

## Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения

С.Г. Каршенбойм

*Представлен краткий обзор новых рекомендованных значений фундаментальных физических констант CODATA, полученных на основании данных до конца 2002 г. Обзор предваряется обсуждением роли фундаментальных констант для фундаментальной физики и практических измерений. С учетом возрастающей роли фундаментальных констант для реализации эталонов единиц физических величин излагаются некоторые вопросы, относящиеся к Международной системе единиц СИ.*

PACS numbers: 06.20. – f, 06.20.Fn, 06.20.Jr, 06.30. – k

### Содержание

1. Введение (271).
2. Фундаментальные константы в современной физике (273).
  - 2.1. Фундаментальные константы и различные физические явления.
  - 2.2. Фундаментальные константы и системы единиц.
  - 2.3. Физические величины, единицы и эталоны единиц физических величин.
  - 2.4. Фундаментальные константы в современной физике: происхождение и фундаментальность.
3. Согласование значений фундаментальных физических констант (281).
  - 3.1. Структура Согласования и рекомендованные значения основных фундаментальных физических констант (по результатам, опубликованным до 2002 г.).
  - 3.2. Прогресс в определении значений фундаментальных констант.
4. Приложения фундаментальных физических констант (288).
  - 4.1. Квантовая электродинамика и фундаментальные физические константы.
  - 4.2. Макроскопические квантовые явления и единицы электрических величин.
5. Заключение (292).
6. Дополнение. О Международной системе единиц СИ (292).
  - 6.1. Основные единицы системы СИ.
  - 6.2. Система единиц СИ и законы электромагнетизма в вакууме.

### Список литературы (297).

\* Напоминаем читателям, что, как было указано в январском номере УФН (т. 175, с. 40), в течение 2005 года редакция УФН планирует отражать на своих страницах празднование Всемирного года физики. Соответствующие материалы будут помещаться в различных разделах УФН с подзаголовком ANNUS MIRABILIS. (Примеч. ред.)

С.Г. Каршенбойм. ГНЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева",  
190005 Санкт-Петербург, Московский просп. 19,  
Российская Федерация,  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik,  
85748 Garching, Hans-Kopfermann Str. 1, Germany  
Тел. (812) 323-96-75. Факс (812) 113-01-14  
E-mail: sgk@vniim.ru; sek@mpq.mpg.de

Статья поступила 17 августа 2004 г.,  
после доработки 4 ноября 2004 г.

### 1. Введение

Недавно были представлены новые "Рекомендованные значения основных физических констант", полученные при согласовании значений фундаментальных констант [1]. Результаты могут представлять интерес для широкой аудитории. В то же время полный перевод работы [1], содержащей много технических деталей согласования данных по фундаментальным физическим константам, может быть интересен только для специалистов. Целью настоящего обзора является объяснение целей и стратегии согласования. Ниже приводятся новые рекомендованные значения и обсуждаются различные аспекты проблемы фундаментальных констант.

Физика — наука практическая, в ее основе лежат измерения различных физических величин. Большинство из них являются размерными, и для проведения измерений необходимо договориться о единицах физических величин. В настоящее время большинство единиц физических величин фиксировано специальным соглашением, которое называется "Международная система единиц СИ". Система единиц СИ несколько раз модифицировалась, ее современная версия изложена в работе [2]<sup>1</sup>. Имеются практические рекомендации ряда международных комитетов по реализации единиц СИ, как, например, рекомендации по реализации метра [4], ома [5] и вольта [6, 7] (см. также [8]).

Наряду с единицами СИ имеется некоторое количество внесистемных единиц, причем применение лишь некоторых из них, таких как универсальная атомная единица массы, допускается наряду с единицами СИ.

Задача, которая стоит перед физикой, — количественное описание природы. На основе экспериментальных данных создаются теории, содержащие небольшое число фундаментальных физических законов. Законы, описывающие явления природы, сами по себе недостаточны

<sup>1</sup> Перевод документа, касающегося более ранней версии Международной системы единиц СИ, представлен в [3].

для количественных результатов: необходимо знать численные значения входящих в них параметров. Особую роль среди физических величин (как размерных, так и без-размерных), представляющих экспериментальный и теоретический интерес, играют фундаментальные константы.

Фундаментальные константы входят в уравнения из самых различных областей физики, демонстрируя тем самым свою универсальную природу. В силу этого эти константы являются основным инструментом, позволяющим сравнить теорию с экспериментом. Точность значений фундаментальных физических констант определяет пределы возможностей теоретических расчетов. Прекрасной иллюстрацией этого являются прецизионные вычисления квантовой электродинамики: их предсказательная сила значительно ограничена точностью, с которой известны постоянная Ридберга  $R_\infty$ , постоянная тонкой структуры  $\alpha$ , отношение масс электрона и мюона  $m_e/m_\mu$  и др.

Совершенствуя наше понимание природы, мы осознаем, что теоретические описания реальных физических явлений носят приближенный характер. Степень самосогласованности значений физических констант, полученных из измерений в разных областях физики, указывает на точность теоретических концепций в целом.

Уточнение значений фундаментальных физических констант представляет собой важнейшую задачу не только физики, но и метрологии. Метрологическая значимость определяется как ролью, которую фундаментальные константы играют для эталонов единиц, так и ролью, которую эталоны единиц играют для определения значений констант. Примером первого могут служить скорость света  $c$  и электрическая постоянная  $\epsilon_0$ , непосредственно входящие в определение основных единиц СИ. Примерами второго являются различные определения постоянной тонкой структуры и постоянной Планка "электрическими" методами, реализация которых при проведении электрических измерений требует эталонной точности.

Учитывая метрологические аспекты проблемы, необходимо сделать несколько общих замечаний о метрологии. Бытует неправильное мнение, что метрология — это наука об измерениях. На самом деле метрология представляет собой не науку, а практическую сферу деятельности, которая решает самые разнообразные задачи, в частности научные и законодательные.

Вообще говоря, эталоны единиц не являются наилучшими приборами, воспроизводящими единицу. Эталоны (и поверочные схемы, позволяющие сравнивать эталоны с менее точными приборами) — это элементы законодательно принятой системы официальных измерений: сертификации, аттестации, лицензирования и т.д. С научной точки зрения документы, регламентирующие параметры эталонов, не имеют и не могут иметь никакой особой силы. С юридической точки зрения эти документы важнее реальных характеристик. Может случиться, что эталон работает лучше официальных документов, может случиться и обратное.

С научной точки зрения единство измерений необходимо для возможности сравнения экспериментальных данных, полученных в разных лабораториях, разными методами и т.д., причем в научных исследованиях мы имеем право на ошибку. С юридической точки зрения система эталонов служит для делегирования ответствен-

ности за адекватность продукции ее анонсированным характеристикам. В последнем случае, если применение официального документа (такого, как рекомендации по воспроизведению единиц СИ) или использование законодательно признанных эталонов приведут к неправильным результатам, это может явиться причиной судебного иска и последующих финансовых потерь.

Метрическая конвенция и система единиц СИ являются характерными продуктами метрологического сообщества и поэтому представляют собой не только систему единиц, но и многочисленные законодательные акты, направленные на внедрение и доминирование этой системы. Так, применение конкурирующей системы единиц СГС в преподавании не допускается<sup>2</sup>. Вместе с тем споры о достоинствах и недостатках СИ и СГС не утихают и последовательные сторонники СГС имеются до сих пор [9–11]. В силу ряда причин из области практической и отчасти фундаментальной физики автор данного обзора является сторонником системы СИ как основной системы единиц (см. раздел 4.2).

Однако нельзя не отметить, что распространение законодательных запретов на методы преподавания в физике неприемлемы. Более того, система СИ не может быть успешной для преподавания собственно физики, поскольку система единиц физических величин (в силу ее практической значимости) принимается нефизиками и не для физиков. Научные приложения играют лишь незначительную роль в использовании системы СИ. В этом смысле характерна работа Д.В. Сивухина [10], опубликованная по решению Бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР. Мы рассматриваем ряд вопросов, связанных с системой СИ, в разделе 6.

Фундаментальные физические константы носят универсальный характер и входят в самые разнообразные уравнения физики, причем в разных взаимосвязанных комбинациях. Их нахождение представляет собой нетривиальную задачу, которая осуществляется на регулярной основе Рабочей группой КОДАТА по фундаментальным константам (CODATA task group on fundamental constants). CODATA (от Committee on Data) является комитетом Международного совета науки (International Council for Science, IUSC). Процедура определения наиболее точных согласованных значений констант называется согласованием значений фундаментальных физических констант.

Содержанием работы по Согласованию является не статистическая обработка данных, а критическое осмысление прецизионных результатов как входных данных Согласования. Любая физическая теория приближенная, любая экспериментальная методика также основана на приближениях. Согласование значений фундаментальных констант является, может быть, единственной попыткой проверить разумность и согласованность приближений в целом.

Сравнение точности современных значений фундаментальных констант помогает ответить на вопрос: что же, собственно, измеряется на практике? В силу практического характера физики вопросы измеряемости и

<sup>2</sup> Преподавание в системе единиц СИ регламентируется не столько законодательными документами в отношении системы СИ, сколько документами, касающимися системы образования. Степень независимости этой системы в существенно большей степени меняется от страны к стране, чем законодательство в отношении системы СИ.

точности измерений хотя и находятся в тени основных уравнений (таких, например, как уравнения Максвелла), но играют не менее важную роль, чем эти уравнения, поскольку именно эксперимент и делает физику физикой.

Данная работа посвящена обсуждению наиболее поздних рекомендованных значений фундаментальных констант [1]. Недавние результаты сравниваются с более ранними рекомендациями CODATA [13, 14]. (Некоторые детали более ранних Согласований можно также найти в [15, 16].) Ввиду ключевой роли некоторых констант в определении размеров единиц их рекомендованные значения появляются и в публикациях соответствующих консультативных комитетов Международного комитета мер и весов CIPM. Мы сравниваем рекомендации CIPM с результатами Согласования CODATA.

Мы также кратко обсудим различные аспекты проблемы фундаментальных физических констант: их происхождение, роль в физике и метрологии, степень их фундаментальности и т.д. В частности, мы рассмотрим роль исследований в области фундаментальных констант для низкоэнергетических проверок квантовой электродинамики и создания системы эталонов основных электрических величин.

## 2. Фундаментальные константы в современной физике

### 2.1. Фундаментальные константы и различные физические явления

Первые действительно универсальные параметры появились в физике несколько веков назад. Однако следует отметить, что понятие "универсальности" имеет разный смысл с точки зрения фундаментальной и практической физики. С точки зрения фундаментальной физики речь должна идти об основных законах природы, тогда как с практической точки зрения более существенной оказывается роль универсальных параметров в наиболее важных измерениях. Так, в классической механике было два типа задач: механика тел на поверхности Земли и механика небесных тел. В первом случае важной "константой" было ускорение свободного падения  $g$ . Во втором случае константами были скорее произведение массы Солнца на ньютоновскую гравитационную постоянную  $G$ , чем сама эта константа, и отношения масс различных небесных тел (Солнца, планет, их лун).

Важными константами были также параметры воды (ее плотность, удельная теплоемкость, точки кипения и замерзания), параметры земной атмосферы ("нормальное" давление). Возникли константы, описывающие "среднего" человека, размеры Земли, ее вращение вокруг своей оси и вокруг Солнца. Они позволили ввести различные "естественные" единицы (фут, метр, стадий, калорию, сутки, год и т.д.) и температурные шкалы Цельсия и Фаренгейта.

В современной физике параметры атомов играют роль констант природы, которые можно использовать для определения единиц и создания эталонов. В классической физике аналогичная идея (рассмотрение свойств некоторого класса объектов как констант природы) имеет ограниченное применение. Все характеристики, которые могут найти метрологические приложения, возникают как средние свойства эквивалентных объектов или как свойства уникального объекта: искусств-

венного (прототипа килограмма) или естественного (Земли).

Классическая физика, вообще говоря, не предполагает, что все атомы одного элемента одинаковы: они одинаковы в среднем, и их разностью можно пренебречь. (Так, для ряда задач можно игнорировать наличие изотопов.) Классическая физика не располагает и средствами проверки "одинаковости" частиц. Напротив, квантовая физика дает такую возможность: это интерференция между двумя и более частицами, причем речь даже не идет о специальном эксперименте с измерением интерференции между частицами. Статистика Ферми с ее принципом Паули делает Периодическую систему элементов одним из наиболее сильных свидетельств тождественности разных электронов, а оболочечную структуру ядер — доказательством тождественности протонов (и нейтронов). Бозе-конденсация, реализованная в разных системах, позволяет убедиться в тождественности простых и составных бозе-частиц.

Таким образом, нерелятивистская квантовая механика позволяет экспериментально убедиться в тождественности электронов, протонов и нейтронов (внутри своих классов). Если все вещество состоит только из трех типов кирпичиков, то и атомы или молекулы одного типа тоже идентичны. В свою очередь, релятивистская квантовая механика (квантовая теория поля) предполагает построение исчерпывающей теории из сравнительно небольшого количества фундаментальных полей и отвечает на вопрос: почему эти кирпичики одинаковы.

Термодинамические свойства вещества играют промежуточную роль. В идеальном случае они определяются квантовой физикой, однако проявляются в классическом макроскопическом мире. Будучи свойствами макроскопических объектов, термодинамические параметры зависят от деталей образца: размеров, формы и т.д. В принципе эту зависимость можно ограничить или устранить. Имеется и более существенная проблема — технологическая, касающаяся примесей и дефектов, которые могут быть поняты только в рамках атомной теории.

Квантовая физика — это более фундаментальная наука, чем классическая физика, и поэтому она вводит более фундаментальные единицы и константы. Большинство классических единиц и констант, в принципе, выводится из более фундаментальных. Так, массу прототипа килограмма можно определить как сумму масс составляющих частиц (с поправкой на вычисляемую энергию связи), а число этих частиц можно посчитать. Заметим, что в последние десятилетия подобный проект действительно реализуется как определение постоянной Авогадро, однако доступная точность существенно уступает точности, отвечающей артефакту, принятому в качестве прототипа килограмма.

Гравитационная постоянная  $G$  и скорость света в вакууме  $c$  возникли как константы классической физики, однако их роль выходит за ее пределы. Квантовая физика добавляет к действительно фундаментальным классическим константам  $G$  и  $c$  постоянную Планка  $h$  и свойства элементарных (электронов, протонов, нейтронов) и составных объектов. (Наиболее известными из них являются атомы цезия-133 и углерода-12, молекула воды.)

С фундаментальной точки зрения свойства частиц и пространства-времени ( $G$ ,  $h$  и  $c$ ) имеют, конечно, разную

степень фундаментальности. Однако подавляющая часть измерений связана с веществом, и поэтому с практической точки зрения свойства наиболее простых составляющих вещества не менее (а возможно, и более) важны для физики, чем константы  $G$ ,  $h$  и  $c$ . Электрон и протон (в ионах) — это переносчики электрического заряда. Протон и нейтрон являются основными носителями массы; свойства электрона полностью определяют характеристики большинства спектральных линий.

В случае сверхтонкого расщепления, изотопических эффектов, вращательных и колебательных спектров молекул играют свою роль также свойства протона и нейтрона, формирующих ядра. Свойства электрона определяют в конечном счете характерные энергии связи и, следовательно, важнейшие термодинамические свойства (такие, как температуры фазовых переходов). Понятно, что в "практической" физике некоторые параметры трех важнейших частиц (заряд протона<sup>3</sup>  $e$ , массы протона  $m_p$  и нейтрона  $m_n$ , масса электрона  $m_e$  и постоянная Ридберга  $R_\infty$ ) чрезвычайно важны, поскольку они участвуют в различных измерениях частот и длин волн, электрических величин и масс.

Если первая половина XX века была временем создания новых принципов измерений, то во второй половине XX века прогресс проявился в значительной степени в том, что возросли точности измерений и расширился их диапазон. В частности, это способствовало развитию квантовой электродинамики (КЭД) — первой успешной квантовой теории поля. При создании КЭД возникла проблема: вычисления по теории возмущений приводили к расходящимся величинам. Была введена процедура перенормировок. Ее идея заключается в том, что наблюдаемые величины (например, уровни энергии электрона в атоме) необходимо выражать в терминах наблюдаемых величин, в частности в терминах наблюдаемого заряда и массы электрона. Однако в этом случае получается, что наблюдаемые масса  $m_e$  и заряд электрона  $e$  — не те величины  $m_0$  и  $e_0$ , которые входят в некоторое фундаментальное уравнение (на планковском масштабе), а результат возмущения. Если попытаться найти эти фундаментальные величины, то оказывается, что необходимо ввести регуляризацию, т.е. доопределить теорию на малых расстояниях таким образом, чтобы "наивно" расходящиеся результаты стали конечными.

То, что результаты вычислений для наблюдаемых величин не зависят от деталей регуляризации, является важнейшим достижением перенормировки, обеспечившим жизнеспособность этой идее. "Восстановленные" изначальные фундаментальные параметры  $m_0$  и  $e_0$  от таких деталей зависят. Мы не знаем, как на самом деле выглядит физика на малых расстояниях, и поэтому не знаем "истинно фундаментальных" параметров электрона. Те же, с которыми мы имеем дело, — это в некотором смысле не более чем эффективные параметры.

## 2.2. Фундаментальные константы и системы единиц

Измерение представляет собой сравнение двух величин одной размерности. Тем не менее следует различать относительные и абсолютные измерения. При *относи-*

*тельных* измерениях сравниваемые величины в некотором смысле родственные. Это могут быть, например, две частоты в одном частотном диапазоне. При *абсолютном* измерении одна из измеряемых величин должна быть так или иначе связана с универсальным соглашением (например, с системой СИ). Так, относительное измерение магнитного момента ядра может быть реализовано как его сравнение с другим ядерным магнитным моментом. При абсолютном измерении необходимо или рассчитать, или измерить магнитное поле в единицах СИ, что, конечно, оказывается гораздо сложнее и существенно уступает по точности относительным измерениям. Величины, с которыми необходимо сравнивать, — это единицы СИ. Однако имеется целый ряд естественных и практических единиц, и часто измерения организуются в несколько этапов: сравнение различных практических единиц с единицами СИ и измерение интересующих нас величин в наиболее подходящих практических единицах, что близко к относительным измерениям.

Первоначально единицы возникли для описания мира, непосредственно окружающего нас. Это мир макроскопических явлений классической физики, и, как уже отмечалось, его характерные природные константы определяются ускорением свободного падения  $g$ , свойствами воды, "средним" человеком и Землей как небесным телом. Между тем фундаментальные явления происходят на совсем другом физическом масштабе — на масштабе атомной и ядерной физики и физики элементарных частиц.

Сохраняя преемственность, система СИ не меняет размеров единиц заметным образом, но использует явления квантовой физики для их более успешного воспроизведения. Поэтому, можно было бы ожидать, что, коль скоро единицы возникли как макроскопические классические нерелятивистские единицы и их размеры с тех пор существенно не изменились, численные значения всех размерных фундаментальных констант или много больше, или много меньше единицы. Однако это верно лишь для механических единиц. Имеется одна константа порядка единицы — постоянная Ридберга, точнее отвечающая ей энергия в электрон-вольтах:

$$hcR_\infty \simeq 13,6 \text{ эВ}. \quad (1)$$

Конечно, электрон-вольт — это внесистемная единица, но данное численное значение отвечает потенциалу ионизации атома водорода:

$$I_H \simeq \frac{hcR_\infty}{e} \frac{1}{1 + m_e/m_p} \simeq 13,6 \text{ В}, \quad (2)$$

который измеряется в вольтах (т.е. в единицах СИ) и является фундаментальным параметром, описывающим атом водорода не хуже и не лучше, чем постоянная Ридберга. Такое естественное (по порядку величины) значение вольта возникло из-за того, что первоначально разности потенциалов создавались химическим путем (либо сравнивались с потенциалами, необходимыми для разрыва связей в атомах и молекулах или их возбуждения).

Выбор практических единиц и структура построения системы эталонов определяются целесообразностью. Вообще говоря, они могут не совпадать друг с другом и

<sup>3</sup> Здесь и далее элементарный заряд  $e$  определен как заряд протона и, следовательно, является положительной величиной.

быть неочевидными с фундаментальной точки зрения. Конечно, они также определяются инерцией и историей, однако то, что физика начиналась с классической и нерелятивистской, — не только исторический факт (с точки зрения фундаментальной физики), но и явное указание на крайнюю практическую важность соответствующего типа измерений. Так, применение современных систем навигации на земле, в море и космосе явно демонстрирует важность точных измерений традиционных расстояний и интервалов времени и в наше время. По объему измерения "классических макроскопических нерелятивистских" величин (с широким применением квантовых методов и учетом, по мере необходимости, релятивистских эффектов) многократно превосходят измерения существенно квантовых или существенно релятивистских объектов.

Примером целесообразности в построении системы единиц является моль — единица количества вещества. С точки зрения фундаментальной физики нет никакой необходимости во введении специальной размерности: достаточно просто считать атомы. Однако взвешивать атомы проще (для массовых неточных приложений) и точнее (для единичных прецизионных). Поэтому, вместо того чтобы говорить о числе атомов и их макроколичестве как количестве, включающем фиксированное число атомов, предпочтительно говорить об определенной массе атомов (например, 0,012 кг) определенного элемента (например, углерода-12).

Сравнение атомных (молекулярных) масс осуществляется относительно легко и надежно, как и взвешивание макроскопических количеств вещества. Постоянная Авогадро, определяющая число атомов в одном моле вещества, становится измеримой и размерной. (В случае ее фиксации количество вещества могло бы измеряться, например, в тераатомах, а постоянная Авогадро была бы безразмерной аналогично переводному множителю между ферми и метром.) Отметим, что мы говорим именно о взвешивании, а не об измерении масс: сравнение весов в предположении одинаковости ускорения свободного падения и, если необходимо, "абсолютное взвешивание" массы (сочетание измерений веса и ускорения свободного падения  $g$ ), — все еще наиболее точный и наиболее простой способ определения массы (хотя мы, конечно, знаем о зависимости значения  $g$  от времени и места).

Строго говоря, следует различать размерную константу — постоянную Авогадро  $N_A$ , имеющую размерность числа частиц на один моль, и ее численное значение в системе СИ. Обе величины имеют физический смысл: размерная величина представляет собой молярную плотность числа частиц, а численное значение отвечает массе атома углерода<sup>4</sup>:

$$m(^{12}\text{C}) = \frac{12 \text{ г}}{\{N_A\}}. \quad (3)$$

С практической точки зрения температуру также нецелесообразно сводить к механическим единицам (аналогично количеству вещества). С точки зрения фундаментальной физики в принципе можно даже говорить о том, что измерения температуры и количества веще-

ства в самостоятельных специальных единицах, не сводимых к единицам длины, времени и массы, реализуют идею относительных измерений в специальных условиях. Однако эти условия признаны мировым сообществом столь важными, что используемые в измерениях единицы легализованы как основные единицы СИ!

В случае электрических единиц ситуация более запутанная: налицо атавистические упоминания об эфире, что недопустимо. Так, константы  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  еще некоторое время назад назывались диэлектрической и магнитной проницаемостями вакуума. В настоящее время эти константы называются электрической и магнитной постоянными (в вакууме), что, конечно, не меняет суть проблемы.

Вместе с тем имеются серьезные причины для введения  $\epsilon_0 \neq 1$ , помимо исторических. В случае количества вещества и температуры речь шла о величинах, в принципе сводимых к механическим (числу атомов, энергии и т.д.), измеряемым в уже известных единицах. В случае электрического заряда речь, бесспорно, идет о некоей немеханической величине, которая может быть измерена при помощи механических единиц. Поэтому вопрос ставится иначе: имеет ли смысл измерять существенно разные величины в одинаковых единицах? Мы вернемся к этому вопросу ниже.

Выше отмечалось, что масштаб размеров единиц системы СИ был определен исторически на основе классических макроскопических явлений (в конце XVIII века, но на основе эволюции единиц в течение нескольких веков!), однако это не помешало осознать (в XX веке), что только квантовые явления могут предоставить действительно универсальные и неизменные величины, которые можно использовать для создания единиц. Собственно говоря, квантовые явления предоставляют некоторые естественные единицы и их достаточно много.

Тенденция развития системы СИ — принятие новых определений на основе квантовых явлений, причем соответствующие квантовые единицы определяют единицы СИ, но не равны им, поскольку метрологическое сообщество консервативно, и мы, конечно, не хотим менять размеры единиц. Определение осуществляется путем фиксации значений некоторых естественных констант (фундаментальных в разной степени), таких, например, как частота сверхтонкого расщепления в цезии-133 [2]

$$\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770 \text{ Гц} \quad (4)$$

и скорость света в вакууме

$$c = 299\,792\,458 \text{ м с}^{-1}. \quad (5)$$

Существует целый ряд естественных единиц, имеющих разный статус в системе СИ. Если рассмотреть обратную частоту сверхтонкого расщепления в цезии  $\nu_{\text{HFS}}^{-1}(^{133}\text{Cs})$  как одну из таких единиц, то секунда в СИ — производная от этой единицы:

$$1 \text{ с} = 9\,192\,631\,770 \frac{1}{\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs})}. \quad (6)$$

Скорость света  $c$  — естественная единица скорости, единица СИ является производной от нее:

$$1 \text{ м с}^{-1} = \frac{1}{299\,792\,458} c. \quad (7)$$

<sup>4</sup> Здесь и далее выражения в фигурных скобках обозначают численные значения размерных величин в системе СИ, если не указана иная система единиц.

Атомная единица массы

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C}) \quad (8)$$

— внесистемная единица, фактически определяющая моль:

$$\frac{1 \text{ г}}{1 \text{ а.е.м.}} = \{N_A\}. \quad (9)$$

Наряду с внесистемными единицами есть и неофициальные единицы, роль которых часто играют фундаментальные константы. Так, во многих справочниках ядерные магнитные моменты приводятся в ядерных магнетонах

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}. \quad (10)$$

Иногда явного написания единицы просто избегают путем введения специально нормированных величин, таких как атомное число  $A$  (число нуклонов, которое для ряда задач с достаточной точностью аппроксимирует массу атома или ядра в атомных единицах массы), ядерный  $g$ -фактор (с точностью до простого множителя, зависящего от спина ядра, это магнитный момент ядра  $\mu_{\text{Nuc}}$ , представленный в ядерных магнетонах  $\mu_N$ ), квантовое число, отвечающее полному угловому моменту или его части, например спину (совпадающее с соответствующим угловым моментом, деленным на  $\hbar$ ). Часто

константа  $c$  используется как единица скорости. Так, в астрономии расстояния могут измеряться в световых годах, а в ускорительной физике импульсы — в МэВ/с. Список можно продолжать.

Естественные единицы возникают как интерпретация размерных фундаментальных констант [17] (табл. 1). Некоторые из них можно рассматривать и как переводные множители между разными единицами. Безразмерные и некоторые размерные константы можно также интерпретировать как переводные множители между разными единицами. (Их интерпретация не обязательно исчерпывается этим!) Рассмотрим все имеющиеся возможности.

1. Безразмерные константы — переводные множители между "однотипными" единицами для "одной" величины. Например, различные отношения, сформированные из массы  $\hbar R_\infty/c$  (отвечающей ридберговской энергии), массы электрона  $m_e$ , массы протона  $m_p$ , массы атома углерода, планковской массы  $M_{\text{Pl}}$ , можно в свою очередь рассматривать как единицы. Поскольку указанные единицы естественные и в разной степени фундаментальные, их отношения также являются фундаментальными константами. Численные значения безразмерных констант не зависят от выбора единиц и представляют наибольший физический интерес.

2. Размерные константы — переводные множители между разными единицами для "одной" величины. Так, постоянная Больцмана  $k$  связывает единицы темпера-

Таблица 1. Некоторые естественные единицы и их рекомендованные значения в единицах СИ и некоторых других единицах [1]

Естественная единица	Обозначение	Численное значение	Относительная погрешность
Атомная единица массы (а.е.м.)	$\frac{1}{12} m(^{12}\text{C})$	$1,660\,538\,86(28) \times 10^{-27}$ кг $931,494\,043(80)$ МэВ $c^{-2}$	$1,7 \times 10^{-7}$ $8,6 \times 10^{-8}$
Масса протона	$m_p$	$1,672\,621\,71(29) \times 10^{-27}$ кг $938,272\,029(80)$ МэВ $c^{-2}$	$1,7 \times 10^{-7}$ $8,6 \times 10^{-8}$
Масса электрона	$m_e$	$9,109\,382\,6(16) \times 10^{-31}$ кг $0,510\,998\,918(44)$ МэВ $c^{-2}$	$1,7 \times 10^{-7}$ $8,6 \times 10^{-8}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$9,274\,009\,49(80) \times 10^{-24}$ Дж Тл $^{-1}$ $1\,836,152\,672\,61(85) \mu_N$	$8,6 \times 10^{-8}$ $4,6 \times 10^{-10}$
Ядерный магнетон	$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$	$5,050\,783\,43(43) \times 10^{-27}$ Дж Тл $^{-1}$ $2,179\,872\,09(37) \times 10^{-18}$ Дж	$8,6 \times 10^{-8}$ $1,7 \times 10^{-7}$
Ридберговская энергия	$\hbar c R_\infty$	$13,605\,692\,3(12)$ эВ	$8,5 \times 10^{-8}$
Заряд протона	$e$	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$ Кл	$8,5 \times 10^{-8}$
Постоянная Планка	$h$	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,054\,571\,68(18) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
Планковская масса	$M_{\text{Pl}} = \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2}$	$2,176\,45(16) \times 10^{-8}$ кг $1,220\,90(9) \times 10^{19}$ ГэВ $c^{-2}$	$7,5 \times 10^{-5}$ $7,5 \times 10^{-5}$
Планковская длина	$l_{\text{Pl}} = \frac{\hbar}{M_{\text{Pl}} c}$	$1,616\,24(12) \times 10^{-35}$ м	$7,5 \times 10^{-5}$
Планковское время	$t_{\text{Pl}} = \frac{l_{\text{Pl}}}{c}$	$5,391\,21(40) \times 10^{-44}$ с	$7,5 \times 10^{-5}$
Планковская температура	$T_{\text{Pl}} = \frac{M_{\text{Pl}} c^2}{k}$	$1,416\,79(11) \times 10^{32}$ К	$7,5 \times 10^{-5}$
Постоянная фон Клитцинга	$R_K = \frac{h}{e^2}$	$25\,812,807\,449(86)$ Ом	$3,3 \times 10^{-9}$

туры (средней энергии на степень свободы) и стандартные единицы энергии. Специальной размерной константой, как отмечалось выше, является частота сверхтонкого расщепления основного состояния в цезии-133, численное значение которой фиксировано по определению: она связывает частоту сверхтонкого расщепления в цезии, как естественную единицу, с единицей СИ. Константа, возникшая из системы СИ, может быть константой природы, причем с достаточно нетривиальным смыслом. Например, численное значение постоянной Больцмана  $k$  характеризует тройную точку кипения воды. Такая константа может быть и "только" переводным множителем, характеризующим соглашение о единицах подобно численному значению частоты сверхтонкого расщепления  $\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs})$ .

Четкого разделения между безразмерными и размерными константами, служащими переводными множителями, нет. Это связано с тем, что в систему СИ и в некоторые внесистемные единицы (такие, как электрон-вольт или атомная единица массы) "встроены" размерные константы с фиксированными численными значениями. К примеру, частота двухфотонного ( $1s-2s$ )-перехода в атоме водорода [20]

$$\nu_{\text{H}}(1s-2s) = 2\,466\,061\,413\,187\,103(46) \text{ Гц} \quad (11)$$

характеризует естественную водородную единицу, тесно связанную с хартри:

$$E_{\text{H}} = 2hcR_{\infty}.$$

В то же время этот результат в безразмерных терминах

$$\frac{\nu_{\text{H}}(1s-2s)}{\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs})} = 268\,265,005\,592\,310\,7(50) \quad (12)$$

без потери точности можно интерпретировать как переводный множитель между водородной и цезиевой единицами. Очевидно, что речь идет об одной и той же физической величине, т.е. равенства (11) и (12) содержат одну и ту же информацию, однако их размерности и численные значения различны.

3. Размерные константы — переводные множители между разными единицами для "разных" (но родственных) величин. Примерами могут служить: расстояния и интервалы времени; масса, энергия и импульс; частота и энергия; заряд и комбинация единиц, возникающая из закона Кулона при  $\epsilon_0 = 1$  ( $\text{м}^3/2 \text{ кг}^{1/2} \text{ с}^{-1}$  — единица, аналогичная единице заряда в СГС). Можно фиксировать эти константы. Две из них — скорость света в вакууме  $c$  (см. (5)) и электрическая постоянная  $\epsilon_0$  — фиксированы в СИ:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0}, \quad (13)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн м}^{-1}.$$

Константы  $c$  и  $\epsilon_0$  можно сделать безразмерными. Выиграем ли мы от этого? Ответ на вопрос заключается в том, считаем ли мы величины, измеряемые отождествленными единицами, одинаковыми. Если мы считаем, что масса, импульс и энергия — это в сущности одно и то же (разные компоненты одного 4-вектора), то мы выиграем от упрощения уравнений. Если мы считаем, что это достаточно разные величины, то измерение их в одинаковых единицах приведет лишь к видимому упрощению,

скроет некоторые важные физические аспекты и может привести к недоразумениям.

На поставленный выше вопрос не может быть абсолютно очевидного бесспорного ответа, поскольку величины тесно связаны, но не тождественны. Они "почти" одинаковы, и термин "почти" — математически лукавый, так как этот термин не может быть выражен численно и не имеет сравнительной степени.

В случае релятивистских векторов (4-координата или 4-импульс) их компоненты часто имеют самостоятельный физический смысл, частично продиктованный историей и нерелятивистскими пределами. Если придать компонентам 4-векторов отдельный смысл и явно или неявно измерять их компоненты в разных единицах, то ситуация с тензорами более высокого ранга станет более запутанной и неприятной и желание упрощения может победить. Однако 4-тензоры, за редким исключением (например, тензор электромагнитного поля  $F_{\mu\nu}$ , включающий как электрическое, так и магнитное поля), менее важны для приложений, чем различные векторы.

Релятивистская физика тяготеет к тому, чтобы измерять разные величины в одинаковых единицах, и принуждает нас вводить (наряду со временем и энергией) нулевые компоненты соответствующих 4-векторов

$$x_0 = ct,$$

$$p_0 = \frac{E}{c}$$

с размерностями, отвечающими расстоянию и импульсу соответственно. Последовательный переход к  $x_0$  и  $p_0$  от  $t$  и  $E$  фактически означает  $c = 1$ , поскольку скорость света выпадает из уравнений. Так, вместо размерной скорости  $v_i = \partial x_i / \partial t$  в уравнениях естественно возникнет ее безразмерный аналог  $\beta_i = \partial x_i / \partial x_0$ .

В то же время квантовая (и статистическая) механика настаивает на различной трактовке времени и пространственных координат, энергии и импульса. Нас интересует эволюция во времени системы, занимающей определенный объем в пространстве. Квантовая механика (как нерелятивистская, так и релятивистская) говорит на языке стационарных (квазистационарных) состояний и дискретного спектра энергий. Иными словами, явно нековариантный подход к пространству и времени оказывается во многих случаях удобным и полезным.

Отметим также, что в нерелятивистской физике при  $c = 1$  возникнут трудности с применением метода размерности, и поэтому существенно пострадает наглядность и прозрачность теории. Конечно, можно будет говорить о пределе малых расстояний ( $\Delta x \ll \Delta t$ ) и разложении по параметру  $\Delta x / \Delta t$ . Тогда величины одного порядка малости при  $c = 1$  будут отвечать одной размерности в случае стандартной трактовки скорости света как размерной величины. Однако характерных времен и длин, а следовательно, и малых параметров может быть много. Кроме того, действуя последовательно, логично также положить  $\hbar = 1$ . Такая система единиц позволит упростить уравнения релятивистской квантовой механики, но она крайне неудобна для нерелятивистской классической физики, которая является важной областью измерений.

Следует понимать, что условия вида  $c = 1$  — это скорее жаргон [17]. На самом деле речь идет о выборе естественных единиц скорости, в которых численное

значение скорости света равно единице. К сожалению, применяя релятивистские или какие-либо другие специальные единицы, не все ясно представляют, что речь идет о жаргоне.

Стандартный компромисс заключается в том, что мы равноправно рассматриваем ковариантные и нековариантные обозначения. В релятивистских задачах используются ковариантные обозначения, в нерелятивистских задачах — нековариантные. При необходимости выписать результат для непосредственно измеряемых величин также используются нековариантные обозначения, так как для реального измерения фиксируется система отсчета. Принудительный выбор  $c = 1$ , одним из достоинств которого было бы упрощение уравнений релятивистской физики, сузил бы преимущества нековариантного подхода в случае, когда он удобен.

Независимо от выбора единиц мы знаем, что свет распространяется и, следовательно, его скорость  $c$  — объективно существующая величина. Тот факт, что в определенной системе единиц она может принимать тривиальное значение, не означает, что константа исчезает. Мы имеем опыт измерений разных величин в одинаковых единицах, например веса (т.е. частного случая силы) в килограммах. Проблема "исчезновения" констант — одно из недоразумений, возникающих при этом.

Допустим, что скорость света изотропна или зависит от времени и места. Сравнивая ее численные значения, можем этого не заметить даже в системах единиц, где численное значение  $c$  не фиксировано, поскольку необходимо следить за изотропностью и постоянством самих единиц. Однако в плоском мире с непостоянной скоростью света мы должны столкнуться с проблемами геометрической интерпретации данных, основанных на распространении света. В итоге геометрические результаты могут оказаться неоднозначными или неплоскими.

Отметим, что подобные рассуждения — не абстрактная проблема, а реальность спутниковой системы GPS. Конечно, в этом случае проблемы скорости света не в фундаментальной нелоренцевости нашего мира, а в наличии атмосферы. Тем не менее ситуация является простой иллюстрацией того, что исследование скорости света не сводится к прямому измерению скорости его распространения и может быть выражено в терминах, не связанных напрямую с деталями системы единиц.

Таким образом, можно сказать, что система единиц (и система эталонов) предполагает определенные законы физики. Если действительность противоречит законам физики (так, определение метра предполагает, что скорость света в вакууме — ни от чего не зависящая

универсальная константа, определение ампера предполагает закон Ампера, а его реализация — законы Максвелла), то всегда существуют способы обнаружить эти противоречия и интерпретировать их.

Следует отметить, что вместо безразмерной единицы  $c = 1$  можно явно принять размерное равенство. Однако этот паллиатив недостаточно полно использует достоинства жаргонного подхода с условием  $c = 1$  и частично сохраняет проблемы разных размерностей: например, время  $t$  (в годах) и расстояние  $x$  (в световых годах) по-прежнему измеряются в разных единицах.

Разнообразные величины часто измеряют в "энергетических" единицах (что удобно с точки зрения фундаментальной физики) и единицах частоты (что важно с практической точки зрения, коль скоро измерения частоты наиболее точные). Переводными множителями служат значения фундаментальных констант, таких как  $h$ ,  $e$ ,  $c$ ,  $k$  и т.д. "Энергетические" и "частотный" эквиваленты некоторых из этих единиц приведены в табл. 2.

### 2.3. Физические величины, единицы и эталоны единиц физических величин

Единицы физических величин определяются неким официальным соглашением — системой СИ, однако система стандартов может и не отвечать системе единиц. Так, система СИ предполагает одну основную электромагнитную единицу, вводимую посредством фиксации магнитной постоянной  $\mu_0$ . Формально это делается на основе закона Ампера. На самом деле с точки зрения системы СИ безразлично, какую именно электромагнитную единицу фиксировать и какой именно закон принять за основу (закон Кулона, Ампера или какой-либо другой) — все они эквивалентны.

Для построения системы эталонов важны два обстоятельства при выборе главных эталонов: это должны быть оптимальные эталоны как с точки зрения точности основной единицы, так и с точки зрения реализации размеров производных единиц. Практически удобно разделить стандарты на группы: длина-частота-время, масса, электромагнитные величины и т.д. В случае электромагнитных величин удобно взять за основу два эталона, например вольта и ома. Это создает избыточную систему. Поэтому параллельно с определением размеров единиц остальных электрических величин необходимо решить задачу о согласовании единиц механической мощности (выраженной через основные единицы как  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ кг м}^2 \text{ с}^{-3}$ ) и электрической мощности ( $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В}^2 \text{ Ом}^{-1}$ ). Мы вернемся к этому вопросу в разделе 4.2.

**Таблица 2.** "Энергетические" и "частотный" эквиваленты различных единиц (рекомендованные значения [1]). Здесь  $E_H = \alpha^2 mc^2 = 2c h R_\infty$  — атомная единица энергии (хартри),  $\nu' = 1/\lambda$  — волновое число

Единица	Связь с энергией	Численное значение эквивалента		
		1 Дж	1 эВ	1 Гц
1 Дж		1	$6,241\,509\,47(53) \times 10^{18}$	$1,590\,190\,37(26) \times 10^{33}$
1 эВ	$E = eV$	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$	1	$2,417\,989\,40(21) \times 10^{14}$
1 Гц	$E = h\nu$	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$	$4,135\,667\,43(35) \times 10^{-15}$	1
1 м <sup>-1</sup>	$E = ch\nu'$	$1,986\,445\,61(34) \times 10^{-25}$	$1,239\,841\,91(11) \times 10^{-6}$	299 792 458
1 К	$E = kT$	$1,380\,650\,5(24) \times 10^{-23}$	$8,617\,343(15) \times 10^{-5}$	$2,083\,664\,4(36) \times 10^{10}$
1 кг	$E = mc^2$	$8,987\,551\,787 \dots \times 10^{16}$	$5,609\,588\,96(48) \times 10^{35}$	$1,356\,392\,66(23) \times 10^{50}$
1 а.е.м.	$E = mc^2$	$1,492\,417\,90(26) \times 10^{-10}$	$931,494\,043(80) \times 10^6$	$2,252\,342\,718(15) \times 10^{23}$
1 $E_H$	$E_H = \alpha^2 mc^2$	$4,359\,744\,17(75) \times 10^{-18}$	27,211 384 5(23)	$6,579\,683\,920\,721(44) \times 10^{15}$



Из приведенного выше обсуждения видно, что имеются три связанные, но достаточно различные системы:

- система физических величин;
- система физических единиц;
- система эталонов физических единиц.

Эти системы могут иметь и имеют разную структуру. В силу практических причин одна и та же в сущности физическая величина может в определенных условиях измеряться в разных единицах (к примеру, в кельвинах и джоулях). Разные величины (например, вес и масса) могут измеряться в одинаковых единицах. Иерархия эталонов не следует иерархии единиц.

Ситуация с эталонами оказывается еще более сложной в связи с тем, что речь идет как о воспроизведении, так и о поддержании размера единиц. В случае поддержания размера единиц стандартом является устройство, предоставляющее некоторую единицу, которая не совпадает с единицей системы СИ и размер которой (в единицах СИ), строго говоря, неизвестен. Такая единица, позволяет проводить "локальные" измерения. Если эта единица основана на квантовых явлениях (что важно для измерений в области частоты–длины–времени, напряжения, сопротивления), то она естественна и, следовательно, универсальна во всем мире и не зависит от времени (в отличие от классических национальных единиц, основанных на артефактах).

Для получения (воспроизведения) единицы СИ необходимо правильно откалибровать поддерживаемую единицу. Если поддерживаемые единицы основаны на численных значениях фундаментальных констант, то независимое измерение их значений превращает поддержание в воспроизведение. Таким образом, появляется возможность реализовать одни и те же единицы СИ в разных лабораториях, т.е. обеспечить единство измерений без непосредственного сличения эталонов. Мы рассмотрим проблемы воспроизведения и поддержания единиц на примере электромагнитных величин в разделе 4.2.

В практической реализации системы СИ электромагнитные единицы занимают особое место. Можно, например, заметить, что с формальной (математической) точки зрения единица длины — это производная единица, а основными являются единицы времени (цезиевые часы) и скорости (в терминах скорости света в вакууме). Однако единицу скорости ни в коем случае не следует признавать основной, поскольку невозможно реализовать эталон такой единицы. Единица длины, напротив, лишена этого недостатка и может быть принята в качестве основной.

Все основные единицы СИ, кроме ампера, отвечают основным эталонам, на основе которых создаются по мере необходимости эталоны производных единиц. Альтернатива любой из единиц практически отсутствует, поскольку эти единицы наиболее удобны (каждая в своей области). Ситуация с электромагнитными единицами качественно иная. Выбор основных эталонов диктуется целесообразностью, и его результаты могут быть разными в зависимости от развития технологии на данный период. Кроме того, ампер явно определен как единица *электродинамики*, описывающей физику полей, сил, взаимодействий и т.д. Между тем наиболее важные на практике (и наиболее точные) измерения относятся к *электротехнике*, изучающей электрические цепи.

Фактически определение ампера — это не определение единицы, годное для воспроизведения, а определение значения магнитной постоянной  $\mu_0$ , которое можно использовать для воспроизведения различных единиц самыми разными способами. Значительную часть электротехнических единиц (тока, напряжения, сопротивления, емкости и индуктивности) можно сравнительно легко поддерживать и сравнивать друг с другом. В электротехнике лишь выделяемая тепловая мощность связана напрямую с механическими единицами. Однако тепловые явления — не самая лучшая возможность для определения единиц энергии, мощности и т.д. Поэтому на практике национальные эталоны электромагнитных единиц создавались в некотором смысле независимо от определений системы СИ (в виде артефактов). Затем в ходе специальных экспериментов проводились перекрестные сравнения:

- между единицами одной размерности (например, между единицами вольта или ома в разных странах);
- между единицами разной размерности (например, между фарадом и омом);
- между национальными и международными единицами и единицами СИ.

Данная тенденция сохранилась и до настоящего времени с той поправкой, что сравнение национальных эталонов разных стран потеряло свою значимость в связи с использованием универсальных квантовых явлений. Фактическая независимость определения заряда делает необходимым введение констант  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$ . Не исключено, что в будущем будут приняты естественные размеры основных электрических единиц на базе макроскопических квантовых явлений (эффекта Джозефсона и квантового эффекта Холла). В этом случае заряд будет измеряться в единицах заряда электрона (с фиксированным нормировочным множителем) и появление коэффициента пропорциональности в законе Кулона неизбежно. В системе единиц с фиксированным значением заряда электрона  $e$  коэффициент пропорциональности в законе Кулона должен быть результатом измерений и не может быть фиксирован (см. раздел 4.2).

Приведенный пример — далеко не единственный случай, когда требования прозрачности физических уравнений ( $\epsilon_0 = 1$ ) и точности измерений приходят в столкновение. Другой пример — измерения частоты, энергии и длины волны излучения гамма-квантов. Традиционно результаты приводятся в энергетических единицах, хотя непосредственно измеряется длина волны. Энергия связи дейтрона имеет ясный физический смысл, однако непосредственно измеряется другая величина — минимальная частота фотона, приводящая к фотоионизации. Перевод этой частоты во внесистемную единицу энергии электрон-вольт увеличивает погрешность.

Аналогичная ситуация возникает в прецизионной физике простых атомов (водород, мюоний, позитроний), когда вычисляются уровни энергии, а измеряются частоты переходов. Проблема решается в пользу точности: аналитические выражения приводятся для энергии, а численные значения — для соответствующей ей частоты (ср. [18, 19]). Это необходимо не только для сравнения с экспериментом, но и потому, что соответствующие нормированные факторы (например, масса электрона  $m_e$ ) точнее известны не в единицах массы или энергии ( $m_e c^2$ ), а в единицах частоты ( $m_e c^2 / h$ ).

## 2.4. Фундаментальные константы в современной физике:

### происхождение и фундаментальность

Обсудим кратко происхождение и степень фундаментальности физических констант в современной физике. Эти вопросы имеют и практическое значение, так как их решение может привести к пониманию того, выводимы ли одни константы из других, и вообще, вычислимы ли константы из первых принципов, могут (должны) ли константы меняться со временем и т.д.

Вопрос выведения одних констант из других относится ко "вторичным" объектам. В случае макроскопических квантовых эффектов и атомных уровней энергии это вопрос оценки точности вычислений и отчасти определенных. Так, в случае эффекта Джозефсона и квантового эффекта Холла (см. раздел 4.2) соответствующие универсальные коэффициенты пропорциональности практически определены как константы Джозефсона и фон Клитцинга:

$$K_J = \frac{2e}{h}, \quad R_K = \frac{h}{e^2}. \quad (14)$$

Поэтому точность их выражения через заряд электрона и т.д. — это точность соответствующих теорий. В настоящее время никакие поправки к приведенным выше выражениям неизвестны ни теоретически, ни экспериментально.

В случае атома водорода, напротив, постоянной Ридберга называли не наблюдаемую величину, а специальную комбинацию из заряда и массы электрона:

$$R_\infty = \frac{\alpha^2 m_e c}{2h}, \quad (15)$$

где введена постоянная тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}. \quad (16)$$

Постоянная Ридберга определяет уровни энергии в атоме водорода лишь в пренебрежении релятивистскими и радиационными эффектами и эффектами конечной массы и структуры ядра. Поэтому константа  $R_\infty$  точно выражается через более фундаментальные константы. Однако точность, с которой наблюдаемые частоты переходов и потенциал ионизации в атоме водорода связаны с постоянной Ридберга, определяется точностью теории. Можно также обсуждать, в какой степени удастся вычислить массу ядер (вычислить или измерить поправку на их энергию связи), их магнитные моменты и т.д. Хотя точность подобных вычислений редко оказывается высокой, "вторичность" упомянутых выше объектов не вызывает сомнений.

Более деликатный вопрос — вычислимость фундаментальных констант, относящихся к элементарным объектам. Вычислимость из первых принципов тесно связана с фундаментальностью. Прежде всего следует отметить, что константы, связанные со свойствами частиц, не являются, строго говоря, фундаментальными. Выше уже упоминалась проблема перенормировки. Правильное понимание роли перенормировки для фундаментальности и, следовательно, вычислимости констант показывает, что все спекуляции относительно точного предсказания значения постоянной тонкой структуры  $\alpha$  из общих соображений не могут быть правильными и не имеют смысла. Простые выражения

могут отвечать только перенормированным величинам, определенным на планковском масштабе, из которых мы пока не способны вывести наблюдаемое значение постоянной тонкой структуры.

Четыре константы, приведенные в (14)–(16), включают элементарный заряд  $e$ , который принимается равным заряду позитрона или протона. Строго говоря, в настоящее время для равенства их зарядов нет никаких теоретических аргументов, подкрепленных экспериментом. Это равенство находит объяснение в рамках различных теорий, объединяющих сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия. Такие теории естественно вытекают из наших взглядов на фундаментальные взаимодействия, однако пока они не имеют никакого экспериментального подтверждения. Таким образом, с практической точки зрения мы имеем дело с "совпадением" зарядов позитрона и протона с высокой степенью точности. Различие зарядов протона и позитрона на много порядков меньше погрешности определения этих зарядов (см., например, [25]), и в практических приложениях можно говорить об одной константе — элементарном заряде.

На сегодняшний день только ограниченное количество фундаментальных констант может быть рассчитано из первых принципов. В ряде случаев успех достигается лишь для перенормированных констант, таких как  $g$ -фактор электрона и мюона. Их невозмущенные значения можно легко найти, однако для сравнения с реальными значениями необходимо учесть квантово-электродинамические эффекты, точность вычисления которых ограничена.

Другим примером может служить синус угла Вайнберга  $\sin^2 \theta_W$  в моделях Великого объединения (электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий) [12]. После того как минимальная модель, основанная на SU(5)-группе, оказалась неспособной объяснить слишком долгое время жизни протона, на существование претендуют ее различные модификации. При дальнейшем экспериментальном (отборе модификации) и теоретическом (вычислении поправок) прогрессе эта константа может быть вычислена.

Говоря о фундаментальности, нельзя обойти стороной и еще два вопроса. Они связаны с тем, что Вселенная, в которой мы живем, — это уникальный объект, и поэтому не до конца ясно, что в ней случайно, а что закономерно. Построение современной теории электро-слабого взаимодействия, различные попытки Великих объединений [12] и инфляционная модель эволюции Вселенной [21] предполагают, что эффекты спонтанного нарушения симметрии играют важную роль в нашем мире. Поэтому (а возможно, и по другим причинам) некоторые константы могли бы принимать разные значения, и только в нашей Вселенной или в нашей версии эволюции Вселенной они такие, какими мы их видим. Возможно, некоторые константы не могут быть вычислены в принципе.

Вместе с тем имеются некоторые макропараметры, описывающие Вселенную в целом: постоянная Хаббла, средняя плотность вещества и энергии, отношение числа барионов к числу фотонов и т.д. Мы также не знаем, фундаментальны ли они или они — "факт частной биографии" нашей Вселенной. Возможно, в рамках *антропного принципа* эти два вопроса — на самом деле две стороны одного вопроса. Идея антропного принципа

заключается в том, что Вселенная могла обладать достаточно разными свойствами (и разными константами), но лишь их жестко определенная комбинация способна привести к появлению тех, кто изучает эту Вселенную. Заметим, что речь не идет даже о жизни или органическом веществе. Так, при определенных соотношениях констант нуклеосинтез мог бы идти иначе и звезды не возникли бы (см., например, [22, 23]). Возможно, ожидание, что свойства Вселенной универсальны, окажется чем-то сродни принятию в свое время важности таких "земных" констант, как ускорение свободного падения и плотность воды.

Другая сторона вопроса о фундаментальности — постоянство констант. Могут существовать модели, где меняются и "истинно" фундаментальные константы, однако гораздо легче построить сценарий, в котором меняются наблюдаемые "эффективные" параметры. Так, в инфляционной модели Вселенной [21] имеют место фазовые переходы, после которых у электрона скачком возникает масса. При этом скачком возникает ненулевое вакуумное среднее некоторых полей, однако сами параметры фундаментального гамильтониана не изменяются. Этот пример указывает также на то, что фундаментальные константы, вероятно, менялись со временем и, вообще говоря, могут меняться сейчас, но, конечно, не столь заметно. Обсуждение современной ситуации с поиском возможных изменений значений фундаментальных констант со временем можно найти в [24].

В заключение данного раздела отметим, что следует различать сами размерные константы и их численные значения. Численными значениями можно манипулировать вплоть до изменения их размерности и фиксации их величины. Однако как бы мы не меняли систему единиц, скорость света  $c$  или частота сверхтонкого расщепления в цезии  $\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs})$  существуют объективно. Интересно, что манипуляции могут существенно влиять на степень фундаментальности численных значений. Например, постоянная Ридберга (15) представляет собой комбинацию фундаментальных свойств электрона и ничего "не знает" о магнитном моменте цезия-133.

Напротив, численное значение постоянной Ридберга  $R_\infty$  можно в принципе вычислить, зная магнитный момент цезия (в магнетонах Бора) и постоянную тонкой структуры  $\alpha$ . Значение массы электрона играет в этом вычислении весьма слабую роль (через эффекты конечной массы ядра). На самом деле численное значение постоянной Ридберга в единицах СИ — это (с точностью до нормировки) обратная частота сверхтонкого расщепления в цезии-133, измеренная в естественных (атомных) единицах. Оно характеризует не постоянную Ридберга, а сверхтонкое расщепление в цезии и систему СИ.

### 3. Согласование значений фундаментальных физических констант

#### 3.1. Структура Согласования и рекомендованные значения основных фундаментальных физических констант (по результатам, опубликованным до 2002 г.)

Согласование значений фундаментальных физических констант — это непростая задача, весьма далекая от простой совместной обработки данных по методу наименьших квадратов. Одна из проблем — тесная взаимосвязь данных. Для того чтобы найти, например, постоянную Ридберга  $R_\infty$ , необходимо знать постоянную тонкой структуры  $\alpha$ . В то же время для некоторых способов определения постоянной тонкой структуры необходимо знать постоянную Ридберга. В данном случае связью данных можно практически пренебречь. Дело в том, что постоянная Ридберга известна на несколько порядков точнее постоянной тонкой структуры, и поэтому при определении константы  $\alpha$  погрешностью определения константы  $R_\infty$  можно пренебречь.

Вместе с тем при определении постоянной Ридберга  $R_\infty$  постоянная тонкой структуры  $\alpha$  входит лишь в аддитивные поправки относительного порядка  $\alpha^2$ , и нетрудно убедиться, что в этом случае погрешность определения постоянной тонкой структуры также несущественна. Однако такая удачная ситуация реализуется не всегда, и некоторые блоки данных необходимо обрабатывать совместно, минимизируя погрешность. Эта процедура называется *Согласованием* значений фундаментальных физических констант. На протяжении последнего десятилетия структура Согласования остается неизменной.

1. Несколько констант "известны" с абсолютной точностью, поскольку их значения фиксированы при определении единиц СИ или внесистемных единиц, например атомной единицы массы. При Согласовании эти константы (табл. 3), конечно, не меняются. Погрешности, отвечающие константам, не исчезают, а переносятся с их численных значений на определение размерных единиц, в которых они выражены, и через них в погрешности других величин.

2. Значения некоторых констант известны со столь высокой степенью точности, что соответствующие погрешности не влияют на определение значений остальных фундаментальных констант. К ним относятся, например, постоянная Ридберга  $R_\infty$ , отношение масс электрона и протона  $m_e/m_p$  и некоторые другие (табл. 4). Эти константы играют роль вспомогательных констант при Согласовании, поскольку они находятся до основной

**Таблица 3.** Значения фундаментальных физических констант, принятых по определению и, следовательно, известных с абсолютной точностью

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение
Скорость света в вакууме	$c, c_0$	299 792 458 м с <sup>-1</sup>
Частота сверхтонкого расщепления в цезии	$\nu_{\text{HFS}}(^{133}\text{Cs})$	9 192 631 770 Гц
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн м <sup>-1</sup>	$1,256\,637\,061 \dots \times 10^{-6}$ Гн м <sup>-1</sup>
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0}$	$8,854\,187\,817 \dots \times 10^{-12}$ Ф м <sup>-1</sup>
Масса атома углерода	$m(^{12}\text{C})$	12 а.е.м.

**Таблица 4.** Рекомендованные значения фундаментальных физических констант [1], известные с высокой точностью и играющие вспомогательную роль при Согласовании

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Постоянная Ридберга	$R_\infty$	$10\,973\,731,568\,525(73) \text{ м}^{-1}$	$6,6 \times 10^{-12}$
	$cR_\infty$	$3,289\,841\,960\,360(22) \times 10^{15} \text{ Гц}$	$6,6 \times 10^{-12}$
Масса электрона	$m_e$	$5,485\,799\,094\,5(24) \times 10^{-4} \text{ а.е.м.}$	$4,4 \times 10^{-10}$
Масса протона	$m_p$	$1,007\,276\,466\,88(13) \text{ а.е.м.}$	$1,3 \times 10^{-10}$
Отношение масс протона и электрона	$\frac{m_p}{m_e}$	$1\,836,152\,672\,61(85)$	$4,6 \times 10^{-10}$
Магнитный момент протона	$\mu_p$	$1,521\,032\,206(15) \times 10^{-3} \mu_B$	$1,0 \times 10^{-8}$
g-фактор протона	$g_p = \frac{2\mu_p}{\mu_N}$	$5,585\,694\,701(56)$	$1,0 \times 10^{-8}$
Масса нейтрона	$m_n$	$1,008\,664\,915\,60(55) \text{ а.е.м.}$	$5,5 \times 10^{-10}$
Масса дейтрона	$m_d$	$2,013\,553\,212\,70(35) \text{ а.е.м.}$	$1,7 \times 10^{-10}$
Магнитный момент дейтрона	$\mu_d$	$0,466\,975\,456\,7(50) \times 10^{-3} \mu_B$	$1,1 \times 10^{-8}$
g-фактор дейтрона	$g_d = \frac{\mu_d}{\mu_N}$	$0,857\,438\,232\,9(92)$	$1,1 \times 10^{-8}$
Масса ядра гелия-3	$m_h$	$3,014\,932\,243\,4(58) \text{ а.е.м.}$	$1,9 \times 10^{-9}$
Масса $\alpha$ -частицы	$m_\alpha$	$4,001\,506\,179\,149(56) \text{ а.е.м.}$	$1,4 \times 10^{-11}$
Константа Ферми*	$\frac{G_F}{(\hbar c)^3}$	$1,166\,39(1) \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$	$8,6 \times 10^{-6}$
Электрослабый угол*	$\sin^2 \theta_W$	$0,222\,15(76)$	$3,4 \times 10^{-3}$

процедуры Согласования и при собственно Согласовании не меняются.

Следует отметить, что абсолютная величина относительной погрешности не столь существенна. Важно, входит ли данная величина в основной вклад в виде множителя (как правило, постоянная Ридберга входит именно так) или в виде малых поправок, которые достаточно знать с крайне низкой точностью. Например, вклад слабых взаимодействий в различные величины (аномальные магнитные моменты электрона и мюона, уровни энергии в водороде, дейтерии, гелии и мюонии) настолько мал, что погрешности, связанные с ним, не играют никакой роли. Между тем постоянная Ридберга известна наиболее точно из измеряемых констант, тогда как точность константы Ферми  $G_F$  заметно хуже, чем точность большинства констант, входящих в Согласование. Низкой точностью обладает и электрослабый угол<sup>5</sup>.

Имеется также целый класс вспомогательных констант: атомные массы, определенные в универсальных атомных единицах массы. Некоторые из них известны с очень высокой точностью. Недавняя обработка данных по атомным массам была опубликована в [27]. Наиболее точные результаты представлены в табл. 5. Значения масс, использованные в [1], могут несколько отличаться (на малую долю погрешности) от собранных в таблице.

3. Имеются два больших блока данных. Наиболее точно измеренный из них блок включает в себя постоянную тонкой структуры  $\alpha$ , постоянную фон Клитцинга  $R_K$ , величины  $h/m$  с атомными массами (цезия-133) или массами частиц (нейтрона). Поскольку все важнейшие

<sup>5</sup> Численные значения [1] констант слабых взаимодействий, отмеченные звездочкой в табл. 4, приведены согласно [25]. В издании 2004 г. [26] они несколько изменены:  $G_F/(\hbar c)^3 = 1,166\,37(1) \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$  [ $9 \times 10^{-6}$ ],  $\sin^2 \theta_W = 0,222\,12(37)$  [ $1,7 \times 10^{-3}$ ], что никак не влияет на результаты Согласования (в квадратных скобках указана относительная погрешность).

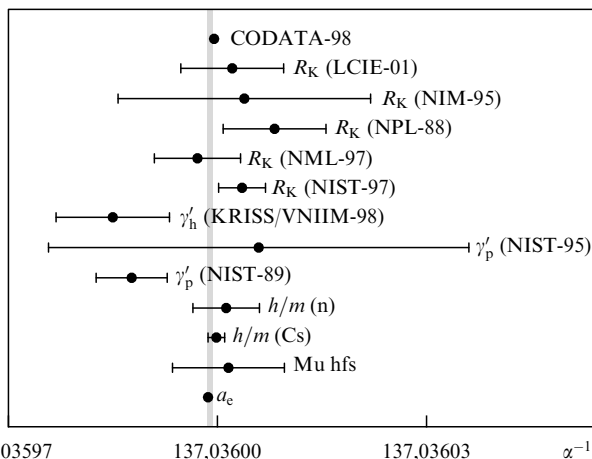
**Таблица 5.** Наиболее точно измеренные атомные массы [27]

Изотоп	Атомная масса, а.е.м.	Относительная погрешность
<sup>1</sup> H	1,007 825 032 07(10)	$1,0 \times 10^{-10}$
<sup>2</sup> H	2,014 101 777 85(36)	$1,8 \times 10^{-10}$
<sup>3</sup> H	3,016 049 277 7(25)	$8,3 \times 10^{-10}$
<sup>3</sup> He	3,016 029 319 1(26)	$8,6 \times 10^{-10}$
<sup>4</sup> He	4,002 603 254 15(6)	$0,15 \times 10^{-10}$
<sup>12</sup> C	12	0
<sup>13</sup> C	13,003 354 837 8(10)	$0,75 \times 10^{-10}$
<sup>14</sup> C	14,003 241 988 7(41)	$2,9 \times 10^{-10}$
<sup>14</sup> N	14,003 074 004 78(62)	$0,44 \times 10^{-10}$
<sup>15</sup> N	15,000 108 898 23(75)	$0,50 \times 10^{-10}$
<sup>16</sup> O	15,994 914 619 56(16)	$0,10 \times 10^{-10}$
<sup>20</sup> Ne	19,992 440 175 4(19)	$1,0 \times 10^{-10}$
<sup>22</sup> Ne	21,991 385 114(19)	$8,6 \times 10^{-10}$
<sup>23</sup> Na	22,989 769 280 9(29)	$1,3 \times 10^{-10}$
<sup>24</sup> Mg	23,985 041 700(14)	$5,8 \times 10^{-10}$
<sup>28</sup> Si	27,976 926 532 5(19)	$0,7 \times 10^{-10}$
<sup>29</sup> Si	28,976 494 700(22)	$7,5 \times 10^{-10}$
<sup>30</sup> Si	29,973 770 17(3)	$1,0 \times 10^{-10}$
<sup>36</sup> Ar	35,967 545 106(29)	$8,2 \times 10^{-10}$
<sup>40</sup> Ar	39,962 383 122 5(29)	$0,75 \times 10^{-10}$
<sup>85</sup> Rb	84,911 789 738(12)	$1,4 \times 10^{-10}$
<sup>87</sup> Rb	86,909 180 527(13)	$1,5 \times 10^{-10}$
<sup>133</sup> Cs	132,905 451 933(24)	$1,8 \times 10^{-10}$
<sup>134</sup> Cs	133,906 718 475(28)	$2,1 \times 10^{-10}$

отношения масс (атомов и нейтрона к протону, протона к электрону) известны лучше, чем  $\alpha$ , измеряя величину  $h/m$  и комбинируя ее с отношением масс  $m/m_e$  и постоянной Ридберга  $R_\infty$ , можно найти значение постоянной тонкой структуры:

$$\alpha = \left( \frac{2 R_\infty}{c} \frac{m}{m_e} \frac{h}{m} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Получить представление об исходных данных можно из рис. 1, где показаны разные значения постоянной тонкой



**Рис. 1.** Различные значения постоянной тонкой структуры  $\alpha^{-1}$ , полученные из данных при Согласовании констант. Вертикальная полоса отвечает значению, рекомендованному CODATA [1]. Индексы отвечают непосредственно измеряемой величине. Разъяснения и ссылки на экспериментальные работы см. в [1].

структуры  $\alpha$ , найденные из вводных данных. Эти результаты несут иллюстративный характер.

Результаты Согласования для этого блока собраны в табл. 6. Обращает на себя внимание такая "нефундаментальная" величина, как магнитный момент (гиромагнитное отношение) экранированного ядра гелия-3, измеренный для основного состояния нейтрального атома.

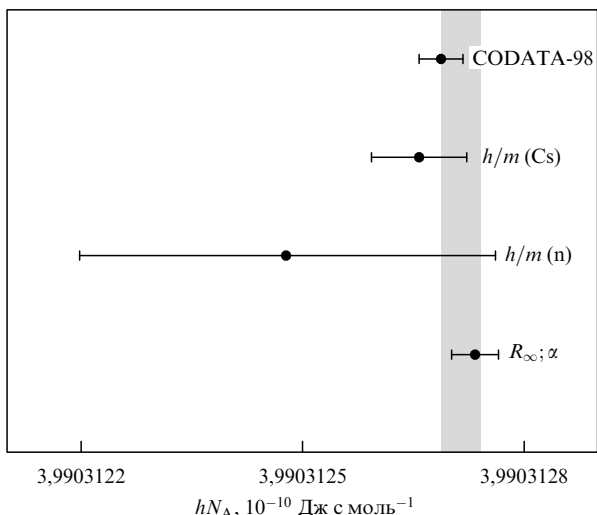
**Таблица 6.** Рекомендованные значения фундаментальных физических констант [1], связанных при Согласовании с постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Гиромагнитное отношение экранированного ядра  $^3\text{He}$  отвечает нейтральному гелию-3. Существует несколько разных соглашений о знаках  $g$ -факторов. В отличие от [1] здесь знак  $g$ -фактора элементарных частиц определен релятивистски; следовательно, он для них положителен и совпадает для электрона и позитрона. Отрицательно заряженные частицы (электрон, мюон) имеют отрицательный магнитный момент и положительный  $g$ -фактор. Для составных объектов (ядер) он может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от направлений спина и магнитного момента

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c}$	$7,297\,352\,568(24) \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-9}$
	$\alpha^{-1}$	137,035 999 11(46)	$3,3 \times 10^{-9}$
Аномальный магнитный момент электрона	$a_e = \frac{g_e - 2}{2}$	$1,159\,652\,1859(38) \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-9}$
Боровский радиус	$a_0 = \frac{\hbar}{\alpha m_e c}$	$5,291\,772\,108(18) \times 10^{-11}$ м	$3,3 \times 10^{-9}$
Отношение масс мюона и электрона	$\frac{m_\mu}{m_e}$	206,768 283 8(54)	$2,6 \times 10^{-8}$
Отношение магнитных моментов мюона и протона	$\frac{\mu_\mu}{\mu_p}$	-3,183 345 118(89)	$2,6 \times 10^{-8}$
Аномальный магнитный момент мюона	$a_\mu$	$1,165\,919\,81(62) \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-7}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = \frac{\hbar}{m_e c}$	$386,159\,267\,8(26) \times 10^{-15}$ м	$6,7 \times 10^{-9}$
Постоянная фон Клитцинга	$R_K = \frac{h}{e^2}$	25 812,807 449(86) Ом	$3,3 \times 10^{-9}$
Квант циркуляции	$\frac{h}{2m_e}$	$3,636\,947\,550(24) \times 10^{-4}$ м <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	$6,7 \times 10^{-9}$
Гиромагнитное отношение электрона	$\gamma_e = \frac{2\mu_e}{\hbar}$	$1,760\,859\,74(15) \times 10^{11}$ с <sup>-1</sup> Тл <sup>-1</sup>	$8,6 \times 10^{-8}$
Гиромагнитное отношение протона	$\gamma_p = \frac{2\mu_p}{\hbar}$	$2,675\,222\,05(23) \times 10^8$ с <sup>-1</sup> Тл <sup>-1</sup>	$8,6 \times 10^{-8}$
Магнитный момент экранированного ядра гелия-3	$\mu'_h$	-2,127 497 723(25) $\mu_N$	$1,2 \times 10^{-8}$
Гиромагнитное отношение экранированного ядра гелия-3	$\gamma'_h = \frac{2\mu'_h}{\hbar}$	$2,037\,894\,70(18) \times 10^8$ с <sup>-1</sup> Тл <sup>-1</sup>	$8,6 \times 10^{-8}$
Молярная постоянная Планка	$hN_A$	$3,990\,312\,716(27) \times 10^{-10}$ Дж с моль <sup>-1</sup>	$6,7 \times 10^{-9}$

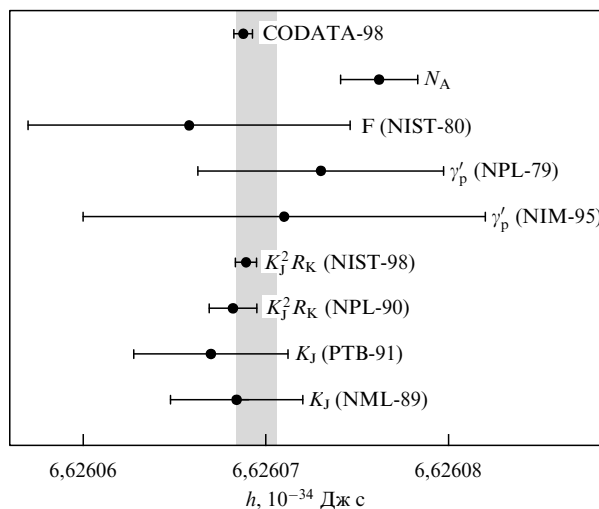
Конечно, эта величина несколько отличается от невозмущенного магнитного момента изолированного ядра. Однако точность измерений превосходит точность теоретических расчетов для эффектов экранирования. Поскольку до сих пор нет прямых измерений магнитного момента собственно ядра и все результаты относятся к атому, эта константа более существенна с точки зрения экспериментальной физики.

4. Менее точный блок связан с элементарным зарядом  $e$ , постоянной Планка  $h$ , постоянной Джозефсона  $K_J$ , постоянной Авогадро  $N_A$ . Взаимосвязь трех первых констант очевидна (коль скоро постоянная тонкой структуры  $\alpha$  известна с более высокой точностью). Относительно постоянной Авогадро следует заметить, что имеются два микроскопических типа измерений масс с высокой точностью: в универсальных атомных единицах массы (т.е.  $m\{N_A\}$  в граммах) и в единицах частоты (т.е. измерение величины  $mc^2/h$ ). Их сравнение приводит к прецизионному определению значения молярной постоянной Планка  $hN_A$ , некоторые результаты для которой представлены на рис. 2.

Два конкурирующих подхода в микроскопическом определении массы отвечают и двум подходам "естественного" определения килограмма как массы фиксированного числа атомов углерода и как массы, отвечающей энергии покоя, равной энергии фотонов с фиксированной суммой частот. (Речь скорее идет о "большом" числе сравнительно "мягких" фотонов, чем об одном фотоне с частотой, превосходящей планковский масштаб, или о непрямом измерении.) Множитель  $hN_A$  с



**Рис. 2.** Определения молярной постоянной Планка  $hN_A$ , полученные на основе вводных данных Соглашения констант. В вычислениях с постоянной Ридберга и постоянной тонкой структуры использовались согласованное значение  $R_\infty$  и значение  $\alpha$  из аномального магнитного момента электрона. Ссылки можно найти в [1].



**Рис. 3.** Значения постоянной Планка  $h$ , полученные на основе вводных данных Соглашения констант. Заштрихована вертикальная область, отвечающая согласованному значению. Ссылки см. в [1].

точностью до известного фактора  $1/c^2$  является переводным между этими "естественными" определениями единицы (макроскопической) массы.

Результаты для постоянной Планка, полученные из данных, использованных при Соглашении, собраны на рис. 3. Они носят иллюстративный характер. Характерные точности данных в  $\alpha$ -блоке и  $h$ -блоке (результаты

Соглашения для этого блока представлены в табл. 7) различаются приблизительно на порядок, поэтому обработка данных в блоках проводится практически независимо.

5. Некоторые константы не входят ни в какие блоки просто потому, что эксперименты полностью изолированы, как, например, в случае гравитационной постоян-

**Таблица 7.** Рекомендованные значения фундаментальных физических констант [1], связанных при Соглашении с постоянной Планка  $h$  и элементарным зарядом  $e$

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Постоянная Планка	$h$	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,054\,571\,68(18) \times 10^{-34}$ Дж с	$1,7 \times 10^{-7}$
Элементарный заряд	$e$	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$ Кл	$1,7 \times 10^{-7}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022\,141\,5(10) \times 10^{23}$ моль $^{-1}$	$1,7 \times 10^{-7}$
Постоянная Фарадея	$F = eN_A$	$96\,485,338\,3(83)$ Кл моль $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Постоянная Джозефсона	$K_J = \frac{2e}{h}$	$483\,597,879(41) \times 10^9$ Гц В $^{-1}$	$8,5 \times 10^{-8}$
Масса электрона	$m_e$	$9,109\,382\,6(16) \times 10^{-31}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Масса протона	$m_p$	$1,672\,621\,71(29) \times 10^{-27}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Масса нейтрона	$m_n$	$1,674\,927\,28(29) \times 10^{-27}$ кг	$1,7 \times 10^{-7}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$927,400\,949(80) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Ядерный магнетон	$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$	$0,505\,078\,343(43) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,6 \times 10^{-8}$
Магнитный момент протона	$\mu_p$	$1,410\,606\,71(12) \times 10^{-26}$ Дж Тл $^{-1}$	$8,7 \times 10^{-8}$

**Таблица 8.** Рекомендованные значения фундаментальных физических констант [1], результаты для которых никак не связаны с другими константами

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Гравитационная постоянная	$G$	$6,674\,2(10) \times 10^{-11}$ м $^3$ кг $^{-1}$ с $^{-2}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Универсальная газовая постоянная	$R = kN_A$	$8,314\,472(15)$ Дж моль $^{-1}$ К $^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$
Магнитный момент нейтрона	$\mu_n$	$-1,041\,875\,63(25) \times 10^{-3}$ $\mu_B$	$2,4 \times 10^{-7}$
		$-1,913\,042\,73(45) \mu_N$	$2,4 \times 10^{-7}$

**Таблица 9.** Рекомендованные значения фундаментальных физических констант [1], непосредственно доступные на эксперименте со сравнительно низкой точностью и потому выводимые из вспомогательных (табл. 4) и более точных констант (табл. 6–8)

Фундаментальная константа	Обозначение	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность
Постоянная Больцмана	$k = \frac{R}{N_A}$	$1,380\,650\,5(24) \times 10^{-23}$ Дж К <sup>-1</sup>	$1,8 \times 10^{-6}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = \frac{\pi^2}{60} \frac{k^4}{h^3 c^2}$	$5,670\,400(40) \times 10^{-8}$ Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-4</sup>	$7,0 \times 10^{-6}$

ной  $G$  (табл. 8). Согласование в этом случае сводится просто к обычному усреднению.

6. Имеются также константы, которые могли бы входить в блоки, однако измерены со слишком низкой точностью, и в этом случае соответствующие экспериментальные данные практически не участвуют в Согласовании, а в качестве результата приводится некоторая производная из согласованных значений других констант. Некоторые из подобных величин представлены в табл. 9.

Значительная часть величин в табл. 6 и 7 (например, боровский радиус, комптоновская длина волны электрона, квант циркуляции, гироманнитное отношение электрона, молярная постоянная Планка, массы частиц в единицах СИ, ядерный магнетон и магнетон Бора в единицах СИ и др.) также относится к этой категории данных.

Отметим, что сравнение точности разных данных играет важную роль при их разбиении на блоки, но не определяющую. Согласование представляет собой процедуру, аналогичную нахождению средневзвешенного, с той разницей, что данные многообразны и имеют многочисленные корреляции. Средневзвешенное вычисляется с весами, обратно пропорциональными квадрату погрешности. Если данные в целом находятся в согласии, то доминируют наиболее точные значения и данные, уступающие им по точности на полпорядка, практически не играют роли. Однако если существенно менее точная величина отличается от более точной на несколько стандартных отклонений, то она влияет на среднее.

Кроме того, при отсутствии согласованности данных возникают вопросы о доверии к входным данным и об адекватной оценке погрешности окончательных результатов. В оптимальном случае (при отсутствии подобных проблем) корреляции между блоками играют крайне слабую роль, но тем не менее присутствуют (сдвигая, например, некоторые значения на доли их погрешностей).

Результат Согласования публикуется в виде таблиц рекомендованных значений фундаментальных физических констант [1] (выдержки из которых приведены в табл. 1, 2, 4, 6–9). Какова область применения рекомендованных значений? Ответ несколько обескураживающий. В случаях, когда высокая точность не особенно необходима, эти таблицы удобны и полезны и их использование обеспечивает единство применяемых величин. В случаях, когда высокая точность действительно нужна, все зависит от типа измерений (вычислений). Если речь идет об относительном измерении (например, магнитного момента ядра в единицах магнитного момента протона или некоторого сопротивления в единицах сопротивления холловского образца, определяемого постоянной фон Клитцинга  $R_K$ ) с после-

дующим переводом результата в единицы СИ, то рекомендованные значения CODATA, бесспорно, являются лучшим выбором. Однако полученные значения в единицах СИ играют скорее иллюстративную роль.

Высокоточные значения фундаментальных констант действительно важны в том случае, если речь идет о *сравнении* разных результатов. Однако при сравнении результатов расчетов и/или измерений, которое критично к выбору значений фундаментальных физических констант, ситуация качественно иная. Как правило, оказывается, что новый эксперимент (теоретический расчет) является усовершенствованием более раннего, уже включенного в Согласование, и между ними имеется корреляция. Поэтому в случае прецизионных исследований необходимо рассматривать рекомендованное значение как иллюстрацию, а Согласование как детальную и критическую компиляцию оригинальных данных, с которыми и следует сравнивать новые прецизионные результаты.

Необходимо понимать, что настоящая цель Согласования заключается не в выработке таблиц наиболее точных значений фундаментальных физических констант, а совсем в другом. Согласование позволяет проверить степень согласованности прецизионных теоретических и экспериментальных методов из разных областей измерений и теории. Значительная часть экспериментов, входящих в Согласование, представляет собой измерения с непосредственным вовлечением современных эталонов (а иногда и прототипов будущих, как фактически происходит с квантовым эффектом Холла и эффектом Джозефсона) и позволяет, таким образом, проверить их жизнеспособность. В жестком соревновании за повышение точности часто используются наиболее современные методы измерений и расчетов и в некоторой степени надежность этих методов не очевидна и требует проверки (см. [18, 19] и раздел 4.1).

Так, с точки зрения фундаментальной физики один из результатов Согласования — специфическая проверка квантовой электродинамики. Особая роль квантово-электродинамических объектов (как свободных частиц, так и простых атомов) связана с тем, что они предоставляют набор нефундаментальных констант, которые можно непосредственно выразить в терминах более фундаментальных констант, и эти константы можно не только рассчитать, но и измерить с высокой точностью.

Специфичность проверки заключается в концентрации внимания на наиболее точных измерениях<sup>6</sup>. Такие

<sup>6</sup> С точки зрения КЭД это не вполне оправдано: позитроний предоставляет возможность изучать эффекты отдачи не менее эффективно, чем мюоний и другие атомные системы, но при относительно низкой точности измерений; похожая ситуация со сверхтонким расщеплением 2s-уровня в ионе гелия-3.

**Таблица 10.** Прогресс в уточнении фундаментальных констант по результатам Соглашений 1998 и 2002 гг. Изменение  $\Delta$  определено как сдвиг результата 2002 г. [1] по отношению к 1998 г. [14], величина  $\sigma$  отвечает комбинированному стандартному отклонению (с учетом корреляции новых и старых данных),  $\kappa = \sigma_{1998}/\sigma_{2002}$ . Все данные, кроме приведенных в двух последних колонках, непосредственно взяты из работ [1, 14]

Константа	Численное значение (1998 г.)	Относительная погрешность	Численное значение (2002 г.)	Относительная погрешность	$\kappa$	$\Delta/\sigma$
$h$ , Дж с	$6,626\,068\,76(52) \times 10^{-34}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$	$1,7 \times 10^{-7}$	2,1	0,5
$G$ , $\text{м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$	$6,673(10) \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$6,674\,2(10) \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-4}$	0,1	0,1
$e$ , Кл	$1,602\,176\,462(63) \times 10^{-19}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$	$8,5 \times 10^{-8}$	2,2	0,5
$\alpha^{-1}$	137,03599776(50)	$3,7 \times 10^{-9}$	137,03599911(46)	$3,3 \times 10^{-9}$	0,9	-1,3
$m_e$ , кг	$9,109\,381\,88(72) \times 10^{-31}$	$7,9 \times 10^{-8}$	$9,109\,382\,6(16) \times 10^{-31}$	$1,7 \times 10^{-7}$	2,2	0,5
$R_\infty$ , $\text{м}^{-1}$	10973 731,568 549(83)	$7,6 \times 10^{-12}$	10973 731,568 525(73)	$6,6 \times 10^{-12}$	0,9	-0,3
$\mu_B$ , Дж Тл $^{-1}$	$9,274\,008\,99(37) \times 10^{-24}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$9,274\,009\,49(80) \times 10^{-24}$	$8,6 \times 10^{-8}$	2,1	0,6
$a_e$	$1,159\,652\,186\,9(41) \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,159\,652\,185\,9(38) \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-9}$	0,9	-0,24
$m_p/m_e$	1 836,152 667 5(39)	$2,1 \times 10^{-9}$	1 836,152 672 61(85)	$4,6 \times 10^{-10}$	0,22	1,3
$\mu_p/\mu_B$	$1,521\,032\,203(15) \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,521\,032\,206(15) \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-8}$	1,0	0,2
$g_p$	5,585 694 675(57)	$1,0 \times 10^{-8}$	5,585 694 701(56)	$1,0 \times 10^{-8}$	1,0	0,46
$m_u/m_e$	206,768 265 7(63)	$3,0 \times 10^{-8}$	206,768 283 8(54)	$2,6 \times 10^{-8}$	0,85	2,9
$a_\mu$	$1,165\,916\,02(64) \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$1,165\,919\,81(62) \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-7}$	1,0	4,3
$\mu_u/\mu_p$	-3,183 345 39(10)	$3,2 \times 10^{-8}$	-3,183 345 118(89)	$2,6 \times 10^{-8}$	0,9	2,7
$R_K$ , Ом	25 812,807 572(95)	$3,7 \times 10^{-9}$	25 812,807 449(86)	$3,3 \times 10^{-9}$	0,9	-1,4
$K_J$ , Гц В $^{-1}$	$483\,597,898(19) \times 10^9$	$3,9 \times 10^{-8}$	$483\,597,879(41) \times 10^9$	$8,5 \times 10^{-8}$	2,2	-0,5
$N_A$ , моль $^{-1}$	$6,022\,141\,99(47) \times 10^{23}$	$7,9 \times 10^{-8}$	$6,022\,141\,5(10) \times 10^{23}$	$1,7 \times 10^{-7}$	2,1	-0,5
$k$ , Дж К $^{-1}$	1,380 650 3(24) $\times 10^{-23}$	$1,7 \times 10^{-6}$	1,380 650 5(24) $\times 10^{-23}$	$1,8 \times 10^{-6}$	1,0	0,1
$hN_A$ , Дж с моль $^{-1}$	$3,990\,312\,689(30) \times 10^{-10}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$3,990\,312\,716(27) \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-9}$	0,9	0,9
$R$ , Дж моль $^{-1}$ К $^{-1}$	8,314 472(15)	$1,7 \times 10^{-6}$	8,314 472(15)	$1,7 \times 10^{-6}$	1,0	0,0

измерения могут осуществить проверку КЭД только при наличии адекватного значения постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Сравнение квантово-электродинамических величин с величинами, полученными вне КЭД, и является одной из наиболее эффективных проверок.

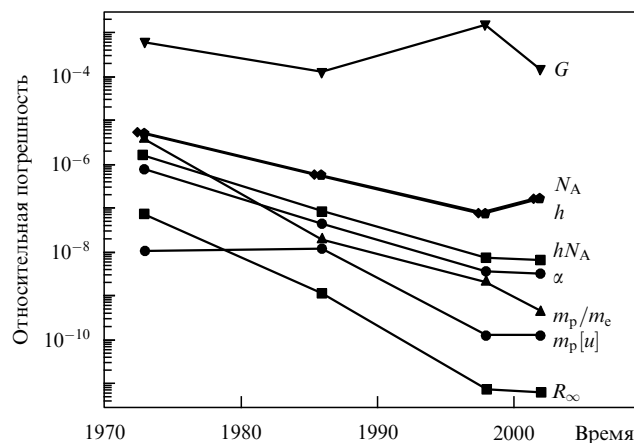
### 3.2. Прогресс в определении значений фундаментальных констант

Сравнение последних рекомендованных значений [1] с результатами предшествующего Соглашения [14] представлено в табл. 10. Для небольшого набора констант ( $R_\infty$ ,  $m_p/m_e$ ,  $\alpha$ ,  $h$ ,  $N_A$  и др.). На рисунке 4 проведено сравнение точности результатов нескольких Соглашений [1, 13, 14, 28]. Рабочая группа по фундаментальным константам CODATA была организована в 1969 г., и все четыре Соглашения, представленных на рисунке, проведены этой группой.

Основные изменения в значениях фундаментальных констант за четыре года, представленные в табл. 10, сводятся к следующим:

- сдвиг постоянной тонкой структуры  $\alpha$  ввиду уточнения теории аномального магнитного момента электрона (найдена поправка к численному значению, выходящая за пределы его погрешности [29]) и получено еще одно высокоточное значение константы  $\alpha$  методом рамановской спектроскопии цезия [30];
- существенное уточнение отношения масс протона и электрона, полученное принципиально новым способом [31] (некоторый сдвиг результата и уменьшение погрешности);
- некоторый сдвиг величины постоянной Планка  $h$  и связанных с ней констант ( $e$ ,  $K_J$ ,  $N_A$ ,  $\mu_B$ ) и увеличение ее погрешности в связи с разбросом данных (обсуждение рис. 3 и ссылки см. в [1]);
- сдвиг отношения масс мюона и электрона (в связи с ранней слишком оптимистической оценкой погрешности теории<sup>7</sup>);
- сдвиг аномального магнитного момента мюона  $a_\mu$ , определенного в [14] на основе теории, а в [1] на основе улучшенного эксперимента [33] и теории, в которой пересмотрены адронные вклады (как их величина [34], так и погрешность [35]);
- существенный прогресс в определении гравитационной постоянной  $G$  (погрешность  $G$  в обоих Соглашениях определяется не точностью отдельных данных, а их разбросом (рис. 5); ситуация с согласованностью данных в 2002 г. улучшилась (обсуждение и ссылки см. в [1]).

Заметим, что погрешности не всех результатов убывают со временем. В некоторых случаях новые данные противоречат более ранним или находятся новые источники погрешности, и в итоге точность понижается. Некоторые константы заметно меняются от Соглашения к Соглашению, которое сейчас проводится раз в четыре года (публикации в 2000 г. по результатам 1998 г. [14], в 2004 г. по результатам 2002 г. [1]). Однако более



**Рис. 4.** Прогресс в повышении точности определения значений фундаментальных физических констант (1969–2002 гг.).

<sup>7</sup> На наш взгляд, эта погрешность занижена и в современном значении (реалистичное обсуждение погрешности можно найти в [32]).



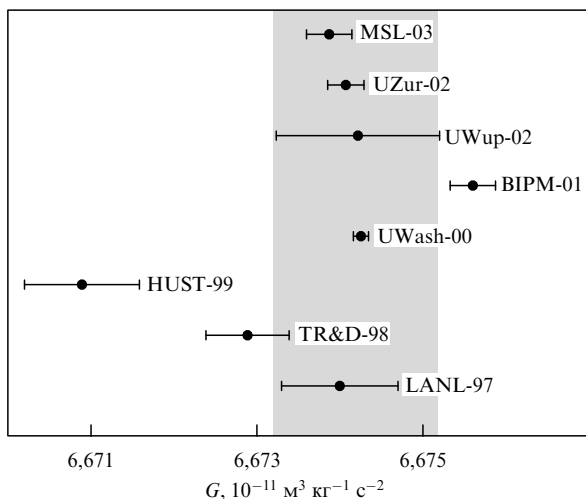


Рис. 5. Определение гравитационной постоянной. Заштрихованная область отвечает рекомендованному значению. Ссылки можно найти в [1].

раннее Согласование относится к результатам 1986 г. [13].

Почему же рекомендованные значения не публикуются чаще? Казалось бы, успешным примером могут служить свойства элементарных частиц, публикуемые раз в два года, причем объем этих публикаций (см., например, [25]) заметно превышает объем публикаций CODATA [1]. Публикации [25] — результат работы большого коллектива (более ста человек), причем большая часть разделов представляет собой компиляции экспериментальных данных, выполненные независимо друг от друга. Основной поток работ в области теоретический, однако компиляции касаются теоретических работ только в крайних случаях.

Ситуация с константами принципиально иная. Во-первых, нет никакого смысла публиковать компиляции экспериментальных данных. Они относятся к разным величинам. Во-вторых, в их обработку критически вовлечена теория. В-третьих, часто нельзя ограничиться только теми экспериментами, где непосредственно измеряется интересующая нас величина. Поясним ситуацию на примере массы мюона (вернее, отношения масс мюона и электрона). Имеется несколько типов экспериментов, в которых можно определить эту величину.

1. При измерении прецессии спина мюона или определении положений уровней Брейта–Раби в магнитном поле имеются сравнительно небольшие поправки к магнитным моментам, однако важно, что магнитный момент мюона можно измерить лишь в относительных единицах. В качестве единиц используется магнитный момент протона. Для перехода к массе необходимо воспользоваться равенством

$$\frac{m_\mu}{m_e} = (1 + a_\mu) \frac{\mu_B}{\mu_p} \left| \frac{\mu_p}{\mu_\mu} \right|, \quad (18)$$

где для отношения масс необходимо определить в отдельных исследованиях аномальный магнитный момент мюона  $a_\mu$  и магнитный момент протона в единицах магнетона Бора.

2. Можно измерять отношение масс  $m_\mu/m_e$  непосредственно. Такое отношение возникает при сравнении

частот  $(1s - 2s)$ -перехода в водороде и мюонии. В этом случае важную роль играет квантово-электродинамическая теория.

3. Доминирующее при Согласовании [1] численное значение происходит из измерений и вычислений *сверхтонкого расщепления* основного состояния в атоме мюонии. Квантово-электродинамическая теория играет здесь ключевую роль. После учета всех поправок можно перейти от реально наблюдаемого расщепления к его наивному значению — так называемой энергии Ферми, которая отвечает нерелятивистскому взаимодействию магнитных моментов электрона и мюона, и в результате можно найти отношение  $\mu_\mu/\mu_B$ .

Таким образом, в разных экспериментах непосредственно измеряются разные константы, а для их интерпретации нужны значительные теоретические усилия и дополнительные измерения.

Вовлечение данных других экспериментов в прецизионной метрологии иногда принимает формы, совершенно непривычные для физика. Несколько преувеличивая, можно сказать что в ряде случаев реально измеряются совсем не те константы, которые объявляются измеренными. Приведем пример. Для определения постоянной тонкой структуры  $\alpha$  можно определить отношения  $h/m$  и воспользоваться выражением (17). Подобный эксперимент был проведен для нейтрона [36], однако его интерпретация оказалась существенно сложнее. Дело в том, что для прецизионного определения дебройлевской длины волны нейтрона использовалась кристаллическая решетка и, следовательно, измерялась величина  $h/m_n v_n d$  (где  $d$  — постоянная решетки), а скорость нейтрона  $v_n$  определялась отдельно в "макроскопических" единицах (т.е. безотносительно к решетке).

В нескольких международных центрах имеется большой опыт относительных измерений (сравнений) постоянных решеток разных кристаллов между собой, и эта операция выполняется сравнительно просто и надежно. Решетка, использованная в нейтронном эксперименте, сравнивалась с решеткой, постоянная которой была измерена в единицах СИ (метрах). В то же время эта абсолютно калиброванная решетка использовалась для измерений постоянной Авогадро, в частности для определения постоянной решетки идеального кристалла. Конечно, идеальных кристаллов не бывает, однако вырастить специальный кристалл и оценить поправки к его параметрам (в связи с неидеальностью) можно.

Выяснилось, что идеальные кристаллы, выращенные и исследованные в разных лабораториях, дают разные результаты для постоянных решеток. После сравнения результатов, а собственно решеток оказалось, что постоянные решеток совместимы. Это означает, что имеется несколько противоречивых экспериментов по абсолютному измерению постоянной решетки, тогда как сравнения постоянных осуществлялось правильно (детальное обсуждение и ссылки см. в [1]). Однако проблема постоянной решетки и идеальных кристаллов выходит далеко за пределы эксперимента по измерению комптоновской длины волны нейтрона.

Другим примером является измерение гиромангнитного отношения протона и ядра гелия-3 и постоянной Фарадея (см. рис. 1 и 2). Во всех прецизионных электрических экспериментах измерения проводятся на самом деле не в единицах СИ, а в условных единицах, иначе говоря, с помощью эффекта Джозефсона и квантового эффекта

Холла. В итоге, кроме номинально измеряемой константы, появляются характерные множители вида

$$K_J^n R_K^m,$$

что, конечно, меняет интерпретацию эксперимента.

Еще одним важным обстоятельством, отличающим работу по Согласованию констант [1] от компиляции данных [25], является то, что все данные [1] скоррелированы. Как отмечалось выше, данные разбиваются на блоки, корреляции между которыми незначительны, но существуют. Кроме того, необходимо это проверять. При несопоставимой точности корреляции могут возникнуть в случае, если менее точные данные не согласуются с более точными и имеются общие систематические эффекты. Например, точности определения аномальных магнитных моментов электрона и мюона несопоставимы, однако теории в значительной степени аналогичны. Если возникнут сомнения в надежности расчетов КЭД для одной константы, то и другую необходимо рассматривать как ненадежную. Другим примером являются данные для измерения постоянной Авогадро. Погрешность этой постоянной определяется погрешностями измерений плотности, тогда как постоянная решетки известна гораздо лучше. Тем не менее за систематические эффекты могут быть ответственны одни и те же дефекты кристаллов.

При разногласии различных данных возникает вопрос о том, как их корректно учитывать. При этом часто речь идет не столько о статистической обработке данных, сколько о переоценке их погрешностей и поиске систематических эффектов. Аналогичный вопрос возникает в случае существенного улучшения точности, при использовании принципиально нового метода и в ряде других случаев. Критическое рассмотрение исходных данных является важной частью работы по Согласованию констант, что отличает Согласование от простой компиляции оригинальных результатов и их совместной обработки по методу наименьших квадратов.

## 4. Приложения фундаментальных физических констант

### 4.1. Квантовая электродинамика и фундаментальные физические константы

Как уже отмечалось, квантовая электродинамика играет особую роль в определении значений фундаментальных физических констант. Исследуя свободные частицы и простые атомы, можно с высокой точностью определить значения постоянной Ридберга  $R_\infty$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , отношение масс электрона и протона  $m_e/m_p$ , отношение их магнитных моментов  $\mu_e/\mu_p$ ,  $g$ -факторы электрона и мюона, массу и магнитный момент мюона в естественных единицах (например, отношения  $m_\mu/m_e$  и  $\mu_\mu/\mu_p$ ) и некоторые другие величины. Все эти величины можно получить или несколькими способами, вовлекающими КЭД (проверяя тем самым ее самосогласованность), или методами, независимыми от КЭД (делая ее абсолютную проверку или проверяя ее согласованность с нашим пониманием некоторых явлений из других областей физики). Из-за ограниченного объема данного обзора мы не можем дать подробный анализ приложений КЭД к определению

фундаментальных констант (см., например, [19]). Мы лишь очертим круг основных квантово-электродинамических явлений, важных для этих констант.

Прежде всего отметим, что эта область в значительной степени близка к *прецизионным низкоэнергетическим проверкам квантовой электродинамики* и в ней могут фигурировать четыре типа погрешностей:

1) экспериментальная погрешность собственно измеряемой величины (например, сверхтонкого расщепления в мюонии или частоты  $(1s - 2s)$ -перехода в водороде);

2) теоретическая погрешность, связанная с собственно квантово-электродинамическими вычислениями (численные расчеты, оценка неизвестных вкладов и т.д.);

3) погрешность расчетов, связанная с точностью входящих в вычисления фундаментальных констант (постоянной Ридберга, постоянной тонкой структуры, массы мюона и др.);

4) погрешность вычисления не-квантово-электродинамических вкладов (например, учет вкладов адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона и эффектов структуры ядра для сверхтонкого расщепления и  $(1s - 2s)$ -перехода в водороде требует дополнительных экспериментов, и точность полученных при этом данных не является в ряде случаев полностью удовлетворительной).

В настоящее время квантово-электродинамические расчеты для свободных частиц и двухчастичных атомов (водорода, дейтерия, мюония, водородоподобных ионов), имеющих метрологические приложения, не лимитируют ни в одном случае точность сравнения теории и эксперимента [19]. Лимитирующими факторами в разных случаях могут являться структура ядра и точность вычисления адронных вкладов, экспериментальная погрешность, точность определения значений необходимых констант, но не собственно КЭД-теория. В случае трехчастичных атомов, таких как нейтральный гелий, и в более сложных системах точность квантово-электродинамических расчетов может быть не столь высока. Важно также понимать, что с точки зрения решаемых задач и возникающих при этом проблем имеются две существенно разные области прецизионного применения квантовой электродинамики.

1. В теории свободных частиц проблемы возникают в связи с большим числом сложных многопетлевых диаграмм, состоящих из простых блоков. В случае чисто электронного вклада четвертого порядка в аномальный магнитный момент электрона речь идет о 891 четырехпетлевой диаграмме, состоящей из свободных пропагаторов электрона и фотона.

2. В теории связанных состояний наиболее сложный элемент — нахождение адекватного приближения и построение эффективной теории возмущения со связанными частицами. Диаграмм сравнительно мало, и они просты, но блоки, из которых они состоят, учитывают эффекты связанности и существенно отличаются от свободных пропагаторов. Появление связанных состояний уже само по себе является непертурбативным эффектом и, следовательно, отвечает некоторому суммированию бесконечного числа свободных графиков, вследствие чего теория возмущений требует перестройки и приобретает более сложный характер. Современное состояние дел в прецизионной физике простых атомов представлено в [37, 38].

Обсудим кратко основные квантово-электродинамические явления, исследуемые с высокой точностью.

Прецизионные КЭД-расчеты для свободных частиц исчерпываются теорией аномальных магнитных моментов электрона и мюона  $a_e$  и  $a_\mu$ . Высокоточное измерение и вычисление константы  $a_e$  является основным источником определения значения постоянной тонкой структуры  $\alpha$  в [1, 14]. В целом остальные значения для  $\alpha$  в [1] менее точны, но согласуются с  $\alpha(a_e)$  (см. рис. 1). В случае мюона магнитный момент  $a_\mu$  представляет некоторый интерес как изолированная константа. Более важным является, может быть, то, что при существующих методах КЭД-расчетов имеют место значительные корреляции между расчетами для  $a_e$  и  $a_\mu$ , однако их трудно выразить количественно.

Определение постоянной Ридберга основано на прецизионной спектроскопии водорода и дейтерия. При ее определении необходимо измерить как минимум два перехода для разделения вклада постоянной Ридберга и КЭД-вклада (лэмбовского сдвига). Уже само определение значения  $R_\infty$  является некоторой проверкой КЭД, поскольку число точно измеренных переходов превышает минимально необходимое. После определения постоянной Ридберга и лэмбовского сдвига можно приступить к более содержательной проверке КЭД: проверке теории лэмбовского сдвига, являющейся одной из наиболее важных проверок квантово-электродинамических методов в теории связанных состояний. Проверка наиболее чувствительна к эффектам, отвечающим электрону во внешнем поле (кулоновском поле бесконечно тяжелого ядра).

Сверхтонкое расщепление в мюонии некоторое время служило для определения постоянной тонкой структуры. При современной точности оно представляет больший интерес для определения отношений  $m_\mu/m_e$  и  $\mu_\mu/\mu_p$ . Теория сверхтонкого расщепления качественно отличается от теории лэмбовского сдвига, поскольку в первом случае эффекты отдачи гораздо важнее. Поэтому исследование сверхтонкого расщепления в мюонии — это проверка еще одного сектора КЭД для связанных состояний. В случае сверхтонкого расщепления в водороде эффекты конечных размеров и структуры ядра оказываются крайне велики по сравнению с точностью КЭД-расчетов. Поэтому мюоний, свободный от этих эффектов, крайне привлекателен как пробный КЭД-атом.

Магнитные моменты связанных частиц в двухчастичных атомах отличаются от свободных, однако их сравнительно легко измерять, а поправки на эффекты связанности сравнительно легко вычисляются. Измерения проводят, помещая атомы в однородное магнитное поле. Исследования подобного типа играют важную роль для определения целого ряда констант:

- исследования в мюонии позволяют найти  $\mu_\mu/\mu_p$ ;
- измерения в водороде и дейтерии приводят к наиболее точным результатам для  $\mu_p/\mu_e$  и  $\mu_d/\mu_e$ ;
- эксперимент с водородоподобными углеродом и кислородом (сравнение частоты прецессии спина иона и ионной циклотронной частоты) позволяет наиболее точно определить  $m_e/m_p$ .

Ожидается, что исследования лэмбовского сдвига в мюонном водороде позволят существенно уточнить зарядовый радиус протона и тем самым повысить точность и надежность теоретических вычислений для

лэмбовского сдвига в обычном водороде, что в свою очередь скажется на определении постоянной Ридберга.

Недавний прогресс в теории и эксперименте по тонкой структуре гелия позволяет надеяться, что в недалеком будущем исследования гелия приведут к новому методу определения  $\alpha$ .

Имеется еще некоторое количество величин, представляющих интерес с точки зрения проверок работоспособности современных подходов КЭД к проблеме связанных состояний, но не имеющих приложений к фундаментальным константам: различные частоты переходов в спектре позитрония и его аннигиляционные ширины, сверхтонкое расщепление возбужденного  $2s$ -состояния в водороде, дейтерии и ионе гелия-3 (подробнее см. в [19]) и некоторые спектральные характеристики многозарядных ионов и мюонных атомов [37, 38].

#### 4.2. Макроскопические квантовые явления и единицы электрических величин

Как отмечалось выше, система электромагнитных единиц имеет свою специфику. Возможно несколько сценариев реализации такой системы. Основными единицами могут служить ампер, вольт и ом, причем единицу сопротивления можно в принципе заменить на единицу емкости или индуктивности. Эти три основных единицы могут быть "независимы". В этом случае, для того чтобы они совпадали с единицами СИ, необходимо выполнение трех условий:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}, \quad (19)$$

$$\text{Вт}_* = \text{А} \cdot \text{В}_*, \quad (20)$$

$$\text{В}_* = \text{А} \cdot \text{Ом}_*. \quad (21)$$

Если единицы "независимы", это означает, что измерения проводятся в условных единицах, которые реализуются не на основе СИ, а их соответствие системе СИ представляет собой отдельную задачу, и одно или несколько выписанных выше условий могут нарушаться. Если же единицы с самого начала реализуются как единицы СИ, все три условия (19)–(21) выполняются автоматически. Чтобы отличать "независимые" условные единицы от единиц системы СИ, мы отмечаем их звездочкой.

Несоблюдение последнего из условий (21) означает, что система электрических единиц не самосогласована и в ней, например, в нарушение закона Ома появляется дополнительный коэффициент. Соблюдение двух остальных условий (19) и (20) не играет особой роли, так как "электрический" ватт можно представить несколькими способами:  $\text{А} \cdot \text{В}_*$ ,  $\text{А}^2 \cdot \text{Ом}_*$  или  $\text{В}_*^2 \cdot \text{Ом}_*^{-1}$ . При несоблюдении закона Ома эти три единицы мощности будут разными. Аналогичная ситуация имеет место и с интерпретацией первого равенства (19).

Если условие (21) соблюдается, то, напротив, выполнение условия (20) становится осмысленным: оно контролирует согласованность механических и электрических единиц. Если эти единицы согласованы, то необходимо проверить условие (19), позволяющее ответить на вопрос: имеем ли мы дело с ампером СИ или со слегка отличным ампером. Так, если определим единицу заряда в терминах заряда электрона и соответственно остальные электрические величины, то условия (20) и (21) будут соблюдаться и система электрических единиц будет

самосогласована и согласована с механическими единицами, однако ампер, определенный подобным образом, будет отличаться от ампера системы СИ.

Разные сценарии реализации электрических единиц зависят от того, сколько единиц реализуются как "независимые". Имеются четыре принципиальных возможности.

1. Можно воспроизводить все электрические единицы строго в соответствии с определениями СИ, и в этом случае "независимых" единиц не будет.

2. Можно реализовать систему с одной "независимой" электрической единицей, нарушая условие (19).

3. С практической точки зрения наименьшее число "независимых" единиц — две. Это позволяет реализовать самосогласованную систему высокостабильных эталонов единиц всех электротехнических величин. При этом нарушаются условия (19) и (20), но это важно лишь для ограниченного круга измерений.

4. Систему, основанную на двух "независимых" единицах можно сделать на основе квантовых макроскопических явлений. При сравнении условных единиц и единиц СИ можно использовать соответствующие значения фундаментальных физических констант, однако точность измерений в единицах СИ будет ниже, чем точность измерений в условных "независимых" единицах. Одна из проблем, возникающих при этом, — адекватность наших представлений о квантовых макроскопических явлениях. Система эталонов с тремя "независимыми" единицами отчасти решит эту проблему. Если наше понимание квантовых макроскопических явлений и созданных на их основе эталонов правильное, то закон Ома (условие (21)) будет выполняться. Если же имеются неучтенные теоретические погрешности в описании макроскопических квантовых явлений или систематические ошибки в реализации эталонов, то закон Ома нарушается.

В настоящее время имеет место система эталонов, основанная на "независимых" эталонах ома и вольта, однако ведутся исследования по созданию "независимого" эталона ампера.

Привлекательность макроскопических квантовых явлений в метрологии связана с редким сочетанием "квантовости" и "макроскопичности". Так, большинство квантовых явлений проявляется на атомном масштабе (или на более коротких расстояниях ядерной физики и физики элементарных частиц), и характеристики этих явлений трудно сравнивать с макроскопическими объектами. Между тем эталоны единиц должны быть макроскопическими приборами. Макроскопические квантовые явления позволяют сравнительно легко построить макроскопические приборы, частично имеющие квантовые характеристики, которые в силу своей природы сводятся к естественным константам.

Имеются три эффекта, чрезвычайно привлекательные с точки зрения создания эталонов единиц основных электрических величин:

- эффект Джозефсона, при котором разность потенциалов  $U_n^{(JE)}$  может принимать только специальные фиксированные значения;
- квантовый эффект Холла, при котором сопротивление  $R_n^{(QHE)}$  приобретает квантованные значения;
- одноэлектронное туннелирование, при котором квантуется ток  $I^{(SET)}$ .

Соответствующие уравнения имеют вид

$$U_n^{(JE)} = \frac{nv}{K_J}, \quad (22)$$

$$R_n^{(QHE)} = n R_K, \quad (23)$$

$$I^{(SET)} = Q_e \nu, \quad (24)$$

где

$$K_J = \frac{2e}{h}, \quad (25)$$

$$R_K = \frac{h}{e^2}, \quad (26)$$

$$Q_e = e, \quad (27)$$

$n$  — некоторое целое число,  $\nu$  — измеряемая частота. Обозначение  $Q_e$  не является общепринятым и часто в уравнение (24) сразу включают  $e$ . Мы этого не делаем по причине, изложенной ниже.

Если теория трех упомянутых макроскопических квантовых эффектов и реализация эталонов отвечают приведенным выше равенствам, то

$$K_J R_K Q_e = 2. \quad (28)$$

Если же имеются погрешности, то равенство (28) не соблюдается, и тогда единицы, основанные на соотношениях (22)–(27), нарушают закон Ома. Поэтому при проверке условия (28) важно различать  $Q_e$  и  $e$ .

В настоящее время эффекты Джозефсона и квантовый эффект Холла успешно применяются в эталонах, тогда как одноэлектронное туннелирование является перспективным направлением научных исследований и не достигает пока эталонных точностей. В 1988 г. Международным комитетом мер и весов СИРМ были приняты практические рекомендации по воспроизведению и поддержанию эталонов ома и вольта [5–7]. Рекомендации вступили в силу с 1 января 1990 г., и соответствующие единицы носят название ом-1990 ( $Om_{90}$ ) и вольт-1990 ( $V_{90}$ ). Эти единицы определены на основании уравнений (23) и (22) и фиксированных значений фундаментальных констант, входящих в эти уравнения, и их погрешностей. Соответствующие значения представлены в табл. 11.

Рекомендации СИРМ можно читать двояко:

- используя значения констант без погрешностей [5, 6], можно работать с условными единицами ( $Om_{90}$  и  $V_{90}$ ), которые универсально определены во всем мире, но нарушают соотношения (19) и (20);
- принимая значения с погрешностями [5, 7], можно проводить измерения в единицах СИ, но с потерей точности.

Таблица 11. Рекомендованные СИРМ значения постоянных Джозефсона [5] и фон Клитцинга [6, 7]

Константа	Обозначение	Численное значение в условных единицах	Численное значение в единицах СИ	Относительная погрешность (в единицах СИ)
Постоянная Джозефсона	$K_J$	483 597,9 ГГц $V_{90}^{-1}$	483 597,9(2) ГГц $V^{-1}$	$4 \times 10^{-7}$
Постоянная фон Клитцинга	$R_K$	25 812,807 $Om_{90}$	25 812,8070(25) Ом	$1 \times 10^{-7}$

Комментируя практические *рекомендации по воспроизведению единиц* (см., например, [4–8]), необходимо помнить о специфике метрологии (см. раздел 1). Подход к оценке точности в официальных метрологических документах существенно отличается от чисто научного подхода в пользу большей надежности (ввиду возможных юридических последствий). Работы [4–8] и другие публикации, представляющие рекомендации, как правило, являются перепечаткой или изложением официальных документов, подготовленных соответствующими консультативными комитетами и утвержденных Международным комитетом мер и весов. Погрешности, использованные в этих рекомендациях, отличаются от погрешностей тех же величин, приведенных в научных компиляциях, таких как материалы CODATA [1].

Рекомендованные значения CODATA [1] являются результатом рабочей группы по фундаментальным константам и *не содержат* рекомендаций по воспроизведению единиц, что позволяет решать задачу о наиболее точных согласованных значениях фундаментальных констант. Прогресс в области электрических стандартов проиллюстрирован в табл. 12 и 13, где приведены некоторые результаты *прямых* измерений констант  $K_J$  и  $R_K$ .

**Таблица 12.** Результаты прямых измерений постоянной Джозефсона  $K_J$ , вошедшие в Согласование [1]

Постоянная Джозефсона $K_J$	Относительная погрешность	Литература
483 597,91(13) ГГц В <sup>-1</sup>	$2,7 \times 10^{-7}$	[39]
483 597,96(15) ГГц В <sup>-1</sup>	$3,1 \times 10^{-7}$	[40]

**Таблица 13.** Результаты прямых измерений постоянной фон Клитцинга  $R_K$ , вошедшие в Согласование [1]

Постоянная фон Клитцинга $R_K$	Относительная погрешность	Литература
25 812,803 31(62) Ом	$2,4 \times 10^{-8}$	[41]
25 812,807 1(11) Ом	$4,4 \times 10^{-8}$	[42]
25 812,809 2(14) Ом	$5,4 \times 10^{-8}$	[43]
25 812,808 4(34) Ом	$1,3 \times 10^{-7}$	[44]
25 812,808 1(14) Ом	$5,3 \times 10^{-8}$	[45]

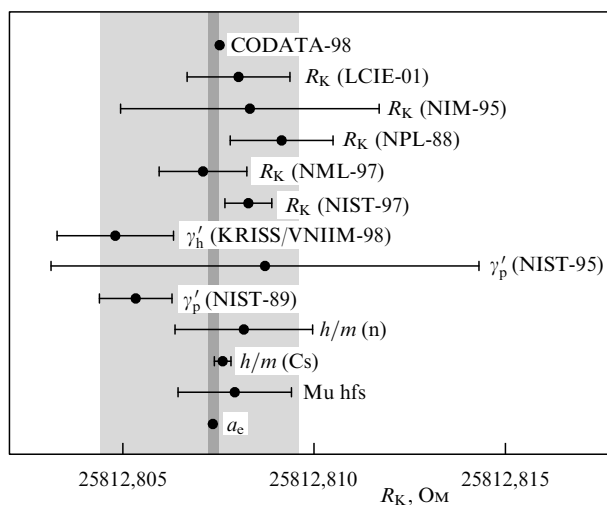
Подчеркнем, что в результатах Согласования доминируют *непрямые* определения констант  $K_J$  и  $R_K$ , что отвечает современной стратегии воспроизведения единиц. *Прямые* измерения близки к традиционному способу воспроизведения: константы  $K_J$  и  $R_K$  определяются путем сравнения квантовых стандартов (поддерживающих условные единицы) и классических стандартов (воспроизводящих единицы СИ) и в значительной степени сталкиваются с теми же проблемами. Аналогичную роль играют и прямые измерения величины [46, 47]

$$K_J^2 R_K = \frac{4}{h}, \tag{29}$$

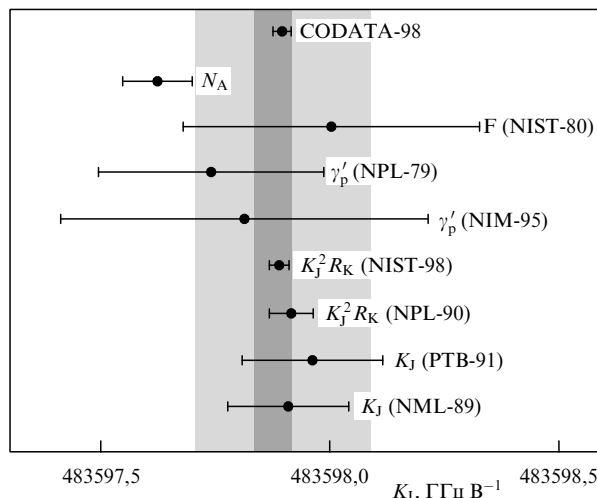
реализующей "электрическое" определение постоянной Планка.

Формальный статус ома и вольта в современной системе единиц (при отсутствии подходящего термина) мы охарактеризовали бы как *согласуемые единицы*. Отметим важное обстоятельство: выработка юридиче-

ского документа (рекомендаций) — гораздо более сложная и трудоемкая процедура, в результате официальные рекомендации публикуются сравнительно редко и с некоторой задержкой. Так, после 1988 г. новые рекомендации СИРМ по практической реализации размеров вольта и, следовательно, по значению постоянной Джозефсона не публиковались. В публикации [7] точность определения постоянной фон Клитцинга удвоена, однако и по сей день обе константы существенно уступают по точности рекомендованным значениям CODATA (рис. 6 и 7). В силу этого мы рекомендуем дифференцированный подход к использованию официальных рекомендаций. При проведении научных исследований разумно воспользоваться для постоянных фон Клитцинга и Джозефсона рекомендованными значениями CODATA [1] или даже оригинальными результа-



**Рис. 6.** Определение постоянной фон Клитцинга  $R_K$ . Индексы отвечают непосредственно измеряемой величине. Широкая полоса отвечает рекомендованному значению СИРМ [7], узкая полоса — рекомендованному значению CODATA [1]. Разъяснения и ссылки на экспериментальные работы можно найти в [1].



**Рис. 7.** Определение постоянной Джозефсона  $K_J$ . Индексы отвечают непосредственно измеряемой величине. Широкая полоса отвечает рекомендованному значению СИРМ [5], узкая полоса — рекомендованному значению CODATA [1]. Разъяснения и ссылки на экспериментальные работы можно найти в [1].

тами, тогда как при создании эталонов или коммерческих приборов необходимо строго следовать рекомендациям СИРМ.

## 5. Заключение

Фундаментальные физические константы играют все большую роль в современных эталонах. Они позволяют сделать наши единицы более естественными и универсальными. Это делает систему эталонов "демократичной". Сравнительно широкий круг пользователей поддерживает размеры единиц на основе квантовых явлений и использует их в различных измерениях. Узкий круг специалистов определяет значения природных параметров, необходимых для того, чтобы поддерживаемые единицы совпадали с единицами системы СИ. Если прецизионные измерения значений констант требуют очень сложных экспериментов, сравнимых с классическими стандартами, то реализация эталонов, поддерживающих естественные единицы, может быть доступна почти что рядовому потребителю.

Важно отметить, что прямая "аппаратная" связь между двумя группами исследователей (использующих эталоны и определяющих истинные размеры единиц) сведена к минимуму (контрольная проверка, аттестация) или вовсе отсутствует. Достаточно вспомнить ситуацию с эталоном секунды. В классической схеме время определялось астрономически, затем в несколько этапов часы рядового потребителя сравнивались с главными часами, калиброванными по движению Земли. Теперь цезиевые часы можно просто купить. В отличие от других квантовых стандартов никакую константу в этом случае измерять не нужно: она встроена в систему СИ по определению. Одна из наиболее фундаментальных констант — скорость света  $c$  напрямую входит в определение системы СИ. Рекомендации по воспроизведению ома и вольта СИ также связаны с фундаментальными константами, но их значения получены путем измерений.

В то же время правильное понимание исследований в области фундаментальных констант и естественных единиц позволяет лучше понять природу. Одно из пересечений современных эталонов и фундаментальной физики — поиски возможных изменений значений фундаментальных физических констант со временем.

Необходимо большее понимание физики на малых расстояниях, которое может существенно изменить наш подход к фундаментальным константам. Важно сделать шаг от эффективных наблюдаемых параметров (заряд электрона, массы электрона и протона), с которыми мы имеем дело на практике, к более фундаментальным величинам. Однако наше понимание (на количественном уровне) относится скорее к отрицанию ряда неразумных предположений (таких, как дираковская гипотеза больших чисел, предполагающая линейное изменение некоторых констант со временем), нежели к конструктивным теориям с проверяемыми предсказаниями. Очень вероятно, что шаг к пониманию физики на малых расстояниях и действительно фундаментальных констант будет сделан не слишком скоро.

Тем не менее "эффективные" константы, с которыми мы постоянно встречаемся в эксперименте и значения которых приведены в данном обзоре, будучи не вполне фундаментальными константами с точки зрения современной теории, играют фундаментальную роль в совре-

менной физике, определяя нашу способность к прецизионным измерениям и реализации системы единиц, наиболее полно отвечающей современным требованиям как фундаментальной физики, так и многих практических приложений. Для науки, основанной на эксперименте, это не так мало.

**Благодарности.** Автор настоящего обзора является членом международной рабочей группы CODATA по фундаментальным физическим константам и членом комиссии SUNAMCO (Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Mass and Fundamental constants) Международного союза чистой и прикладной физики IUPAP. Однако, за исключением данных по рекомендованным значениям фундаментальных констант, представленных в табл. 1, 2, 4, 6–8, данный обзор выражает лишь мнение автора. Рекомендованные значения представляют собой результаты рабочей группы CODATA, и автор благодарен П. Мору (P. Mohr) и Б. Тэйлору (B. Taylor) за предоставление результатов Согласования до их публикации [1] и за связанные с ними обсуждения.

Автор глубоко признателен Н.Д. Виллевалде, Э.О. Гобелю (E.O. Göbel), Л.Б. Окуню, С.И. Эйделману и В.А. Шелюту за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 02-02-07027, 03-02-16843).

## 6. Дополнение.

### О Международной системе единиц СИ

#### 6.1. Основные единицы системы СИ

Международная система единиц СИ предполагает семь основных единиц (табл. 14). Эти единицы определены существенно разными способами в целях создания наиболее точных и стабильных эталонов и обеспечения возможности наиболее точных измерений в терминах этих единиц. Так, секунда определена с помощью естественной единицы времени (частоты) — сверхтонкого расщепления в цезии, тогда как килограмм является последним представителем единиц, определенных на основе артефакта.

Фактически только три единицы являются бесспорно независимыми: единицы массы, времени и длины. В последней версии системы СИ [2] единица длины (метр) определена как расстояние, проходимое светом за определенное время. Конечно, такое определение крайне непрактично, и в реальности воспроизведение метра связано с длиной волны электромагнитного излучения с известной частотой. С физической точки зрения эти два подхода эквивалентны, однако принятое определение доступно для более широкой аудитории, что принципиально важно.

Таблица 14. Основные единицы Международной системы СИ

Физическая величина	Единица СИ	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Электрический ток	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд

Может возникнуть подозрение, что с принятием такого определения единица длины становится производной от единицы времени, но это не так. Единица длины является производной единицы времени и естественной единицы скорости (каковой является скорость света в вакууме). Таким образом, число независимых единиц остается неизменным. По ряду причин удобно сохранить за метром его статус как основной единицы.

Единицы термодинамической температуры и количества вещества не являются вполне независимыми, однако они не могут рассматриваться и как производные единицы, поскольку переводные множители, вообще говоря, неизвестны и являются предметом измерений. Определение единицы силы тока (ампера) выглядит как определение производной единицы, и в системе СГС эта единица и была производной. Вопрос о статусе ампера не является бесспорным и существуют разные точки зрения по этому вопросу. Наша позиция изложена в разделе 6.2. По нашему мнению, система единиц СИ не безупречна и ампер — это не единственная единица, которая требует комментариев.

Кроме перечисленных основных единиц, имеются "геометрические" единицы (радиан,стерадиан), имеющие статус *дополнительных единиц*. Проблема единиц тесно связана с проблемой размерности. Безразмерные величины не нуждаются в единицах, однако часто приходится иметь дело с удельными величинами, соотношенными с одним атомом (одной молекулой) или некоторым числом атомов (молекул). Формально число атомов — величина безразмерная, а масса, отнесенная к одному атому, имеет такую же размерность, как и "просто" масса. На практике эта величина (число атомов) иногда рассматривается как размерная.

Не вдаваясь в детали системы СИ, отметим, тем не менее, специфический статус единицы силы света — *кандель*. Кандела определена как "световой поток в заданном направлении от источника, который излучает на частоте  $540 \times 10^{12}$  Гц и который имеет угловой поток в этом направлении, равный  $1/683$  ватт настерадиан". Это определение выглядит вполне строго. В то же время в приложении 2 официального описания системы СИ [2] сказано<sup>8</sup>: "Определение кандеры дано на странице 98 (работы [2]) в строго физических терминах. Однако целью фотометрии является измерение светового потока таким образом, чтобы результат измерения наиболее близко коррелировал с *ощущениями человеческого глаза*". Эта единица принципиально отличается от Вт  $\text{sr}^{-2}$ , а соответствующая величина (световой поток) отвечает не физической величине, а воздействию некоторого физического фактора (потока света) на глаз человека.

На наш взгляд, такая единица является излишней в системе физических единиц. Мы знаем, что есть ряд физических явлений (свет, звук, радиация и т.д.), которые весьма специфически влияют на человека или субъективно детектируются человеком. Эффект влияния или детектирования зависит как от поглощенной энергии

(или мощности), пропорциональной потоку энергии, так и от чувствительности, зависящей от частоты и, возможно, других обстоятельств. Потоки, дозы и т.д. могут измеряться физическими приборами в обычных единицах (в частности, в Вт  $\text{sr}^{-2}$  вместо кандеры), а чувствительность человека может и должна учитываться методиками, принятыми соответствующими метрологическими организациями, ведающими как вопросами физики, так и вопросами биологии и медицины. При этом единицы могут иметь специальные названия, аналогичные "биологическому эквиваленту рентгена", что дает явное указание на физическую единицу, принятую за основу, и учитывает дополнительные нефизические факторы. Эти единицы ни в коем случае не должны быть единицами СИ, поскольку СИ — система единиц физических величин.

Ясно, что выбор в подобной ситуации крайне ограничен. По соглашению можно принять соответствующую функцию, учитывающую влияние света на глаз человека. В этом случае речь идет о моделировании субъективной нефизической величины при помощи некоторой физической величины и возникает вопрос о степени произвольности модели и ее соотношения с соглашением СИ. Или можно измерять реальную функцию, отвечающую чувствительности человеческого глаза. Тогда, возможно, необходимо вводить специальную единицу, однако величина становится не физической, а в большей степени биологической или медицинской, поскольку требует четких определений двух факторов:

- "средний" человек;
- "такой же эффект" или "такое же действие".

В случае светового потока можно задаться рядом вопросов. Быстро взглянув на две части комнаты, можно сделать заключение о том, какая из них освещена лучше. Рассматривая их долгое время, человек может сделать другое заключение. И наконец, вместо вопроса о субъективном восприятии освещенности можно проводить тесты по выполнению заданий, которые критичны к освещенности (скорость, качество работы). Совсем не обязательно, что все тесты дадут одну и ту же чувствительность глаза как функцию частоты. Эти вопросы связаны не с точностью измерений, а со степенью субъективности определений измеряемых величин.

Рассмотрим более детально, как, например, решена аналогичная проблема в исследованиях с радиацией. Рентген является внесистемной единицей. В системе единиц СИ радиация и ее воздействие описываются несколько иначе. Воздействие излучения связано с ионизацией. Ионизирующая способность излучения характеризуется кинетической энергией ионов и ионизованных электронов. Их энергия на единицу массы измеряется в греях ( $1 \text{ Гр} = \text{Дж кг}^{-1}$ ).

Следуя рекомендации Международной комиссии по радиологической защите ICRP (см., в частности, [48]), проведем последовательное разделение всех величин на три типа:

- "физические величины", характеризующие собственно ионизирующее излучение и не зависящие от человека, например поглощенная доза излучения, измеряемая в греях;
- "нормированные величины", определяющие меру ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения, т.е. нефизические величины, полностью и адекватно описывающие воздействие физических факторов на

<sup>8</sup> Учитывая характер обсуждения, мы приводим английский текст цитаты: "The definition of the candela given in page 98 is expressed in strictly physical terms. The objective of photometry, however, is to measure light in such a way that the result of the measurement correlates closely with the visual sensation experienced by a human observer of the same radiation".

человека, такие как эффективная доза облучения человека, измеряемая в зивертах (Зв);

- "операционные величины", однозначно определяемые через физические характеристики поля излучения и предназначенные для оценки нормированных величин, таких как амбиентный эквивалент дозы облучения человека, также измеряемый в зивертах.

Зиверт — субъективная единица, определяемая как воздействие облучения дозой 1 Зв данного человеческого органа заданным видом излучения. Эта единица совпадает с эффектом облучения дозой 1 Гр излучением, которое имеет малую линейную передачу энергии (не более  $10 \text{ кэВ мкм}^{-1}$ ), что отвечает, например, рентгеновскому излучению.

Термин "нормированные величины" не вполне удачен. Понятно желание "нормировать" различными нормативными документами действительное воздействие облучения, однако реальная стратегия, конечно, заключается в исследовании нормированных величин в целях их наиболее адекватного описания операционными величинами (иными словами, в выработке подходящей модели) и дальнейшее использование уже операционных величин в нормативных актах.

Разделение величин на физические и нефизические и использование для них разных единиц крайне показательно и должно служить образцом для фотометрии и других аналогичных областей. Важным элементом описания воздействия облучения на человека является введение операционных величин, играющих промежуточную роль.

Напомним, что отказ от единиц, связанных со "средним" человеком, был предопределен не только повышением точности, но и тем, что само понятие "среднего" человека имеет невнятный физический статус. Например, значительная часть человечества живет в крайне бедственных условиях, что определяет соответствующий уровень здоровья. Зависят ли различные чувствительности от "среднего" состояния здоровья? Если да, то они должны меняться со временем. Кроме того, в силу социальных, исторических и климатических причин, некоторые чувствительности могут отличаться от региона к региону. Естественно также ожидать различий в чувствительности глаза людей, проводивших большую часть жизни при искусственном освещении и при естественном свете.

Подобные вопросы должны быть предметом научных исследований. Поэтому фиксация чувствительности как функции частоты может быть удобна с точки зрения законодательства в области безопасности и экологии, но не отвечает строгому определению силы света, которое связано с реальными свойствами человеческого глаза.

Таким образом, строгое определение силы света (на основе реальных свойств "среднего" человеческого глаза) приходит в противоречие с определением единицы силы света (подразумевающим некоторую фиксированную функцию чувствительности глаза). Если чувствительность — измеряемая и, следовательно, не вполне известная функция, то единица фактически является неопределенной. На наш взгляд, вовлечение в физическую систему единиц столь плохо определенных величин является шагом назад.

С точки зрения построения системы СИ важно также отметить, что единица светового потока — кандела включена в систему СИ в качестве основной единицы.

Между тем ни кандела, ни световой поток, как правило, не являются существенными элементами стандартных курсов общей физики. В то же время все остальные основные единицы (секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль) крайне необходимы уже для школьного курса физики. Введение специальной (субъективной) и не независимой единицы в качестве основной не может не удивлять.

Завершая рассмотрение, подчеркнем, что его целью является не обсуждение практической важности канделы и фотометрических величин (которая бесспорна), а их статус в системе единиц СИ.

## 6.2. Система единиц СИ

### и законы электромагнетизма в вакууме

Критики системы СИ (см., например, [9–11]) в ее применении к электромагнитным явлениям отмечают необоснованное усложнение выражений для основных законов электромагнетизма и ряд недоразумений, связанных с наличием четырех не независимых полей разной размерности —  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$ . При этом смешиваются два понятия: система единиц и система физических величин. Эти две системы возникли и развивались параллельно, однако история их появления и практика их использования — это не одно и то же. Большинство критики относится к системе величин, используемых для описания электромагнитных явлений. Сохраняя систему единиц СИ, можно перестроить практику применения величин, используемых для описания электродинамики в вакууме. Это легко сделать, учитывая их избыточность.

Допустим, мы используем только:

- электрическую постоянную  $\epsilon_0$ , выражая магнитную постоянную  $\mu_0$  через  $\epsilon_0$  и  $c$  и избегая появления  $\mu_0$  в явном виде;
- напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$  и плотность магнитного потока  $\mathbf{B}$ , избегая появления электрического смещения  $\mathbf{D}$  и напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ .

Принятие этих двух положений, как рекомендаций при преподавании и в научной сфере, позволит свести к минимуму недостатки СИ, сохранив ее достоинство.

Так, уравнения Максвелла примут вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{E} &= \frac{1}{\epsilon_0} \rho, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \frac{1}{c^2} \left[ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{j} \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Они лишь фактором  $\epsilon_0$  при источниках поля (плотности заряда и тока) отличаются от уравнений в системе СГС. Традиционная практика, конечно, восходит к идее эфира, где  $\mu_0$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$  имели самостоятельный физический смысл. Коль скоро они его утратили, нет необходимости использовать эти величины в уравнениях для вакуума.

Скорость света  $c$  также входит в уравнения (30) несколько иначе, чем в соответствующие уравнения СГС, а размерности электрического ( $\mathbf{E}$ ) и магнитного ( $\mathbf{B}$ ) полей отличаются друг от друга. Однако вопрос, является ли это недостатком, спорный. Если мы не хотим положить  $c = 1$ , то необходимо помнить, что магнитное поле отвечает чисто пространственным ком-



понентам 4-тензора  $F_{\mu\nu}$ , тогда как для электрического поля один индекс временной. Так, магнитное поле содержит член  $\partial A_i/\partial x_j$ , а электрическое —  $\partial A_i/\partial t$ . В нековариантной форме производную естественно брать именно по времени  $t$ , а не по нулевой компоненте 4-вектора  $x_0 = ct$ . Таким образом, размерности  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  должны различаться, т.е. подобно тому как  $x_0 = ct$  и  $\rho = (1/c)j_0$ , естественно определить  $\phi = (1/c)A_0$  и

$$F_{\mu\nu} = \left( \frac{1}{c} \mathbf{E}, \mathbf{B} \right). \quad (31)$$

В чем заключаются достоинства СИ? Дело не в удобных практических размерах ома, ампера, вольта и др. Проблема глубже. Сравнение электрических величин между собой можно осуществлять более просто и более точно, чем механических величин. Эта ситуация характерна для относительных измерений. В таких случаях принимается некая специальная единица (или даже единицы), а все результаты выражаются в ее (их) терминах.

Большинство таких единиц являются или внесистемными (как атомная единица массы), или неофициальными (как ядерный магнетон). Однако в некоторых особых случаях эти единицы включаются в систему единиц в качестве основных. (Например моль и кельвин в сущности являются специальными единицами числа частиц и удельной энергии вещества.) Это сделано ввиду особой важности физических величин, измеряемых в этих единицах. Учитывая важность электромагнитных измерений, целесообразно сделать то же самое и с электрическими единицами, для чего достаточно принять специальное определение одной из них. Можно фиксировать ее связь с механическими единицами (как это делается сейчас), а можно, например, выразить заряд в терминах заряда электрона (к чему приведет последовательное применение макроскопических квантовых эффектов при создании эталонов).

Почему фиксация электрической единицы через механические требует  $\epsilon_0 \neq 1$ ? Ответ находится в практической сфере. Десятилетия назад первичные эталоны, непосредственно реализующие определения, основывались на классической физике. (Речь идет о различного рода электрических весах и конденсаторах с вычисляемой емкостью.) Однако такой эталон громоздкий и непрактичный. Альтернативой могли бы быть эталоны-артефакты, аналогичные прототипу килограмма. В этом случае электрическая постоянная  $\epsilon_0 \neq 1$  была бы измеряемой величиной. Ясно, что нормальные элементы и эталонные катушки сопротивлений гораздо более уязвимы, чем эталонные гири, и при таком подходе невозможно обеспечить надежность и долговременную стабильность.

Как показывает опыт, самая большая погрешность в эталоне-артефакте — систематическая. Эталон может давать воспроизводимые результаты и использоваться для измерений. Учитывая скорее неизбежное, чем возможное, наличие медленного дрейфа параметров (связанного, в частности, со старением элементов эталона), воспроизводимость можно контролировать за относительно небольшие промежутки времени, тогда как долговременную воспроизводимость крайне трудно проверить. Параллельно с использованием эталона для измерений и реализации стандартов производных единиц

должны проходить проверки эталона на наличие дрейфов и выявление неучтенных систематических эффектов. Последнее было возможно, так как эталон являлся, как правило, набором артефактов одного типа (например, нормальных элементов), и поэтому дрейфы можно оценивать, изучая относительные дрейфы и т.д.

Стратегия заключалась в комбинировании двух типов эталонов: первичных, основанных на определениях СИ, и эталонов-артефактов. При этом артефакты калибровались по первичным эталонам. Характер погрешностей был таков, что было удобно принимать "промежуточные" результаты как условные единицы (например, ампер-1969), которыми можно было пользоваться до последующих уточнений. "Окончательных" результатов быть не могло в принципе, поскольку эволюция свойств громоздких прецизионных макроскопических приборов неизбежна, причем это относится и к первичным эталонам из-за их громоздкости и неизбежных систематических эффектов. Размеры электрических единиц "жили самостоятельной жизнью", и фиксация  $\epsilon_0$  как безразмерной константы была бы просто обманом.

Стратегия более позднего времени иная. Все основные единицы электрических величин воспроизводятся на основе макроскопических квантовых явлений, а их размер определяется значениями фундаментальных физических констант (постоянные Джозефсона и фон Клитцинга), которые измеряются отдельно. Связь поддерживаемых единиц с фундаментальными константами устраняет проблему дрейфов. Следующий шаг, который может быть сделан в некотором будущем, — фиксация констант по определению. Фиксация одной из них будет означать измерение заряда в единицах заряда электрона (константа  $\epsilon_0$  останется размерной, но будет измеряемой), а фиксация двух констант сразу приведет к новому определению килограмма, основанному на фиксированном значении постоянной Планка, что вместе со стандартом частоты позволит воспроизвести единицы энергии и массы. Более подробно вопросы реализации эталонов электрических единиц обсуждаются в разделе 4.2.

Как ни странно, с точки зрения фундаментальной физики также желательно ввести параметр  $\epsilon_0 \neq 1$ . Современный взгляд на проблемы единиц и эталонов гласит: самые естественные эталоны — это эталоны, основанные на фундаментальных константах, и нужно стремиться к такой системе единиц и эталонов. Единицы времени и длины определены через природные константы. При определенном прогрессе, можно выразить единицу заряда через фиксированное значение заряда электрона  $e$ , а единицу массы — через фиксированное значение постоянной Планка  $h$ . Но существует специальная безразмерная комбинация констант, в которую входят константы  $e$  и  $h$ , — это постоянная тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}.$$

Значение константы  $\alpha$  фиксировано природой и может быть известно только с конечной точностью. Если мы хотим фиксировать значения размерных констант  $e$  и  $h$  без погрешностей (напомним, что скорость света  $c$  уже фиксирована) и не прийти при этом к противоречиям, нам необходима константа  $\epsilon_0 \neq 1$ . В описанном выше сценарии эта константа становится измеряемой и отвечает в сущности на тот вопрос, на

который и должна отвечать подобная константа в фундаментальной теории: как соотносится фундаментальный заряд  $e$  с другим, возможно более фундаментальным, аналогом заряда  $(\hbar c)^{1/2}$ .

Иными словами, если забыть о том, что численные значения естественных единиц СИ выражаются через соответствующие природные единицы при помощи специально подобранных коэффициентов (отличных от единицы и сохраняющих иллюзию неизменности системы СИ), константа  $\varepsilon_0$  окажется размерным аналогом  $\alpha$ . Это наиболее очевидно для системы единиц, в которой частота, энергия, масса и разность потенциалов измеряются в одинаковых единицах и, следовательно,  $h = c = e = 1$ . В такой системе единиц

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2\alpha}.$$

Заметим, что постоянная Авогадро, постоянная Больцмана и другие размерные константы (служащие для перевода "разных" единиц "одной" физической величины) в известном смысле являются размерными аналогами безразмерных чисел. Размерность константы появляется ввиду несогласованности в определении размерностей единиц, которая не позволяет свести одни единицы к кратным от других с абсолютной точностью. Иногда такая несогласованность носит исторический характер и ее можно было бы устранить, но в ряде случаев (как в описанном выше сценарии с константами  $\varepsilon_0$  и  $\alpha$ ) несогласованность имеет физические причины.

Необходимо также помнить, что уравнения Максвелла для трехмерных электрического и магнитного полей в вакууме имеют два естественных обобщения: релятивистские уравнения с 4-тензорами для электродинамики в вакууме и уравнения для электромагнитных эффектов в средах. В последнем случае для подавляющего числа задач естественно сразу выбрать за систему отсчета ту, в которой среда покоится. Поэтому требования естественности, наглядности, прозрачности и т.д., предьявляемые к трехмерным уравнениям в вакууме, не очевидны. Они зависят от того, какое обобщение считать более важным. Так, с точки зрения физики полей в вакууме описание двух полей четырьмя векторами избыточно, тогда как с точки зрения электродинамики сплошных сред оно естественно как важный подготовительный шаг.

Проблема избыточности описания электродинамики в вакууме возникла не в связи с системой СИ, а исторически: как проблема эфира и нековариантности подхода. Например, в СИ, как и в СГС, нельзя признать удовлетворительной терминологию: один из 4-тензоров образован *напряженностью электрического поля  $\mathbf{E}$  и магнитной индукцией (плотностью магнитного потока)  $\mathbf{B}$* , а другой — *электрическим смещением (ранее электрической индукцией)  $\mathbf{D}$  и напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$* . Это связано с тем, что феноменология электростатики и магнитостатики строилась не симметрично и без должного понимания взаимосвязи и аналогии между ними. Из релятивистских соображений более естественно было бы называть напряженностью  $\mathbf{B}$ , а не  $\mathbf{H}$ .

Избыточность описания электродинамики в вакууме связана также с издержками преподавания. Традиционное школьное и университетское образование в России тяготеет скорее к логике электродинамики сред. Вначале изучается электростатика в вакууме, затем в веществе,

после этого магнитостатика (в вакууме и в веществе) и только в конце изучается физика изменяющихся полей и уравнения Максвелла. При таком подходе вакуум воспринимается скорее как частный предельный случай среды, чем общий фундаментальный случай.

Вакуум как "электромагнитно инертное" вещество с единичными относительными электрической и магнитной проницаемостями и естественно фиксированной системой отсчета — не слишком большой шаг вперед от концепции эфира. Введение четырех векторов даже в случае вакуума становится естественным. Более притягателен подход берклиевского курса физики [49], в котором после изучения в первых девяти главах электрических и магнитных явлений в вакууме две последние главы посвящены электрическим и магнитным полям в веществе.

Возвращаясь к (30), заметим, что в отличие от фиксации единиц (которая требует определенных процедур) выбор используемых величин, характеризующих поля, при наличии избыточности не требует никаких специальных соглашений. Более сложная ситуация возникнет в случае электродинамики в средах, так как по аналогии с СГС естественно вместо  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  использовать единицы с той же размерностью, что и  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ , что невозможно без пересмотра соответствующих соглашений.

Впрочем, введение новых обозначений, таких как, например, *приведенное*<sup>9</sup> электрическое смещение

$$\mathbf{D}' = \frac{\mathbf{D}}{\varepsilon_0},$$

в отдельно взятой книге или статье также не требует никаких международных соглашений. В любом случае необходимо разделить решение вопроса о единицах (и, следовательно, о требовании  $\varepsilon_0 \neq 1$ , иначе говоря о том, как записать закон Кулона) и решение о том, какими физическими величинами следует характеризовать электромагнитное поле.

Логика развития эталонов электрических единиц рано или поздно приведет к ситуации, когда естественной единицей заряда будет выбран элементарный заряд  $e$ , а константа  $\mu_0$ , и, следовательно, константа  $\varepsilon_0$ , станут измеряемыми. При законодательно фиксированном значении  $\varepsilon_0$  можно обсуждать системы СИ и СГС как конкурирующие, однако при измеряемой константе  $\varepsilon_0$  безальтернативный выбор делается в пользу системы СИ.

Наши аргументы о необходимости введения специальной размерности для заряда и неизбежности системы единиц с  $\varepsilon_0 \neq 1$  не означают, что система СГС или иная система единиц с  $\varepsilon_0 = 1$  не нужна. Напротив, практическая система единиц, т.е. система единиц, определяемая нуждами эксперимента, не обязательно является наиболее удобной для преподавания и теоретических расчетов. Различные детали практической системы могут быть неестественны с теоретической точки зрения.

Нелогичность введения специальных единиц для количества вещества (вместо числа частиц) и температуры (вместо средней энергии) очевидна. К естественным единицам относятся, например, атомные, релятивист-

<sup>9</sup> Вероятно, подходящим английским аналогом может служить "normalized".

ские и планковские системы единиц. Естественные единицы тесно связаны со специально выбранными численными значениями фундаментальных констант. Обычно ряд значений выбирается равным единице, а часто говорят и о константах, равных единице, например  $\hbar = c = 1$ . Утверждения подобного рода являются скорее жаргоном, чем правдой [17].

В естественных единицах уравнения упрощаются и некоторые оценки становятся тривиальными. Однако, как правило, "естественность" единиц и преимущества их применения относятся только к узкой области физики. Понятно, что планковские единицы так же неестественны для атомных явлений, как и атомные единицы для квантовой гравитации.

Независимо от нашей точки зрения на собственно систему единиц СГС мы считаем крайне необходимым предоставить физикам в преподавании и в (теоретических) исследованиях свободу выбора единиц.

В некотором смысле система единиц и сопутствующие рекомендации в отношении терминологии и обозначений представляют собой язык, и можно воспользоваться опытом преподавания как в школах, так и в университетах: неязыковые предметы могут преподаваться на иностранных языках, однако квалификационные экзамены должны сдаваться на государственном. Аналогичен и опыт использования специальных единиц (атомных, релятивистских, планковских), которые существенно упрощают преподавание специальных предметов и не составляют проблем для выражения окончательных результатов в практических единицах (СИ), необходимых для измерений. Следует отметить и то, что квалификация физиков (как пользователей системы единиц) существенно выше средней, и поэтому перевод из одной системы единиц в другую не должен составлять и не составляет для них существенной проблемы.

Необходимо законодательно регламентировать лишь то, что должен знать и уметь обладатель того или иного диплома, и в случае нефизиков эти знания и умения должны быть выражены языком практической системы измерений, т.е. системы СИ. То, как будут получены эти знания, не должно лимитироваться. Что же касается физиков, то для них необходимо уметь преподавать физику в системе СИ (коль скоро диплом физика-исследователя предполагает право преподавания в вузах и школах), тогда как исследовательскую работу можно вести (при необходимости) и в других единицах, например в СГС.

Следует также отметить, что излишне жестко фиксированная система преподавания вредна и для собственно системы СИ. Однозначно и жестко фиксированной на все времена Международной системы единиц СИ как таковой не существует. Происходит постоянная модификация принятых соглашений. Некоторые дополнения (например, включение новых единиц) принимаются после того, как они продемонстрировали свою жизнеспособность. Однако до их принятия они не являются частью системы СИ, хотя и могут иметь широкое применение. При жестком и последовательно регламентированном преподавании нам придется избегать использования таких общепринятых единиц, что неразумно.

## Список литературы

- Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* (to be published); <http://physics.nist.gov/constants>
- The International System of Units (SI)* (Sèvres: BIPM, 1998)
- "Обозначения, единицы измерения и терминология в физике" *УФН* **129** 289 (1979)
- Quinn T J *Metrologia* **40** 103 (2003)
- Quinn T J *Metrologia* **26** 69 (1989)
- Quinn T J, see [5] p. 70
- Quinn T J *Metrologia* **38** 89 (2001)
- Taylor B N, Witt T J *Metrologia* **26** 47 (1989)
- Леонтович М А *Вестник АН СССР* (6) 123 (1964)
- Сивухин Д В *УФН* **129** 335 (1979)
- Окунь Л В, см. [12] Приложение 1
- Окунь Л В *Физика элементарных частиц* (М.: Наука, 1984); Okun L B *Particle Physics: The Quest for the Substance of Substance* (Chur: Harwood Acad. Publ., 1985)
- Cohen E R, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **59** 1121 (1987)
- Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **72** 351 (2000)
- Тэйлор Б, Паркер В, Лангенберг Д *Фундаментальные константы и квантовая электродинамика* (М.: Атомиздат, 1972)
- Квантовая метрология и фундаментальные константы* (М.: Мир, 1981)
- Okun L B, in [24] p. 57; physics/0310069; physics/0407099
- Eides M I, Grotch H, Shelyuto V A *Phys. Rep.* **342** 63 (2001)
- Karshenboim S G, in [38] p. 141
- Niering M et al. *Phys. Rev. Lett.* **84** 5496 (2000)
- Линде А Д *Физика элементарных частиц и инфляционная космология* (М.: Наука, 1990)
- Розенталь И Л *УФН* **131** 239 (1980)
- Окунь Л В *УФН* **161** (9) 177 (1991)
- Karshenboim S G, Peik E (Eds) *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants* (Lecture Notes in Physics, Vol. 648) (Berlin: Springer, 2004)
- Hagiwara K et al. (Particle Data Group) *Phys. Rev. D* **66** 010001 (2002)
- Eidelman S et al. (Particle Data Group) *Phys. Lett. B* **592** 1 (2004)
- Wapstra A H, Audi G, Thibault C *Nucl. Phys. A* **729** 129 (2003); Audi G, Wapstra A H, Thibault C *Nucl. Phys. A* **729** 337 (2003)
- Cohen E R, Taylor B N *J. Phys. Chem. Ref. Data* **2** 663 (1973)
- Kinoshita T, Nio M *Phys. Rev. Lett.* **90** 021803 (2003)
- Young B, Kasevich M, Chu S, in *Atom Interferometry* (Ed. P R Berman) (San Diego: Academic Press, 1997) p. 363; Peters A et al. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **355** 2223 (1997); Wicht A et al. *Phys. Scripta* **T102** 82 (2002)
- Beier T et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 011603 (2002)
- Czarnecki A, Eidelman S I, Karshenboim S G *Phys. Rev. D* **65** 053004 (2002); Eidelman S I, Karshenboim S G, Shelyuto V A *Can. J. Phys.* **80** 1297 (2002)
- Bennett G W et al. (Muon (g-2) Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **89** 101804 (2002)
- Hayakawa M, Kinoshita T *Phys. Rev. D* **66** 019902(E) (2002); Knecht M et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 071802 (2002)
- Davier M et al. *Eur. Phys. J. C* **27** 497 (2003)
- Krüger E, Nistler W, Weirauch W *Metrologia* **35** 203 (1998); **36** 147 (1999)
- Karshenboim S G et al. (Eds) *The Hydrogen Atom: Precision Physics of Simple Atomic Systems* (Lecture Notes in Physics, Vol. 570) (Berlin: Springer, 2001)
- Karshenboim S G, Smirnov V B (Eds) *Precision Physics of Simple Atomic Systems* (Lecture Notes in Physics, Vol. 627) (Berlin: Springer, 2003)
- Clothier W K et al. *Metrologia* **26** 9 (1989)
- Funck T, Sienknecht V *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **40** 158 (1991), corrected as explained in [14]
- Jeffery A-M et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **46** 264 (1997)
- Small G W et al. *Metrologia* **34** 241 (1997)
- Hartland A, Jones K, Legg D J, Document CCE/88-9 (1988)

44. Zhang Z et al. *Acta Metrol. Sin.* **16** 1 (1995)
45. Trajon G et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **50** 572 (2001)
46. Kibble B P, Robinson I A, Belliss J H *Metrologia* **27** 173 (1990)
47. Williams E R et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 2404 (1998)
48. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation* (ICRP Publication 74) (Amsterdam: Elsevier, 1997); *Ann. ICRP* **26** (3–4) (1996)
49. Парселл Э *Электричество и магнетизм* (М.: Наука, 1975)

### Fundamental physical constants: their role in physics and metrology, and new recommended values

**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*

*Max-Planck-Institut für Quantenoptik,*

*Hans-Kopfermann Str. 1, 85748 Garching, Germany*

*Tel. (7-812) 323-96 75. Fax (7-812) 113-01 14*

*E-mail: sgk@vniim.ru, sek@mpq.mpg.de*

A brief review on recent CODATA recommended values of the fundamental physical constants, based on data obtained by the end of 2002, is presented. Preceding the review is an analysis of the role of the fundamental constants for fundamental physics and practical measurements. In view of the increasing role of the fundamental constants for the realization of the standards of units of physical quantities, some questions related to the International Unit System SI are discussed.

PACS numbers: **06.20. – f**, 06.20.Fn, 06.20.Jr, **06.30. – k**

Bibliography — 49 references

*Received 17 August 2004, revised 4 November 2004*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **175** (3) 271–298 (2005)

*Physics – Uspekhi* **48** (3) (2005)