

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Новые рекомендованные значения фундаментальных физических постоянных (КОДАТА 2006)

С.Г. Каршенбойм

*Представлен краткий обзор современных данных по фундаментальным физическим постоянным и результатов их совместной обработки, а именно, новых рекомендованных значений фундаментальных постоянных [Mohr P J, Taylor B N, Newell D B "CODATA Recommended values of the fundamental physical constants: 2006" Rev. Mod. Phys. **80** 633 (2008)]. Следуя описанному ранее подходу (УФН **175** 271 (2005)), все данные разбиты на блоки. Поблочно же обсуждаются как достигнутые оригинальные экспериментальные и теоретические результаты, так и их следствия для новых рекомендованных значений постоянных. Проведено сравнение с предыдущими наборами рекомендованных значений постоянных (1998, 2002 гг.).*

PACS numbers: 01.30.Kj, 06.20.Jr

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200810c.1057

Содержание

1. Введение (1057).
2. В чем заключается согласование фундаментальных постоянных? (1057).
3. Структура данных и процедура согласования (1058).
4. Вспомогательные данные (1058).
5. Блок данных, связанных с постоянной тонкой структуры α (1059).
6. Постоянная Планка h и связанные с ней данные (1060).
7. Независимые постоянные (1061).
8. Заключение (1062).

Список литературы (1064).

1. Введение

Исследования в области фундаментальных физических постоянных (констант) играют важную роль в физике и метрологии, находя самые разнообразные приложения. Для широкой аудитории эти постоянные являются прежде всего универсальной составляющей справочных данных. Особо высокая точность при этом не слишком важна, однако существенно "единообразие", т.е. то, что разные исследователи применяют одни и те же значения. В других исследованиях точность значений играет существенную роль, что позволяет проверить современные высокоточные методы измерений и вычислений и использованные в них модели, а в некоторых случаях и

искать "новую физику". В более прагматичной области лежит практическая реализация наиболее точных методов измерений и вычислений в виде эталонов.

Ключевую роль для всех этих применений играет так называемое согласование (adjustment) значений фундаментальных физических постоянных, регулярно проводимое международной рабочей группой по фундаментальным физическим константам (КОДАТА)¹ [1–5]. На русском языке эти работы в том или ином виде нашли отражение в публикациях [6–9]. Недавно этот вопрос также рассматривался в статье [10] в связи с рекомендациями от 2002 г. [4], и в данной работе обсуждаются результаты нового Согласования КОДАТА 2006 г. [5]. Здесь годы указывают не время публикации, а период, за который собирались данные. Рекомендации 2002/2006 гг. основаны на данных, опубликованных до 31 декабря 2002/2006 гг. Таким образом, ниже обсуждаются лишь данные, использовавшиеся в последнем Согласовании и приведшие к появлению нового набора рекомендованных значений (2006 г.) [5], тогда как более поздние данные, полученные в 2007 и 2008 гг., в данной статье не рассматриваются.

2. В чем заключается согласование фундаментальных постоянных?

Кратко напомним, в чем состоит суть Согласования и почему оно необходимо. Согласование значений фундаментальных постоянных представляет собой совместную обработку данных разных измерений и расчетов, однако обработку весьма специфическую. Обычно обрабатываются однородные массивы данных, например, разные значения некоторой частоты f как функции

С.Г. Каршенбойм. ГНЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева",
Московский просп. 19, 190005 Санкт-Петербург,
Российская Федерация
E-mail: s.g.karshenboim@vniim.ru
Max-Planck-Institut für Quantenoptik,
Hans-Kopfermann str. 1, 85748 Garching, Germany

Статья поступила 12 мая 2008 г.

¹ The Task Group on fundamental physical constants of the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) of the International Council for Science (ICSU).

мощности лазера P . Для того, чтобы найти невозмущенное значение частоты, необходимо проэкстраполировать $f(P)$ к нулевой мощности. Многие точки искомой зависимости измерены одинаковыми методами и имеют приблизительно одинаковую погрешность, более или менее понятные корреляции разных систематических эффектов и т.д.

При согласовании значений фундаментальных постоянных ситуация качественно иная. Данные здесь получаются абсолютно разными методами и, более того, методами, заимствованными из разных областей физики. Допустим, нам удалось измерить такие величины как e^2/h , h , e/h , eN_A , hN_A и e . Понятно, что все они могут быть выражены через три независимые величины, например, e , h и N_A . При этом между полученными данными имеются нетривиальные корреляции, связанные, например, с тем, что при измерении совсем разных величин использовались в некоторых случаях одни и те же эталоны. Необходимо проверить согласованность полученных результатов, используемых как исходные параметры в дальнейших расчетах, и методов их получения, а также и согласованность использованных эталонов.

Полученные результаты также необходимо согласовать. Так, хотя все перечисленные выше комбинации величин и могут быть выражены через три физические постоянные e , h и N_A , однако это не означает, что, зная лишь значения этих постоянных, можно вычислить их любую комбинацию, например, e^2/h . Легко можно найти только центральную величину, но не ее погрешность. Для определения последней необходимо знать корреляции между постоянными. В частности, комбинация e^2/h известна гораздо более точно, чем e и h по отдельности. Поэтому результат согласования представляет собой не минимальный набор независимых постоянных, а широкий набор различных, как бы избыточных, комбинаций, погрешности определения которых найдены с учетом корреляций между рекомендованными значениями фундаментальных постоянных из минимального независимого набора.

Таким образом, процедура согласования включает в себя проверку согласованности всех данных на входе системы обработки данных, а на ее выходе дает большой самосогласованный набор значений. Первая часть реализуется при подробном обсуждении вводных данных, а вторая — в таблицах значений. Обе эти части чрезвычайно важны.

Еще одной существенной особенностью согласования является использование теории. Напомним, что часто за разными данными стоят исследования из разных областей физики, и потому теоретическое обоснование экспериментальной "точки" может существенно различаться от точки к точке. Конечно, и "обычная" экстраполяция также требует теоретических обоснований, однако крайне ограниченных, часто решаемых модельно или феноменологически, например, введением дополнительных членов с неизвестными коэффициентами в экстраполяционные формулы. Для сравнения результатов из разных областей физики необходима фундаментальная теория.

3. Структура данных и процедура согласования

Наличие совершенно разных данных не может не породить определенную структуру, которая определяется

весьма практически — точностью данных, связанных с той или иной постоянной. Условно все используемые данные можно разбить по классам точности (подробнее см. [10, 11]).

- Прежде всего имеются данные, которые по точности значительно превосходят все остальные (или более точно — данные, погрешности определения которых пренебрежимо малы при вычислении других постоянных; в частности, наряду с высокоточными значениями отношений масс частиц и постоянной Ридберга, сюда входит и константа электрослабых взаимодействий, которая известна не слишком точно, но дает вклад только в малые поправки и поэтому ни на что практически не влияет). Эти данные называются вспомогательными. Их можно найти до основной процедуры согласования.

- Следующими по точности являются данные, формирующие два блока. Один из них (с более точными данными) относится к постоянной тонкой структуры α , а другой связан с постоянной Планка h и элементарным зарядом e . Работа с этими двумя блоками и является согласованием в узком смысле слова. Именно здесь появляются разнородные измерения, используются эталоны и т.д. Вначале обрабатываются данные из первого блока, а затем из второго.

- Имеется группа данных для величин, которые формально можно связать разными отношениями со вспомогательными постоянными или постоянными из двух упомянутых выше блоков. Однако точность их прямого измерения крайне низка. Примером может служить масса электрона в килограммах. Такие данные в согласовании не участвуют, а соответствующие величины вычисляются после завершения основной процедуры. Ниже мы не выделяем эти постоянные отдельно, а приводим их значения в тех блоках, результаты которых используются для их получения.

- Разумеется, всегда имеются некоторые физические постоянные, такие как гравитационная постоянная G или постоянная Больцмана k , которые определяются в эксперименте совершенно независимо от измерений остальных величин. В собственно согласовании они не участвуют, а их значения в таблицах рекомендованных значений постоянных вычисляются отдельно от основной процедуры.

Отметим, что формального разделения на основную процедуру и обработку остальных данных на самом деле не существует. Обрабатываются сразу все данные, однако их статистические веса устроены так, что обработка фактически проводится поблочно. Результаты обработки блока с более точными данными накладывают связи на менее точные данные, а блоки с менее точными данными никак не влияют на обработку более точных данных. Обработка данных, где разделение на классы и блоки проводится в самом алгоритме вычислений, будет лишь незначительно отличаться от обработки всех данных сразу. При этом, независимо от выбора алгоритма минимизации ошибок, анализ вводных данных проводится всегда поблочно.

4. Вспомогательные данные

Блок вспомогательных постоянных формируется теми из них, значения которых известны точно (по определению) и теми, которые измеряются с высокой точностью,

Таблица 1. Вспомогательные физические постоянные (ср. табл. 3–5 в обзоре [10]). Точно известные значения приведены в верхней части таблицы; остальные вспомогательные постоянные — в нижней; u_r — стандартная относительная погрешность

Величина	Обозначение	Значение	u_r
скорость света в вакууме	c	299 792 458 м с ⁻¹	(точно)
магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Н А ⁻²	(точно)
электрическая постоянная $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8,854 187 817 \dots \times 10^{-12}$ Ф м ⁻¹	(точно)
масса атома ¹² С	$m(^{12}\text{C})$	12 а.е.м.	(точно)
постоянная Ридберга	R_∞	10 973 731,568 527(73) м ⁻¹	$6,6 \times 10^{-12}$
отношение масс протона и электрона	m_p/m_e	1836,152 672 47(80)	$4,3 \times 10^{-10}$
масса протона	m_p	1,007 276 466 77(10) а.е.м.	$1,0 \times 10^{-10}$
масса электрона	m_e	$5,485 799 094 3(23) \times 10^{-4}$ а.е.м.	$4,2 \times 10^{-10}$

как постоянная Ридберга

$$R_\infty = \frac{\alpha^2 m_e c}{2h} \quad (1)$$

или различные отношения масс частиц. К вспомогательным постоянным также относятся те величины, которые нужны только для учета малых теоретических поправок к различным величинам, как правило вычисляемым в рамках квантовой электродинамики. Соответствующие результаты собраны в табл. 1².

В целом, в последнем Согласовании [5] в секторе вспомогательных физических постоянных были произведены лишь незначительные изменения по сравнению с более ранним Согласованием [4].

5. Блок данных, связанных с постоянной тонкой структуры α

Блок, связанный с постоянной тонкой структуры, включает набор разнообразных данных. Этот блок формируется на базе следующих соотношений:

- Постоянная Ридберга (1) известна с точностью, значительно превышающей точность в α -блоке. Это устанавливает прямую связь между измерениями α и h/m_e (и комptonовской длины волны электрона).

- Отношение масс электрона и протона также известно с чрезвычайно высокой точностью (см. табл. 1) и поэтому в отношении h/m_e можно заменить массу электрона на массу протона.

- Масса протона хорошо известна в атомных единицах массы (см. табл. 1), как и ряд масс других атомов и ядер, поэтому имеется связь между измерениями α и h/m для широкого класса объектов.

- Электрическая постоянная вакуума ϵ_0 известна в системе СИ точно, что связывает постоянную тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}, \quad (2)$$

² Здесь и далее мы приводим в качестве примера значения лишь нескольких постоянных того или иного типа. Полный набор рекомендованных значений доступен на сайте американского Национального института стандартов и техники (НИСТ) в Гейтерсбурге, шт. Мэриленд по адресу: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.

с постоянной фон Клитцинга

$$R_K = \frac{h}{e^2}. \quad (3)$$

Последняя фигурирует в различных измерениях, где участвуют те или иные эталоны электрических величин.

Ситуация с определением постоянной тонкой структуры разными методами проиллюстрирована на рис. 1. Представлено четырнадцать разных частных значений, полученных шестью принципиально разными способами. Два из них используют электрические эталоны, а один требует исследований свойств вещества с метрологической точностью. Три остальных способа не требуют никаких метрологических исследований или эталонов и опираются на квантовую механику и квантовую электродинамику, а также на "обычные" измерения³. Отметим также, что значительная часть точек на рис. 1 определяется на самом деле не одним измерением, а цепочкой измерений принципиально разных величин, комбинация которых необходима для нахождения α .

В последние годы согласованное значение α практически полностью определяется вкладом данных, полученных при исследовании аномального магнитного момента электрона. Однако ситуация здесь существенно улучшается. В 1998 г. подобное значение существенно превосходило по точности все остальные. В 2002 г. к нему приблизилось (по точности) значение, полученное методом рамановской спектроскопии атома цезия. В обоих согласованиях величина $\alpha(a_e)$ определялась только одним измерением, а теория развивалась лишь одной группой⁴.

В Согласовании 2006 г. теория, как и прежде, определяется работами Т. Киношита с соавторами, в которых им удалось повысить точность расчетов с $u_r = 9,9 \times 10^{-10}$ в 2002 г. до $u_r = 2,4 \times 10^{-10}$ [12] в 2006 г. Также появился

³ При этом измеряется частота в абсолютных или относительных единицах, однако само измерение проводится с точностью существенно ниже эталонной, т.е. не с метрологической точностью. Поэтому проблемы, связанные с воспроизведением единицы, характерные для эталонов, не имеют в этих измерениях никакого значения. В этом и только в этом смысле измерения не связаны с эталонами.

⁴ Мы приводим ссылки только на некоторые недавние работы. Остальные ссылки можно найти в соответствующих работах по Согласованию 1998 [3], 2002 [4] и 2006 гг. [5]. Количество ссылок в каждой из этих работ составляет несколько сотен и мы не думаем, что было бы целесообразно приводить их здесь.

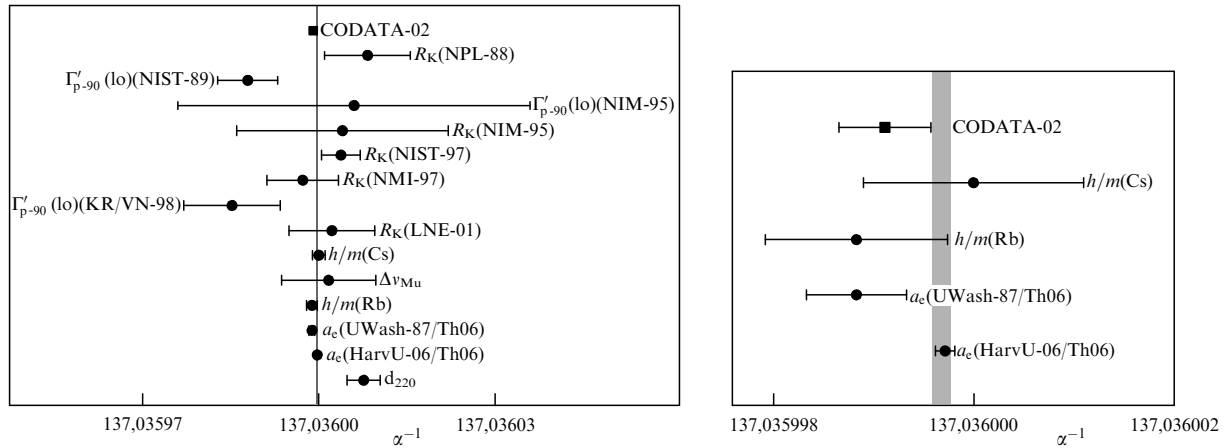


Рис. 1. Прецизионное определение постоянной тонкой структуры α (по данным Соглашения 2006 г. [5]). Обозначения соответствуют работе [5], где можно найти необходимые ссылки. Вертикальная полоса отвечает значению, рекомендованному исходя из результатов Соглашения данных. Наиболее точные данные (полученные из исследований аномального магнитного момента электрона и методами рамановской спектроскопии) приведены справа в увеличенном масштабе.

новый экспериментальный результат по аномальному моменту электрона [13], а метод рамановской спектроскопии (в значительно измененной версии) был успешно применен и к атомам рубидия [14].

Признавая прогресс в уточнении величины $\alpha(a_c)$ и в получении независимых подтверждений этого наиболее точного значения α , следует подчеркнуть, тем не менее, что значительный разрыв в точности между лучшим значением и его независимыми подтверждениями сохраняется, что до некоторой степени ставит под вопрос надежность рекомендованного результата.

Значения основных постоянных, связанных с постоянной тонкой структуры, собраны в табл. 2. Молярная постоянная Планка hN_A играет важную роль при формировании другого блока данных, связанного с h , поэтому кратко поясним ее появление в этой таблице. Имеется несколько микроскопических единиц, в которых массы частиц и атомов измеряются с высокой точностью. В частности, это относится к единицам частоты (т.е. измеряется не m , а mc^2/h) и к атомным единицам массы. Переводный множитель между ними и определяется величиной hN_A . В этом можно убедиться следующим образом. Соотношение

$$\frac{mc^2}{h} = \frac{1}{(hN_A)} \frac{m}{m(^{12}\text{C})/12} c^2 [N_A m(^{12}\text{C})/12] \quad (4)$$

связывает массу (атома), измеренную в единицах частоты, в левой части равенства с молярной постоянной Планка и числовым значением массы атома в атомных единицах массы (это первые два множителя в

правой части). Два последних множителя в правой части равенства известны в системе СИ точно и, в частности, $m(^{12}\text{C}/12) N_A = 1 \text{ г моль}^{-1}$.

Как мы уже пояснили выше, измерение массы в единицах частоты (что по точности совпадает с измерением отношения h/m) тесно связано с определением α .

6. Постоянная Планка h и связанные с ней данные

Как и в предыдущем случае, этот блок данных формируется соотношениями между значениями вовлеченных постоянных, которые известны с большей точностью, чем сами постоянные. В блок входят такие физические постоянные, как постоянная Планка h , заряд электрона (или элементарный заряд) e , постоянная Джозефсона $K_J = 2e/h$, постоянные Авогадро N_A и Фарадея $F = eN_A$, а также различные комбинации величин, включающие заряд и массу электрона и другие постоянные и, в частности, отношение e/m_e , магнетон Бора μ_B и ядерный магнетон μ_N в единицах СИ. Часть из них измеряется непосредственно, часть — в комбинациях со вспомогательными и более точно известными постоянными из α -блока.

Взаимосвязь в определении указанных постоянных определяется тем, что постоянная тонкой структуры α , молярная постоянная Планка hN_A и комптоновская длина волны электрона λ_C (см. табл. 1) известны с более высокой точностью, чем характерная точность в h -блоке, данные для которого приведены на рис. 2, а результаты для постоянных [5] представлены в табл. 3.

Таблица 2. Значения постоянных, связанных с α [5] (ср. табл. 6 в обзоре [10]); u_r — стандартная относительная погрешность

Величина	Обозначение	Значение	u_r
обратная величина постоянной тонкой структуры	α^{-1}	137,035 999 68(9)	$6,8 \times 10^{-10}$
молярная постоянная Планка	hN_A	$3,990 312 6821(57) \times 10^{-10}$ Дж с моль $^{-1}$	$1,4 \times 10^{-9}$
квант циркуляции	$h/2m_e$	$3,636 947 5199(50) \times 10^{-4}$ м 2 с $^{-1}$	$1,4 \times 10^{-9}$
комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = h/(m_e c)$	$2,426 310 2175(33) \times 10^{-12}$ м	$1,4 \times 10^{-9}$
постоянная фон Клитцинга	$R_K = h/e^2$	25 812,807 557(18) Ом	$6,8 \times 10^{-10}$

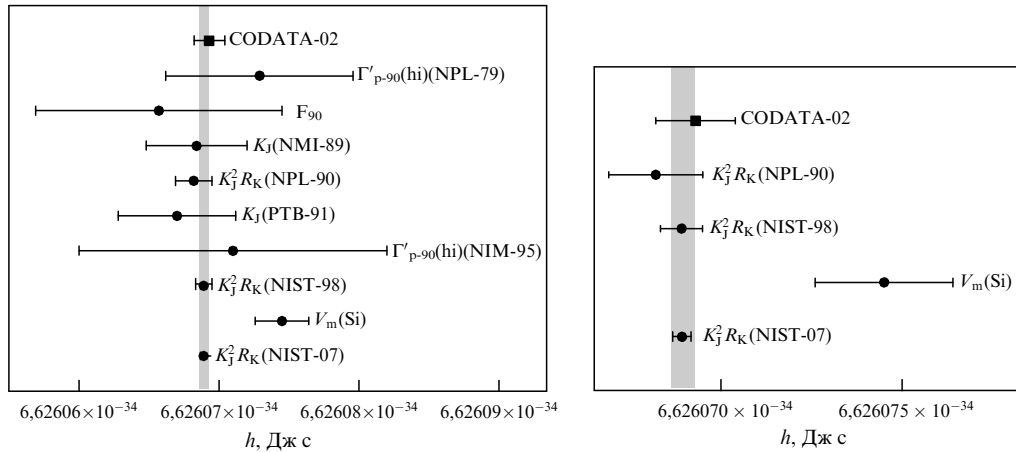


Рис. 2. Определение постоянной Планка h в Соглашении 2006 г. [5]. Обозначения следуют работе [5]; вертикальная полоса отвечает рекомендованному значению постоянной. Наиболее точные результаты, полученные при помощи ватт-весов и проекта по определению постоянной Авогадро из кристаллических данных [$V_m(\text{Si})$], представлены справа в увеличенном масштабе.

Таблица 3. Значения постоянных из h -блока [5] (ср. табл. 7 в обзоре [10]); u_r — стандартная относительная погрешность

Величина	Обозначение	Значение	u_r
постоянная Планка	h	$6,626\,068\,96(33) \times 10^{-34}$ Дж с	$5,0 \times 10^{-8}$
элементарный заряд	e	$1,602\,176\,487(40) \times 10^{-19}$ Кл	$2,5 \times 10^{-8}$
постоянная Авогадро	N_A	$6,022\,141\,79(30) \times 10^{23}$ моль $^{-1}$	$5,0 \times 10^{-8}$
постоянная Фарадея	$F = eN_A$	$96\,485,3399(24)$ Кл моль $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$
отношение заряда электрона к его массе	$-e/m_e$	$-1,758\,820\,150(44) \times 10^{11}$ Кл кг $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$
гиромагнитное отношение электрона	$\gamma_e = 2\mu_e/\hbar$	$1,760\,859\,770(44) \times 10^{11}$ с $^{-1}$ Тл $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$
масса электрона	m_e	$9,109\,382\,15(45) \times 10^{-31}$ кг $0,510\,998\,910(13)$ МэВ/ c^2	$5,0 \times 10^{-8}$ $2,5 \times 10^{-8}$
масса протона	m_p	$1,672\,621\,637(83) \times 10^{-27}$ кг $938,272\,013(23)$ МэВ/ c^2	$5,0 \times 10^{-8}$ $2,5 \times 10^{-8}$
магнетон Бора	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	$927,400\,915(23) \times 10^{26}$ Дж Тл $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$
ядерный магнетон	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050\,783\,24(13) \times 10^{-27}$ Дж Тл $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$
постоянная Джозефсона	$K_J = 2e/h$	$483\,597,891(12) \times 10^9$ Гц В $^{-1}$	$2,5 \times 10^{-8}$

Девять экспериментальных точек, представленных на рис. 2, найдены пятью принципиально различными методами. Доминирующими являются результаты, полученные на ватт-весах. Главное изменение по сравнению с 2002 г. состоит в появлении нового и более точного результата из НИСТ⁵ [15]. Результаты ватт-весов противоречат значению, основанному на создании и исследовании "идеального" кристалла кремния для определения постоянной Авогадро. Среднее по всем остальным значениям по точности несколько уступает значению, полученному для кристалла кремния, и находится в прекрасном согласии с данными от ватт-весов.

Разногласия в этом блоке данных имеют долгую историю и, говоря коротко, сводятся к тому, что этот блок всегда связан со сложными макроскопическими установками и химическими технологиями, что делает соответствующие эксперименты гораздо менее прозрачными по сравнению со многими экспериментами, свя-

занными с определением α . В 1998 г. заявленная точность определения постоянной Планка была выше, чем в 2002 г., поскольку в тот момент международная коллаборация, занимавшаяся измерениями постоянной Авогадро, временно отказалась от представления какого-либо результата и проводила разного рода проверки. В 2002 г. она настояла на своем результате, и погрешность рекомендованного значения была несколько расширена и определялась не точностью имевшихся частных значений, а их разбросом. В 2006 г. также была применена расширенная погрешность из-за разногласия в данных, но статистический вес кремниевой величины упал.

Эта проблема еще требует своего разрешения, для чего необходимы новые независимые эксперименты, которые сейчас проводятся в разных странах.

7. Независимые постоянные

Имеется некоторое количество физических постоянных, которые либо совсем не оказывают влияния на обработку других данных, либо это влияние пренебрежимо

⁵ The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA.

Таблица 4. Рекомендованные значения независимых постоянных [5] (ср. табл. 8 в обзоре [10]); u_r — стандартная относительная погрешность

Величина	Обозначение	Значение	u_r
гравитационная постоянная	G	$6,674\,28(67) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} \text{ кг}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-4}$
постоянная Больцмана	k	$1,380\,6504(24) \times 10^{-23} \text{ Дж К}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$
универсальная газовая постоянная	$R = kN_A$	$8,314\,472(15) \text{ Дж К}^{-1} \text{ моль}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$

мало. Наиболее важные из таких постоянных собраны в табл. 4.

Положение с фундаментальными физическими постоянными k и G , входящими в табл. 4, крайне разнится. Постоянная Больцмана k , как и универсальная газовая постоянная R , была измерена с указанной в таблице точностью достаточно давно, и на протяжении почти двух десятилетий никакого улучшения не наблюдалось. Оригинальные результаты, использованные при Соглашении 2006 г., представлены на рис. 3. Единственная разница с предыдущими Соглашениями (1998 и 2002 гг.), заключается в появлении недавних, и не слишком точных, результатов из НИСТ и ПТБ⁶, которые важны не сами по себе, а скорее как указание на возможный прогресс в ближайшем будущем.

Что касается постоянной тяготения G , то здесь главным препятствием является разброс данных. Хотя G и является одной из наиболее фундаментальных величин современной физики, ее точное значение не играет никакой важной роли, и поэтому все эксперименты лежат далеко в стороне от проблем фундаментальной физики.

В самом деле, фундаментальность этой постоянной заключается в том, что она, вместе с постоянной Планка h и скоростью света c , определяет характерный планковский масштаб, но это всего лишь масштаб и точные значения постоянных для этого не нужны. Можно проверить с высокой точностью общую теорию относительности, что безусловно представляет существенный теоретический и практический интерес. Один из таких экспериментов — это проверка универсальности свободного падения. При этом даже ускорение свободного падения, в общем-то, знать не нужно — непосредственно

нужны, скорее, его градиенты. Можно также изучать движение Луны вокруг Земли или планет вокруг Солнца (напомним, что именно такого типа наблюдение за положением перигелия Меркурия и послужило одним из практических оснований для общей теории относительности). Но для соответствующих расчетов понадобятся произведение G и некой "большой массы" (массы Солнца или одной из планет) и отношения масс Солнца и планет. Понятно, что указанные произведения и отношения известны гораздо лучше, чем G .

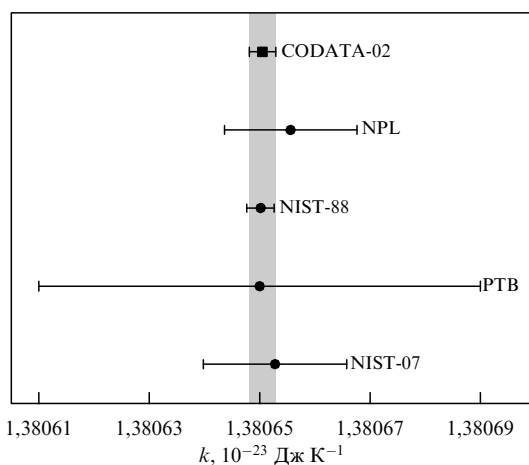
Измерения G проводятся в специально предназначенных для этого экспериментах, где, с одной стороны, фигурируют классические макроскопические объекты, а с другой — необходимо точно измерять достаточно малые эффекты. Такие эксперименты всегда сложны и имеют многочисленные систематические погрешности.

Разброс данных на рис. 4, где представлены частные результаты по измерению G , показывает, что с этими эффектами справиться трудно. На рисунке представлены результаты четырех последних согласований (рекомендованное значение 1986 г. [2] представлено в виде точки на левом графике). Основное изменение ситуации здесь заключается в следующем. Результат 1986 г. обладал относительно высокой точностью, но в 1998 г. погрешность была увеличена из-за серьезного противоречия между теми данными, на которых была основана рекомендация 1986 г., и значением, полученным в ПТБ. В 2002 г., после тщательного анализа [4], было решено исключить значение ПТБ из обработки данных и погрешность снова уменьшилась. Как и прежде, сейчас она определяется разбросом данных и существенно превышает погрешности некоторых частных значений. Разница между обработками данных в 2002 и 2006 гг. заключается скорее не в получении абсолютно новых результатов, а в завершении анализа данных, предварительные результаты по которым были опубликованы к концу 2002 г.

По всей видимости, оценка погрешности в работе [5] все-таки несколько консервативна, однако этот факт не отражается на качественном характере проблемы. Невозможность надежно оценить все систематические погрешности, к сожалению, приводит к значительному разбросу данных и противоречиям в результатах, оставаясь главной проблемой в измерении гравитационной постоянной G .

8. Заключение

Завершая краткий обзор собранных новых данных и новых результатов Соглашения 2006 г., сравним их с более ранними. Динамика в повышении (заявленной) точности представлена на рис. 5 за весь период работы Международной рабочей группы КОДАТА по фундаментальным физическим константам, а значения наиболее важных физических постоянных по результатам трех последних Соглашений [3–5] приведены в табл. 5.

**Рис. 3.** Определение постоянной Больцмана k в Соглашении 2006 г. [5]. Вертикальная полоса отвечает рекомендованной величине.

⁶ Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany.

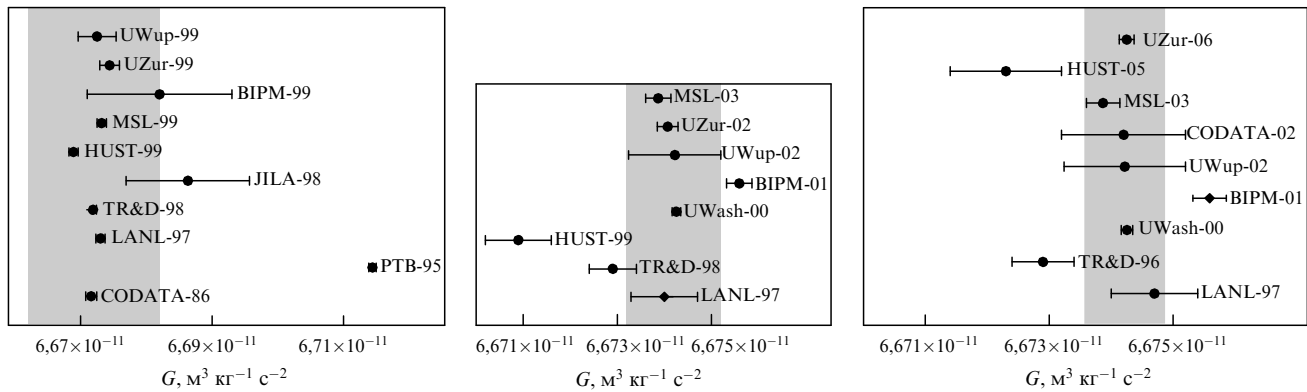


Рис. 4. Измерения гравитационной постоянной G , включенные в Соглашения 1998 г. [3] (слева), 2002 г. [4] (в центре) и 2006 г. [5] (справа). Вертикальные полосы отвечают рекомендованным значениям из соответствующих Соглашений.

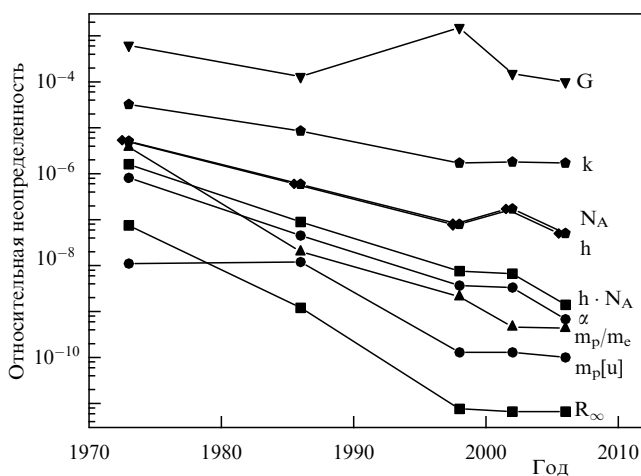


Рис. 5. Неопределенность в определении значений фундаментальных физических постоянных в Соглашениях КОДАТА [1–5].

Как видно из рисунка, в некоторых случаях точность падает, а не растет. Это связано или с появлением новых и противоречащих существующим результатов, или с обнаружением систематических погрешностей, не учтен-

ных ранее. Сдвиг некоторых значений постоянных от Соглашения к Соглашению также, в принципе, может существенно выходить за пределы погрешностей в их определении. С данными в табл. 5 такого, к счастью, не случилось. Подобные проблемы связаны прежде всего с тем, что получение результатов со все более высокой точностью часто приводит, с практической точки зрения, к вторжению в совершенно новую область, поскольку те эффекты, которые было принято не учитывать, в какой-то момент становятся важными. И вероятность ошибки существенно возрастает.

Собственно говоря, целью согласования значений постоянных и является, в первую очередь, выявление таких ситуаций путем установления противоречий в данных, относящихся к разным величинам. Таблицы рекомендованных значений фундаментальных постоянных, хотя и используются наиболее часто по сравнению с другими результатами работ по согласованию данных [1–5], не являются наиболее важным элементом этих статей. С научной точки зрения существенно более важным является анализ данных (см., например, обзоры [10, 11]). Главным результатом этого анализа служит то, что данные в целом согласуются друг с другом, означая тем самым адекватность нашего понимания природы.

Таблица 5. Прогресс в определении значений фундаментальных физических постоянных в Соглашениях 1998–2006 гг. [3–5]

Постоянная [ед. изм.]	Рекомендованное значение		
	1998 г. [3]	2002 г. [4]	2006 г. [5]
R_∞ [м ⁻¹]	10 973 731,568 549(83)	10 973 731,568 525(73)	10 973 731,568 527(73)
m_p [а.е.м.]	1,007 276 466 88(13)	1,007 276 466 88(13)	1,007 276 466 77(10)
m_p/m_e	1 836,152 667 5(39)	1 836,152 672 61(85)	1 836,152 672 47(80)
α^{-1}	137,035 999 76(50)	137,035 999 11(46)	137,035 999 68(9)
hN_A [Дж с моль ⁻¹]	$3,990 312 689(30) \times 10^{-10}$	$3,990 312 716(27) \times 10^{-10}$	$3,990 312 6821 (57) \times 10^{-10}$
h [Дж с]	$6,626 068 76(52) \times 10^{-34}$	$6,626 069 3(11) \times 10^{-34}$	$6,626 068 96(33) \times 10^{-34}$
N_A [моль ⁻¹]	$6,022 141 99(47) \times 10^{23}$	$6,022 141 5(10) \times 10^{23}$	$6,022 141 79(30) \times 10^{23}$
e [Кл]	$1,602 176 462(63) \times 10^{-19}$	$1,602 176 53(14) \times 10^{-19}$	$1,602 176 487(40) \times 10^{-19}$
k [Дж К ⁻¹]	$1,380 650 3(24) \times 10^{-23}$	$1,380 650 5(24) \times 10^{-23}$	$1,380 6504(24) \times 10^{-23}$
G [м ³ кг ⁻¹ с ⁻²]	$6,673(10) \times 10^{-11}$	$6,674 2(10) \times 10^{-11}$	$6,674 28(67) \times 10^{-11}$

Не стоит думать, что "понимание природы" относится именно к фундаментальным законам. Любая теория является, в известном смысле, лишь приближением к действительности, и не следует недооценивать роль приближений в фундаментальной физике. Часто в каждом отдельном случае мы более или менее понимаем, какое приближение использовано, но не всегда. Согласие же приближений в целом — вопрос нетривиальный, и все мы помним примеры из физики на рубеже двадцатого века. Было несколько вполне приемлемых теорий, успешно описывающих факты, однако в часть из них были заложены приближения, характер которых был в то время не понят. Противоречия между приближениями привели к противоречию между теориями. Было неясно, как совмещать успешную механику со столь же успешной электромагнитной теорией: во-первых, было непонятно, как быть с принципом относительности, ньютоновской механикой и, например, с описанием взаимодействия точечных зарядов, а во-вторых, оставалось непонятным, как атомы, созданные, по-видимому, электромагнитными силами, могут быть ими созданы, коль скоро электростатические силы не обеспечивают устойчивого равновесия, а любое ускоренное движение зарядов неминуемо приводит к излучению. Итогом явилось осознание того, что классическая ньютоновская механика представляет собой теорию, в которой полностью пренебрегают релятивистскими и квантовыми эффектами, и ее применение неадекватно как в случае электрических явлений, так и на расстояниях порядка атомных.

С прагматической точки зрения проблема заключалась в том, что правильную экспериментально подтвержденную теорию продолжали применять в области за пределами ее допустимой применимости. Такой риск всегда существует, когда область исследований расширяется на новые диапазоны энергий, температур и т.д., или когда существенно повышается точность измерений или вычислений. Поэтому согласование значений физических постоянных, которое использует высокоточные данные из разных областей физики, является крайне важным инструментом для проверки самосогласованности приближений.

Возвращаясь к результатам Согласования, можно отметить, что согласие данных в целом означает, что мы не только правильно понимаем основные законы природы, но и адекватно их используем, что относится к явно и неявно сформулированным приближениям, развитым эффективным методам, включая их практичес-

кую реализацию в виде высокоточных приборов и, в частности, эталонов. Последние являются основой метрологического обеспечения различных областей науки и техники.

Автор является членом Международной рабочей группы КОДАТА по фундаментальным физическим константам и Председателем аналогичной российской группы. Работа представляет собой обзор данных последнего согласования значений фундаментальных постоянных [5], проведенного Международной рабочей группой. В то время, как рекомендованные значения являются результатом работы всей группы, различные замечания и комментарии выражают точку зрения автора, и не обязательно совпадают с мнением Рабочей группы. Автор признателем коллегам по Международной и Российской группам за полезные обсуждения.

Работа была частично выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-02-13516-офи_ц).

Список литературы

1. Cohen E R, Taylor B N *J. Phys. Chem. Ref. Data* **2** 663 (1973)
2. Cohen E R, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **59** 1121 (1987)
3. Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **72** 351 (2000)
4. Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **77** 1 (2005)
5. Mohr P J, Taylor B N, Newell D B "CODATA Recommended values of the fundamental physical constants: 2006" *Rev. Mod. Phys.* **80** 633 (2008); arXiv:0801.0028; новые рекомендованные значения также доступны на сайте НИСТ по адресу <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>
6. "Рекомендуемые согласованные значения фундаментальных физических постоянных — 1973 г." *УФН* **115** 623 (1975); "Recommended consistent values of the fundamental physical constants, 1973", Report of CODATA Task Group on Fundamental Constants, August (1973); CODATA Bull. No. 11, December (1973)
7. Taylor B N, Parker W H, Langenberg D N *The Fundamental Constants and Quantum Electrodynamics* (New York: Academic Press, 1969) [Тейлор Б, Паркер В, Лангенберг Д *Фундаментальные константы и квантовая электродинамика* (М.: Атомиздат, 1972)]
8. *Квантовая метрология и фундаментальные константы*. Сборник статей (Пер. с англ. под ред. Р Н Фаустова, В П Шелеста) (М.: Мир, 1981)
9. Радциг А А (Пер. с англ.) *УФН* **173** 339 (2003)
10. Каршенбойм С Г *УФН* **175** 271 (2005) [Karshenboim S G *Phys. Usp.* **48** 255 (2005)]
11. Каршенбойм С Г *Письма в ЭЧАЯ* **5** 522 (2008) [Karshenboim S G *Phys. Part. Nucl. Lett.* **5** 310 (2008)]
12. Kinoshita T, Nio M *Phys. Rev. D* **73** 013003 (2006)
13. Odom B et al. *Phys. Rev. Lett.* **97** 030801 (2006)
14. Cladé P et al. *Phys. Rev. Lett.* **96** 033001 (2006)
15. Steiner R L et al. *Metrologia* **42** 431 (2005); *IEEE Trans. Instrum. Measurement* **56** 592 (2007)

New recommended values of the fundamental physical constants (CODATA 2006)

S.G. Karshenboim

The State Research Center of the Russian Federation "D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology"

Moskovskii prosp. 19, 190005 St.-Petersburg, Russian Federation

E-mail: s.g.karshenboim@vniim.ru

Max-Planck-Institut für Quantenoptik,

Hans-Kopfermann str. 1, 85748 Garching, Germany

The world data on the fundamental physical constants are briefly reviewed, as are the results of their combined analysis, the new recommended values of the fundamental physical constants [Mohr P J, Taylor B N, Newell D B "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006" *Rev. Mod. Phys.* **80** 633 (2008)]. Following an approach presented previously (*Usp. Fiz. Nauk* **176** 271 (2005) [*Phys. Usp.* **48** 255 (2005)]), the division of data into blocks is employed. The same block approach is used to discuss original theoretical and experimental results and what their implications are for the new recommended values of the constants. A comparison with the previous (1998 and 2002) sets of the recommended values of the constants is given.

PACS numbers: 01.30.Kj, 06.20.Jr

Bibliography — 15 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **178** (10) 1049–1056 (2008)

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200810c.1057

Received 12 May 2008

Physics – Uspekhi **51** (10) (2008)