие-то преимущества.
- **Абсолютные** измерения – мы сравниваем измеряемую величину с какой-то независимо от наших желаний установленной величиной.

Иными словами, мы имеем дело с некоторыми единицами.



ФФК и эталоны

Единство измерений –
мы хотим, что бы
результаты
измерений одинаково
понимались во всем
мире.



ФФК и эталоны

Единство измерений –
мы хотим, что бы
результаты
измерений одинаково
понимались во всем
мире.

Измерение – это:

- некоторое численное значение,



ФФК и эталоны

Единство измерений –
мы хотим, что бы
результаты
измерений одинаково
понимались во всем
мире.

Измерение – это:

- некоторое численное значение,
- **погрешность,**



ФФК и эталоны

Единство измерений –
мы хотим, что бы
результаты
измерений одинаково
понимались во всем
мире.

Измерение – это:

- некоторое численное значение,
- погрешность,
- **единица.**



ФФК и эталоны

Единство измерений – мы хотим, чтобы результаты измерений одинаково понимались во всем мире.

Измерение – это:

- некоторое численное значение,
- погрешность,
- единица.

Для введения единиц их необходимо **поддерживать**, т.е. обеспечить некоторую воспроизводимую единицу. Можно поддерживать *лабораторные* единицы.



ФФК и эталоны

Единство измерений – мы хотим, чтобы результаты измерений одинаково понимались во всем мире.

Измерение – это:

- некоторое численное значение,
- погрешность,
- единица.

Для введения единиц их необходимо поддерживать, т.е. обеспечить некоторую воспроизводимую единицу. Можно поддерживать лабораторные единицы.

Поддержание подобной единицы решает проблему единства измерений **локально**.



ФФК и эталоны

Когда проблема решена
локально в пространстве и
времени, одна из задач –
ее **глобализация**: мы
ХОТИМ,



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы ХОТИМ,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы хотим,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;
- чтобы результаты, полученные в разное время, также были согласованы.



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы хотим,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;
- чтобы результаты, полученные в разное время, также были согласованы.

В прежние времена эта проблема решалась *физическим* **сличением** единиц.



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы хотим,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;
- чтобы результаты, полученные в разное время, также были согласованы.

В прежние времена эта проблема решалась физическим сличением единиц.

Эталоны, основанные на естественных константах, – универсальны изначально.



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы хотим,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;
- чтобы результаты, полученные в разное время, также были согласованы.

В прежние времена эта проблема решалась физическим сличением единиц.

Эталоны, основанные на естественных константах, – универсальны изначально.

По той же причине **результаты не будут меняться со временем.**



ФФК и эталоны

Когда проблема решена локально в пространстве и времени, одна из задач – ее глобализация: мы хотим,

- чтобы единицы в разных лабораториях были согласованы;
- чтобы результаты, полученные в разное время, также были согласованы.

В прежние времена эта проблема решалась физическим сличением единиц.

Эталоны, основанные на естественных константах, – универсальны изначально.

По той же причине результаты не будут меняться со временем.

Например, часы, построенные не на цезии, будут давать согласованные результаты в разных лабораториях и в разное время.



ФФК и эталоны

Следующий шаг –

воспроизведение, т.е.

калибровка

поддерживаемой единицы
в единицах СИ.



ФФК и эталоны

Следующий шаг –
воспроизведение, т.е.
калибровка
поддерживаемой единицы
в единицах СИ.

Традиционно – это была
непростая процедура.



ФФК и эталоны

Следующий шаг –
воспроизведение, т.е.
калибровка
поддерживаемой единицы
в единицах СИ.

Традиционно – это была
непростая процедура.

Для эталона, основанного на
ФФК, - достаточно
определить значение этой
ФФК любым способом.



ФФК и эталоны

Следующий шаг –
воспроизведение, т.е.
калибровка
поддерживаемой единицы
в единицах СИ.

Традиционно – это была
непростая процедура.

Для эталона, основанного на
ФФК, - достаточно
определить значение этой
ФФК любым способом.

Проблема стабильности меры
– имеет место и в случае
воспроизведения. Очень
трудно понять меняется ли
килограмм физически.



ФФК и эталоны

Следующий шаг –
воспроизведение, т.е.
калибровка
поддерживаемой единицы
в единицах СИ.

Традиционно – это была
непростая процедура.

Для эталона, основанного на
ФФК, - достаточно
определить значение этой
ФФК любым способом.

Проблема стабильности меры
– имеет место и в случае
воспроизведения. Очень
трудно понять меняется ли
килограмм физически.

**Законы природы
чувствительны к
изменению массы, а не ее
численного значения и
этот вопрос – имеет смысл.**



ФФК и эталоны

Следующий шаг –
воспроизведение, т.е.
калибровка
поддерживаемой единицы
в единицах СИ.

Традиционно – это была
непростая процедура.

Для эталона, основанного на
ФФК, - достаточно
определить значение этой
ФФК любым способом.

Проблема стабильности меры
– имеет место и в случае
воспроизведения. Очень
трудно понять меняется ли
килограмм физически.

Законы природы
чувствительны к
изменению массы, а не ее
численного значения и
этот вопрос – имеет смысл.

**Для эталонов, основанных на
естественных константах,
этот вопрос не стоит.**



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность
поддержания;



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность
поддержания;
- **стабильность**
единицы;



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность
поддержания;
- стабильность
единицы;
- демократичность
поддержания;



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность поддержания;
- стабильность единицы;
- демократичность поддержания;
- **концептуальная простота перехода к воспроизведению.**



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность поддержания;
- стабильность единицы;
- демократичность поддержания;
- концептуальная простота перехода к воспроизведению.

Еще:

- **многообразие методов**
 - определения ФФК,
 - реализации единицы;



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность поддержания;
- стабильность единицы;
- демократичность поддержания;
- концептуальная простота перехода к воспроизведению.

Еще:

- многообразие методов
 - определения ФФК,
 - реализации единицы;
- **возможность поиска систематических эффектов;**



ФФК и эталоны

Преимущества:

- универсальность поддержания;
- стабильность единицы;
- демократичность поддержания;
- концептуальная простота перехода к воспроизведению.

Еще:

- многообразие методов
 - определения ФФК,
 - реализации единицы;
- возможность поиска систематических эффектов;
- **отсутствие концептуальных ограничений.**



ФФК и эталоны

Демократичность:

- нет необходимости в прямых физических сличениях;
- нет необходимости обращаться к искусственной мере, доступ к которой ограничен;
- можно выбирать метод;
- можно независимо воспроизвести единицу с низкой точностью.



ФФК и эталоны

Демократичность:

- нет необходимости в прямых физических сличениях;
- нет необходимости обращаться к искусственной мере, доступ к которой ограничен;
- можно выбирать метод;
- можно независимо воспроизвести единицу с низкой точностью.

Квантовые характеристики лучше классических:

- все квантовые объекты одного типа тождественны: (электроны и песчинки);
- квантовые характеристики слабо подвержены внешним воздействиям: (уровни энергии - тройная точка воды и ее чистота – масса протопипа);
- некоторые – универсальны и сводятся к ФФК.



Физика в целом – как Большое приближение

Любая физическая теория – это всегда некоторое приближение.



Физика в целом – как Большое приближение

Любая физическая теория – это всегда некоторое приближение.

ФФК – наша возможность проверить как основные законы, так и основные приближения.



Физика в целом – как Большое приближение

Любая физическая теория – это всегда некоторое приближение.

ФФК – наша возможность проверить как основные законы, так и основные приближения.

Успех в совместной обработке данных из самых разных областей физики подтверждает, что мы в целом разумно понимаем природу.



Физика в целом – как Большое приближение

Любая физическая теория – это всегда некоторое приближение.

ФФК – наша возможность проверить как основные законы, так и основные приближения.

Успех в совместной обработке данных из самых разных областей физики подтверждает, что мы в целом разумно понимаем природу.

Возможно, **Согласование ФФК, проводимое CODATA,**
- единственная систематическая попытка
проверить самосогласованность наших знаний.



Физика в целом – как Большое приближение

- Проблемы различных разногласий (до настоящего времени) относились к
- [химической] технологии;
 - Необходимости иметь дело с макроскопическими объектами;
 - Человеческий фактор.



Физика в целом – как **очень удачное** Большое приближение

Проблемы различных разногласий (до настоящего времени) относились к

- [химической] технологии;
- Необходимости иметь дело с макроскопическими объектами;
- Человеческий фактор.

Никаких свидетельств новой физики!



Физика в целом – как **очень удачное** Большое приближение

Проблемы различных разногласий (до настоящего времени) относились к

- Плохо для физиков,
-
- но хорошо для практиков!

Никаких свидетельств новой физики!