

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ: ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕКОМЕНДОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ CODATA 2002 г.

С. Г. Каршенбойм

ГНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия

Институт им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Рекомендованные значения фундаментальных физических констант CODATA являются наиболее точными и наиболее надежными значениями констант, применяемыми в разных областях физики. Обсуждаются различные связанные с этими рекомендациями вопросы.

The CODATA recommended values of the fundamental physical constants are the most accurate and the most reliable constant values, applied over all branches of physics. Various questions related to the recommendations are considered.

PACS: 02.60.-X; 06.20.Jr

ВВЕДЕНИЕ

Несомненно, расчеты играют важную роль в физике, будь то теоретические расчеты из первых принципов или вспомогательные вычисления, необходимые для обработки эксперимента. Физика невычислима без вычислений. Вычисления строятся на двух основных элементах: формулах, представляющих физические законы, и различных размерных и безразмерных параметрах, численные значения которых определяют численные значения результатов и которые сами, в свою очередь, определяются экспериментально. Некоторая часть подобных параметров, таких как постоянная тонкой структуры α , постоянная Планка h , заряд электрона e , носят достаточно универсальный характер и называются *фундаментальными константами*.

Рекомендованные значения фундаментальных физических констант регулярно публикуются международной рабочей группой CODATA (Комитета по данным Международного союза науки ICSU) [1, 2] (см. также [3] и [4]). Будучи участником этой рабочей группы, а также работая в области прецизионных исследований, я неоднократно сталкивался с различными ошибками в использовании значений фундаментальных констант. Главная причина подобных ошибок заключается в известной небрежности и в непонимании того, чем, собственно, являются результаты различных компиляций и обработок, такие как рекомендованные значения констант.

Любая справочная таблица, будь то таблица фундаментальных констант или других многочисленных справочных данных, например, зарядовых радиусов ядер, предполагает

определенные исходные данные и определенные теоретические предположения и модели. Использование данных самих по себе, без учета того, как они были получены, приводит к несогласованностям и, в конечном итоге, к ошибкам. Забывая, что какие-то характеристики, найденные экспериментально, являются основой для вычисления определенной константы, вычисляют эту характеристику. Игнорируя, что результат получен при некотором предположении, применяют его в ситуации, когда предполагается что-нибудь совсем другое. Используют при вычислении несколько констант, упуская из виду, что они вычислялись согласованно и, следовательно, их погрешности скоррелированы.

Во избежание подобных недоразумений важно понимать происхождение различных значений и корреляции, возникающие при их вычислении. Фундаментальные константы, как правило, вычисляются без привлечения модельных предположений в обычном понимании этого слова. Однако всегда стоит вопрос о погрешностях в теоретических формулах и о применимости некоторых не вполне надежных результатов (например, частичных вычислений, оценок поправок старших порядков, для которых имеются противоречивые результаты, и т.д.). Более поздний анализ может показать, что некоторые поправки старших порядков следует исправить, а некоторые погрешности — пересмотреть.

Выработка рекомендованных значений — достаточно сложный процесс, однако все ее основные этапы описываются в публикациях рабочей группы [1,2], ключевым элементом которых является критический анализ данных. Эти публикации — крайне редкий (а возможно, и единственный) пример публикаций справочных данных, в которых подробно описаны все использованные экспериментальные данные и теоретические выражения и, что более важно, приводится их критический анализ.

Данная работа представляет собой краткий обзор процедуры выработки рекомендованных значений — так называемого согласования значений фундаментальных физических констант. Рассмотрена структура данных и их точность, упрощенная схема согласования, роль относительно менее точных данных, надежность рекомендованных значений и особенности их применения в физике атомного ядра и элементарных частиц.

ЧТО ТАКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ КОНСТАНТ?

Начнем с объяснения, что же такое согласование (adjustment) значений фундаментальных физических констант. Имеется сравнительно небольшое число действительно независимых фундаментальных констант, таких как скорость света c , магнитная константа вакуума μ_0 , постоянная Планка h , заряд электрона e , постоянная Авогадро N_A , масса электрона m_e и протона m_p и т.д.

В некотором смысле мы можем «измерять» не сами размерные константы, а только их численные значения. Численные значения размерных констант предполагают единицы измерений, и поэтому мы можем фиксировать некоторые численные значения (например, значения c и μ_0) по определению путем выбора подходящих единиц, после чего остальные значения являются объектом измерений. Как мы отметили, независимых констант сравнительно мало, но в эксперименте можно измерять их самые различные комбинации. Так можно измерять постоянную тонкой структуры α , постоянную Ридберга R_∞ , постоянную Джозефсона $K_J = 2e/h$, постоянную фон Клитцинга $R_K = h/e^2$, постоянную Фарадея $F = eN_A$, различные магнетоны, гиромангнитные отношения, массы частиц в единицах частоты и атомных единицах массы и т.д.

Таким образом, возникает обширный массив данных по разным комбинациям фундаментальных констант. Поскольку ничто не бывает ни абсолютно точным, ни абсолютно правильным, результаты не находятся в идеальном согласии и их необходимо «согласовать», т. е. выработать набор значений фундаментальных констант, обладающих высокой точностью и не противоречащих друг другу. Существенным метрологическим элементом этого массива данных (скрытым от читателей-физиков) является вовлечение эталонов нескольких единиц СИ (напомним: в частности, речь идет о численных значениях определенных размерных констант *в единицах СИ*). Поэтому необходимо согласовать не только полученные данные, но и использованные при их измерении эталоны.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ДАННЫХ СОГЛАСОВАНИЯ

Измерения разных величин имеют разную точность. Собственно, согласование необходимо в том случае, когда имеются измерения ряда взаимосвязанных величин с примерно одинаковой точностью. В противном случае менее точные измерения можно отбросить.

Все данные можно разбить на пять основных групп. Имеется два больших блока данных, требующих согласования. Один из них связан с постоянной тонкой структуры, а другой — с постоянной Планка. Остальные три типа данных играют разную роль при согласовании этих двух блоков. Примеры констант разного типа приведены в таблице.

Рекомендованные значения некоторых фундаментальных физических констант [1]. Указаны типы данных (точные, вспомогательные, независимые и т. д.) и их принадлежность к блокам, относящимся к постоянной тонкой структуры α или постоянной Планка h

Постоянная	Значение	u_r	Примечание
c	299 792 458 м/с	0	Точн.*
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м ²	0	Точн.*
R_∞	$10\,973\,731,568\,525(73)$ м ⁻¹	$[6,6 \cdot 10^{-12}]$	Вспомогат.*
m_p/m_e	1 836, 152 672 61(85)	$[4,6 \cdot 10^{-10}]$	Вспомогат.*
m_e	$5,485\,799\,094\,5(24) \cdot 10^{-4}$ а. е. м.	$[4,4 \cdot 10^{-10}]$	Вспомогат.*
α^{-1}	137, 035 999 11(46)	$[3,3 \cdot 10^{-9}]$	α -блок*
$\lambda_C = \hbar/(m_e c)$	$386,159\,267\,8(26) \cdot 10^{-15}$ м	$[6,7 \cdot 10^{-9}]$	α -блок
$h N_A$	$3,990\,312\,716(27) \cdot 10^{-10}$ Дж·с/моль	$[6,7 \cdot 10^{-9}]$	α -блок
$R_K = h/e^2$	25 812, 807 449(86) Ом	$[3,3 \cdot 10^{-9}]$	α -блок*
e	$1,602\,176\,53(14) \cdot 10^{-19}$ Кл	$[8,5 \cdot 10^{-8}]$	h -блок [†]
h	$6,626\,069\,3(11) \cdot 10^{-34}$ Дж·с	$[1,7 \cdot 10^{-7}]$	h -блок*
N_A	$6,022\,141\,5(10) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹	$[1,7 \cdot 10^{-7}]$	h -блок*
$F = e N_A$	96 485, 3383(83) Кл/моль	$[8,6 \cdot 10^{-8}]$	h -блок*
m_e	0, 510 998 918(44) МэВ/ c^2	$[8,6 \cdot 10^{-8}]$	h -блок [†]
m_e	$9,109\,382\,6(16) \cdot 10^{-31}$ кг	$[1,7 \cdot 10^{-7}]$	h -блок [†]
$K_J = 2e/h$	483 597, 879(41) · 10 ⁹ Гц/В	$[8,5 \cdot 10^{-8}]$	h -блок*
G	$6,674\,2(10) \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг·с ²)	$[1,5 \cdot 10^{-4}]$	Независ.

Обозначения. u_r — относительная погрешность; * — значение в единицах СИ фиксировано по определению; † — измеряемая и согласуемая величина, † — не измеряемая (с достаточной точностью), а производная величина; ‡ — заряд e не измеряется непосредственно, но измеряется в различных комбинациях с h или N_A .

Наиболее точные данные, достижимые на сегодня, относятся к таким величинам, как постоянная Ридберга, массы частиц или атомов в единицах частоты или атомных единицах массы, различные отношения масс. Эти данные составляют блок вспомогательных данных, обработка которых сравнительно проста и в значительной степени проводится до основного согласования. Характерные точности составляют единицы десятого или одиннадцатого знака.

Данные, относящиеся к постоянной тонкой структуры α , имеют точность существенно ниже. Поэтому высокоточное знание таких констант, как постоянная Ридберга

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

играет ключевую роль при формировании этого блока данных. Результат для постоянной Ридберга представляет собой условие связи на значения α и h/m_e , а сравнение измерений масс в единицах частоты и атомных единицах массы связывает значения постоянной тонкой структуры α и молярной постоянной Планка hN_A .

Обработка всех данных этого блока дает нам высокоточные значения

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

и hN_A , которые играют роль условий связи на данные другого блока, отвечающего постоянной Планка. Указанные связи возникают между значениями трех фундаментальных констант h , e и N_A .

Остальные данные играют крайне ограниченную роль в согласовании. Измерения некоторых величин обладают низкой точностью и фактически игнорируются при согласовании, а соответствующие константы выводятся из результатов согласования (как, например, значение массы электрона в килограммах). Другие константы независимы от всех блоков, и поэтому их определение — это простое нахождение среднего (как в случае гравитационной постоянной). Подробнее см. в [3] и [4].

Строго говоря, структура блоков выглядит сложнее. Дело в том, что константы входят в различные уравнения как аддитивно, так и мультипликативно. Если в ведущем приближении константы связаны простым соотношением, аналогичным уравнениям (1) и (2), то важна лишь относительная точность входящих в соотношение констант. Так, например, в уравнении (2) величины c и ϵ_0 известны точно, а результаты измерений для α более точны, чем для e и h . Используя результат для более точной величины α , можно получить соотношение для согласования значений e и h .

Иная ситуация возникает, когда соотношения подобного типа имеют малые аддитивные поправки. Так, например, частоты переходов в атоме водорода определяются в главном приближении величиной cR_∞ , но имеется целый ряд малых поправок, зависящих от величины α , масс электрона и протона, зарядового радиуса протона и т. д. Поскольку эти поправки малы, то важна абсолютная погрешность их вклада в частоты переходов. И если поправки известны с лучшей абсолютной точностью, чем ведущий вклад, то их погрешностями можно пренебречь. В итоге ряд констант, которые важны только для подобных малых вкладов, такие как константы слабых взаимодействий, оказываются среди вспомогательных данных несмотря на относительно низкую точность их измерения.

РОЛЬ «МЕНЕЕ ТОЧНЫХ» ИЗМЕРЕНИЙ

В идеальной ситуации роль не слишком точных измерений и вычислений незначительна. Как и в любом вычислении по методу наименьших квадратов, вес данных резко убывает с ростом их погрешности. Однако в неидеальной ситуации, где имеются проблемы с согласием данных, все меняется, а при большом объеме данных подобные неидеальности возникают неизбежно. В «простой» обработке однотипных данных проблема разногласий решается статистически. Если же данные разнородны и результаты двух разных методов измерений, пусть и реализованных с разной точностью, не согласуются, то проблему нельзя решить из общих статистических соображений. Необходимо анализировать данные.

Собственно, основная работа при согласовании констант и заключается в анализе данных и попытке понять, можно ли доверять тем или иным результатам, каковы корреляции между результатами и как поступать в случае различных противоречий.

Технически отклонение менее точного результата на несколько стандартных отклонений приводит к тому, что, несмотря на малый вес результата по сравнению с более точными, сдвиг тем не менее будет заметен. Однако более существенная проблема заключается в том, что любое разногласие в данных приводит к сомнениям в том, что простая статистическая обработка приведет к надежным результатам.

Ниже мы кратко опишем основные блоки данных и увидим, насколько соответствующие данные находятся в согласии.

ПОСТОЯННАЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И СВЯЗАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Постоянную тонкой структуры можно определить разными способами. Среди них — квантово-электродинамические (например на основе исследований аномального магнитного момента электрона), лазерно-квантово-механические (на основе измерения атомной

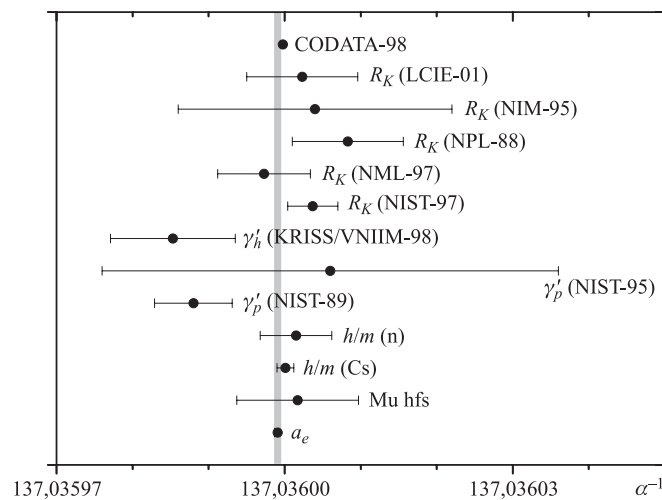


Рис. 1. Измерения постоянной тонкой структуры. Ссылки и детальное объяснение различных результатов можно найти в [1]

отдачи при поглощении и испускании фотона), электродинамические (основанные на сравнении классических электродинамических характеристик и характеристик квантовых эффектов) и т.д. Результаты проиллюстрированы на рис. 1.

Вертикальная полоса на рисунке отвечает рекомендованному значению [1]. В целом результаты, полученные разными методами, находятся в согласии. Особенностью данных является то, что несмотря на множество разных методов измерений доминирует одно или два значения.

ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА И СВЯЗАННЫЕ КОНСТАНТЫ

Постоянная Планка определяется разными способами, и их главным отличием от экспериментов с постоянной тонкой структуры является неизбежное вовлечение тех или иных эталонов. Одно из измерений (вернее, большой международный проект, предполагающий многочисленные независимые измерения целого ряда величин) связано с определением постоянной Авогадро и требует эталонного кристалла, отвечающего так называемому идеальному кристаллу с точностью до контролируемых поправок.

Остальные измерения (см. рис. 2), лучшими из которых являются эксперименты с ватт-весами, являются электродинамическими измерениями, в которых классические макроскопические эффекты сравниваются с квантовыми и в которых ключевую роль играют эталоны напряжения и сопротивления.

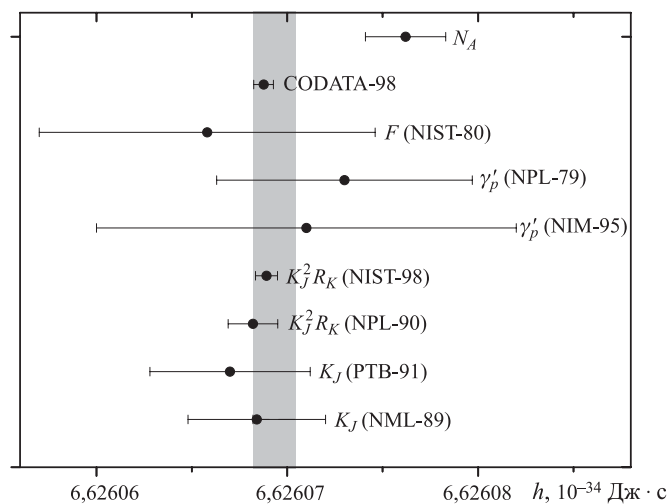


Рис. 2. Измерения постоянной Планка. Ссылки и детальное объяснение различных результатов можно найти в [1]

Особенность данных заключается в том, что электрические результаты не согласуются с результатом, основанным на измерении постоянной Авогадро. Вертикальная полоса отвечает рекомендованному значению [1]. Ее погрешность больше, чем погрешность наиболее точных оригинальных значений, и связана с противоречием в данных.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭТАЛОНЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

Как мы отметили выше, при определении значений ряда фундаментальных констант часто приходится использовать эталоны электрических единиц. Современное положение с этими эталонами не отражает общую структуру единиц Международной системы СИ. Главной спецификой этой области является глубокое различие в точности измерений в электротехнике (при работе с электрическими цепями) и электродинамике (при необходимости рассчитывать электрические или магнитные поля).

Электротехнические измерения сравнительно просты и допускают высокую точность. Однако основой для воспроизведения электрических единиц в системе СИ является закон Ампера, один из законов электродинамики. Реализация этого закона существенно более громоздка и менее точна, чем электротехнические измерения. Поэтому измерения проводятся в два этапа. Во-первых, имеются практические эталоны единиц сопротивления и напряжения, с которыми и проводятся все прецизионные измерения. Во-вторых, в отдельных измерениях эти практические единицы определяются в единицах СИ, т. е. в терминах вольта и ома. Собственно, определения значений констант α и h (а вернее, связанных с ними величин R_K и K_J) и являются подобными экспериментами (см. подробнее в [4]).

Почему возникли эти две константы — постоянная фон Клитцинга R_K и постоянная Джозефсона K_J ? Наиболее привлекательные эталоны — это те, которые можно реализовать на классических макроскопических объектах, но характеристики которых тем не менее квантуются, что оказывается возможным при помощи макроскопических квантовых эффектов, наиболее важными из которых в метрологии являются квантовый эффект Холла (сопротивление квантуется в терминах R_K) и квантовый эффект Джозефсона (при котором напряжение квантуется в терминах K_J и некоей измеряемой частоты).

Современные практические единицы сопротивления и напряжения определены так, что в их терминах величины R_K и K_J известны точно [5]. На практике это приводит к тому, что для перевода результата измерения той или иной величины из практических единиц в единицы СИ ее умножают на соответствующую комбинацию R_K и K_J .

Эти два множителя кардинально меняют зависимость измеряемой величины от фундаментальных констант, а в ряде случаев несут на себе всю такую зависимость. Как правило, собственно эксперимент с этими множителями не связан, а его основное содержание составляет построение устройства, которое можно или рассчитать, или откалибровать методами классической физики. Появление R_K и K_J часто приводит к путанице и непониманию того, что же собственно измеряется в эксперименте.

Например, в экспериментах с ватт-весами измеряется, как это следует из названия, вес макроскопического тела, уравновешенный силой электродинамического происхождения. Расчет этой силы с высокой точностью не представляется возможным, однако дополнительные измерения в этой же системе, но в динамическом режиме (измеряется наводимая эдс) позволяют установить необходимый геометрический фактор. Проводятся измерения только классического типа, однако в качестве эталонов напряжения и сопротивления используются квантовые эталоны. В результате классические весы приводят к квантовой константе h .

Аналогично устроены и так называемые измерения постоянной фон Клитцинга R_K . Основное содержание эксперимента — построение расчетного конденсатора, устройства,

емкость которого, а следовательно, и импеданс для тока с известной частотой известны с высокой точностью. Сравнивая импеданс с сопротивлением квантового эталона, можно выразить единицу сопротивления в этом эталоне (отвечающую R_K) с фарадом СИ.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫ ЛИ ИЗМЕРЯЕМЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ?

Наиболее фундаментальными константами физики, бесспорно, являются c , h и G . Однако мы уже упоминали, что константы и их численные значения — это не одно и то же. Имеется некоторый произвол в выборе численных значений (т. е. в выборе единиц), тогда как константы — это объективное явление. Они, например, могут быть связаны друг с другом несколько иначе, чем мы представляем; они могут меняться со временем; вместо одной константы может оказаться несколько близких по величине (например, заряды протона и позитрона в принципе могут отличаться) и т. д.

Между тем наиболее точные исследования фундаментальных эффектов часто не связаны напрямую с численными значениями фундаментальных констант. Как правило, ограничения на экзотические эффекты или практическая проверка прецизионных расчетов разных теорий делается с гораздо большей точностью, чем известны соответствующие физические постоянные.

Скорость света не является исключением. Мы знаем точно ее численное значение, но не саму скорость света, поскольку экспериментальные реализации секунды и, в большей степени, метра имеют ограниченную точность. Многочисленные эксперименты по проверке общей и специальной теории относительности никак не связаны с точностью реализации единиц длины и времени.

Эксперименты с гравитационной постоянной G стоят особняком и не влияют на другие данные согласования. Несмотря на фундаментальную природу G , ее измерения не имеют особого значения для вычислений как в фундаментальной, так и в практической физике. Движение тел в поле силы тяжести Земли определяется ускорением свободного падения, которое измеряется с высокой точностью. Для движения небесных тел необходимо знать не саму величину G , а ее произведение на массу Солнца (и, если необходимо, на массу планет). Все такие произведения известны существенно более точно, чем G . Эксперименты по проверке общей теории относительности также имеют дело с подобными произведениями. Принцип эквивалентности на расстояниях лабораторного масштаба может проверяться в экспериментах, аналогичных измерению G , однако для принципа эквивалентности важны относительные измерения, что представляет собой существенно другую задачу. Иными словами, измерение G — это интересная, но полностью изолированная задача.

Ситуация с постоянной Планка h иная. Ключевое отличие заключается в существовании макроскопических квантовых и дискретных эффектов. К первым относятся квантовый эффект Холла и эффект Джозефсона, а вторые проявляются в том, что носителями массы и заряда являются частицы, которые можно тем или иным образом сосчитать. Примером такого счета служит измерение постоянных Авогадро и Фарадея. Собственно, даже не проводя пересчетов числа частиц и не исследуя макроскопические квантовые эффекты, мы все равно не можем избежать известной макроскопичности проявлений квантовой механики. Дело в том, что ряд величин, таких как напряжение, носит одно-

временно и интенсивный, и экстенсивный характер. Экстенсивность проявляется в том, что напряжение можно сравнивать с механической работой, в которой участвует большое число частиц. Интенсивность же проявляется в характерных одночастичных явлениях, например, пороговых, в которых разность макроскопического потенциала сравнивается с внутриатомными или молекулярными связями.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Сравнение явлений макро- и микромира играет важную роль в определении значений фундаментальных физических констант. Большинство фундаментальных констант имеет квантовую природу, тогда как нам необходимы практические единицы и мы хотим, чтобы с ними можно было иметь дело при работе с громоздкими макроскопическими объектами. Между тем фундаментальные параметры частиц и атомов позволяют найти естественные и стабильные параметры, и поэтому связь микроскопических и макроскопических величин является ключевой проблемой метрологии. Там, где проблема решена успешно, например, в измерениях частот и длин, удается достигнуть наиболее высокой точности измерений. Там же, где это невозможно, параллельно применяют макро- и микроединицы, и часто это приводит к недоразумениям.

Характер ряда единиц очевиден. Например, килограмм и ампер являются макроскопическими единицами, а атомная единица массы — микроскопической. Некоторые единицы имеют более сложный характер. Масштаб всех единиц СИ, кроме вольта, определяется макроскопическими явлениями, тогда как величина вольта непосредственно связана с характерной разностью потенциалов для разрыва атомных или молекулярных связей. Однако с метрологической точки зрения, когда мы имеем дело с прецизионными измерениями, более важен не масштаб величины, а явления, положенные в ее определение. Так, герц, секунда и метр — это единицы микроскопические, определяемые атомными явлениями. Для удобства их использования в обыденной жизни вводятся большие численные коэффициенты, однако они не меняют характера единиц.

Килограмм в современной версии СИ — это единица макроскопическая, так как отвечает массе макроскопического артефакта — гири, прототипа килограмма. Размеры всех электрических единиц в СИ определяются на основе закона Ампера в терминах килограмма, метра и секунды и поэтому также имеют макроскопический характер. Это относится, в частности, к вольту и к его производной электронвольту.

Именно с электронвольтом и возникают многие недоразумения. Дело в том, что, измеряя массы атомов и частиц и энергии ядерных и атомных переходов в микроскопических единицах, можно достигнуть чрезвычайно высокой точности. К микроскопическим единицам относятся герц, обратный метр, атомная единица массы. Измерение тех же величин в макроскопических единицах, таких как килограмм, джоуль и электронвольт, часто имеет существенно более низкую точность.

Важно понимать, что если говорить о единицах СИ, то электронвольт не имеет никаких особых преимуществ по сравнению с джоулем и килограммом: скорость света известна с абсолютной точностью, а точности измерения e и h совпадают с точностью до двойки. Перевод более точных значений, измеренных в герцах или других микроскопических единицах, в джоули и электронвольты как раз и потребует h и e . Принципиально также и то, что в прецизионных исследованиях все измерения неизбежно проводятся или

в единицах частоты, или в относительных единицах (таких как атомная единица массы). Поэтому результаты для массы электрона или протона, для частот рентгеновских переходов и т. д. непосредственно возникают именно в микроскопических единицах и уже затем с потерей точности переводятся в традиционные электронвольты.

Следует заметить, что непосредственная попытка измерения энергии в электронвольтах не только приведет к менее точным результатам; подобная попытка все равно завершится результатом в микроскопических единицах с последующим переводом в макроскопические единицы, поскольку все прецизионные электрические измерения проводятся в практических единицах и для их перевода необходимо знать значения e и h . Эти практические единицы являются по своей сути единицами микроскопическими.

Заключая обсуждение микроскопических и макроскопических единиц, отметим, что правильное представление прецизионных данных предполагает их представление или в микроскопических единицах, или в макроскопических, но с обязательным разделением погрешностей (измерения и перевода в макроскопические единицы) и явным указанием переводного множителя.

НАДЕЖНОСТЬ РЕКОМЕНДОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В работах [1,2] подробно описываются данные, связанные с двумя согласуемыми блоками, что позволяет представить себе общую картину, понять, насколько окончательные рекомендованные значения зависят от тех или иных данных, и определить степень надежности результатов по наличию конкурентных независимых измерений. Собственно обработка этих блоков и является согласованием в узком смысле этого слова.

К сожалению, ситуация с так называемыми вспомогательными данными, которые известны с более высокой точностью, чем необходимо для согласования, более запутана. Во многих случаях такие результаты основаны на одном измерении или вычислении или на серии скоррелированных измерений и вычислений.

В работах [1,2] дан подробный анализ данных для постоянной Ридберга R_∞ и гравитационной постоянной G , тогда как описание данных по зарядовому радиусу протона R_p или его g -фактору недостаточно. Последнее обстоятельство не случайно, поскольку нет достоверных независимых результатов с достаточной точностью, относящихся к этим величинам. Имеется, например, ряд обработок данных рассеяния по заряду протона, однако, при высоком качестве собственно обработок (см., например, [6]), существует ряд вопросов к данным (см., например, [7]).

Если вдруг окажется, что правильные значения вспомогательных данных отличаются на десяток, а в некоторых случаях и на сотню стандартных отклонений, то это не повлияет на согласуемые блоки. Результаты для α , h и связанных с ними констант не изменятся, и поэтому такие изменения не существенны для согласования в узком смысле.

Важно понимать, что анализ данных может в принципе улучшить качество их обработки в определенных пределах и результаты обработки могут быть «лучше», чем исходные данные (например, надежнее и иногда точнее). Однако все эти возможности ограничены исходными данными — как результатами измерений и вычислений, так и подробностью их описания. В целом рекомендованные значения, будучи результатом совокупной обработки результатов прецизионных экспериментальных и теоретических исследований, представляют собой наиболее точную и надежную интерпретацию существующих данных.

Однако если по той или иной константе имеются реальные проблемы, то и рекомендованные значения могут быть не вполне хороши. Иными словами, каковы данные — таковы и рекомендованные значения. В качестве рекомендации пользователям отметим, что для того чтобы оценить достоверность тех или иных рекомендованных значений, нужно посмотреть, на какие данные они опираются. Вся эта информация представлена в [1].

КАК ИСПОЛЬЗОВАТЬ РЕКОМЕНДОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ?

Выше неоднократно подчеркивалось, что в ряде случаев необходимо непосредственно обращаться к анализу данных в [1], а не к приведенным там рекомендованным значениям. В общем случае рекомендуем следующее. Если вычисление или измерение не слишком точное, а его точность несопоставима с точностью рекомендованных значений [1], полезно использовать рекомендованные значения. Удобство заключается в том, что все аналогичные расчеты разных групп будут использовать одинаковые значения констант.

Если же точность приложения сопоставима с точностью [1], то следует обратиться к исходным данным, тщательно проанализированным в [1]. Лучшим вариантом будет не использование того или иного значения константы, а ее вычисление из нового измерения и сравнение со всем набором значений в [1]. Например, если проведено измерение величины, теоретическое выражение для которой чувствительно к значению постоянной тонкой структуры, то наиболее информативным будет не сравнение эксперимента и теории (при некотором значении α), а вычисление α из упомянутого эксперимента и сравнение с уже имеющимися значениями (см. рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключая статью, сделаем два замечания. Прежде всего отметим, что основная ценность согласования значений фундаментальных констант, регулярно проводимого CODATA, заключена не в таблице рекомендованных значений, которые доступны из многочисленных компиляций, а в подробном критическом анализе исходных данных, который представлен только в [1, 2].

Данные согласования приходят из измерений и вычислений, отвечающих очень разным областям физики. В каждой из них имеются и свои фундаментальные законы, и свои «стандартные» приближения, эффективные методы расчетов и измерений, свои эталоны. Согласование констант является единственной в своем роде проверкой нашего адекватного понимания физической картины в целом. Несмотря на некоторые небольшие разногласия в данных, можно говорить об их хорошем согласии в целом, что означает, что мы адекватно понимаем окружающий нас мир.

Автор признателен П. Дж. Мору (P. J. Mohr) и В. А. Шелото за полезные обсуждения. Работа была выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 06-02-16156) и DFG (грант GZ 436 RUS 113/769/0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohr P. J., Taylor B. N. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 1.
2. Mohr P. J., Taylor B. N. // Rev. Mod. Phys. 2000. V. 72. P. 351.

3. *Mohr P. J., Taylor B. N.* // *Phys. Today*. Aug. 2000. BG6; March 2001. 29.
4. *Каршенбойм С. Г.* // *УФН*. 2005. Т. 175. С. 271.
5. *Quinn T. J.* // *Metrologia*. 1989. V. 26. P. 69; 70; 2001. V. 38. P. 89; 91.
6. *Sick I.* // *Phys. Lett. B*. 2003. V. 576. P. 62.
7. *Karshenboim S. G.* // *Can. J. Phys.* 1999. V. 77. P. 241; *Phys. Rep.* 2005. V. 422. P. 1.