1975 г. Апрель *Том 115, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

53.081.6

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СОГЛАСОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ — 1973 г. *)

(Доклад рабочей группы CODATA по фундаментальным физическим постоянным, август 1973 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы можно было табулировать, единообразно и согласованно использовать в науке и технике численные данные, которые вырабатываются во все возрастающем количестве во всем мире, важно располагать как можно более точными значениями основных констант и переводных множителей, входящих в расчеты по этим данным, которые были бы приняты повсеместно. Для выполнения названной задачи была учреждена рабочая группа по фундаментальным константам.

В 1963 г. Коэн и Дюмонд [1] выполнили анализ фундаментальных констант; полученные ими значения были приняты Международным союзом чистой и прикладной химии и Национальным Бюро стандартов США и рекомендованы ко всеобщему использованию Национальной Академией наук и Национальным исследовательским советом США. В 1969 г. Тэйлор, Паркер и Лангенберг [2] на основе результатов своих измерений частоты джозефсоновского туннелирования в сверхпроводниках, потребовавших изменения значения зоммерфельдовской постоянной тонкой структуры, пересмотрели заново результаты анализа Коэна — Дюмонда. Их анализ, показавший, что рекомендованные значения констант должны быть исправлены на величину порядка 20—60 ppm **), хорошо известные расхождения с теоретическими значениями квантовой электродинамики, а также новое развитие экспериментальной техники стимулировали рост активности в области точных измерений. Многие из полученных результатов были доложены на двух конференциях по фундаментальным константам в 1970 г.[3] и в 1971 г.[4]

В течение последних четырех лет рабочая группа рассмотрела экспериментальные и теоретические данные, относящиеся к определению численных значений фундаментальных физических констант. На основе этих данных Коэн и Тэйлор [5] недавно завершили новое изучение всей доступной в настоящее время информации и после тщательного статистического анализа существующих еще расхождений рекомендовали новую совокупность «наилучших» значений фундаментальных физических констант взамен значений 1963 и 1969 гг. В своем анализе, следуя принятому ранее методу, они разбивают исходные данные на две категории — вспомогательные константы и стохастические данные. Вспомогательными константами считаются такие, значения которых столь надежно определены, что они вносят ничтожно малые погрешности по сравнению с ошибками в других величинах, с которыми они могут сочетаться. Они принимаются поэтому фиксированными в анализе методом наименьших квадратов. Совместно со стохастическими данными они образуют совокупность исходных данных для указанного анализа. Разграничение между вспомогательными константами и стохастическими данными не всегда можно четко провести. Оно зависит не только от погрешности в самих величинах, но и от ошибок в результатах других измерений, с которыми они комбинируются при определении значения фундаментальной постоянной. Если измеряемая величина вносит существенную погрешность в более чем одно наблюдательное уравне-

---

*) Recommended Consistent Values of the Fundamental Physical Constants, 1973. Report of CODATA Task Group on Fundamental Constants, August 1973, CODATA Bull., No. 11 (December 1973). Перевод В. И. Рыдника, под редакцией Я. А. Смородинского.

**) 1 ppm (part per million) $\equiv 10^{-6}$. (*Прим. перев.*)

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1975 г.

ние в методе наименьших квадратов для исходной совокупности величин, то она не может рассматриваться как вспомогательная константа и должна быть включена в число стохастических переменных, а ее численное значение становится еще одним исходным данным. Так, значение местного ускорения силы тяжести, измеренное в Харьковском государственном метрологическом институте с погрешностью 1 ppm, можно считать вспомогательной константой, а магнитный момент протона (в ядерных магнетонах), измеренный с ошибкой 0,4 ppm, надо оставить среди стохастических данных.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ

Вспомогательные константы в анализе Коэна — Тэйлора приведены в табл. I. В целом эти величины измерены с погрешностью менее 1 ppm [6]. Кроме них, в таблицу включены массы нуклидов, заимствованные из новейшего анализа масс, проведенного Вапстра, Гоувом и Босом [6], и анализа распространенности изотопов, выполненноно Фуллером [7].

Таблица I

Вспомогательные константы

Величина	Обозначение	Значение *)	Погрешность, ppm
Определение вольта $в_{МБ69}$ через джозефсоновскую частоту [5]	$2e/h$	483,594000 $Гц/в_{МБ69}$	—
Скорость света [9]	c	299792458(1,2) $м \cdot сек^{-1}$	0,004
Магнитный момент электрона [14]	$g_e/2$	1,0011596567(35)	0,0035
Магнитный момент мюона [15]	$g_\mu/2$	1,00116616(31)	0,31
Отношение магнитных моментов электрона и протона [16]	μ_e/μ_p	658,2106880(66)	0,010
Фактор диамагнитного экранирования протона [16]	$1+\sigma\,(H_2O)$	1,000025637(67)	0,067
Массы атомов в а.е.м. (1 а.е.м. = $=10^{-3}$ $кг \cdot моль^{-1}/N_A$) [6]:			
протон (p)		1,007276470(11)	0,011
водород (^1H)		1,007825036(11)	0,011
дейтерий (^2H)		2,014101795(21)	0,010
гелий (^4He)		4,002603267(48)	0,012
Множители приведенной массы [5]:			
водород	$1+(m_e/m_p)$	1,000544617	0,001
дейтерий	$1+(m_e/m_d)$	1,000272444	0,001
гелий	$1+(m_e/m_\alpha)$	1,000137093	0,001
мюоний	$1+(m_e/m_\mu)$	1,004836323(11)	0,011
Постоянная Ридберга [5]	R_∞	10973731,77(83) $м^{-1}$	0,075
Местное ускорение силы тяжести [5]:			
данное США	g (CB)	980104,30(2)$\cdot 10^{-5}$ $м \cdot сек^{-2}$	0,02
данное Англии	g (BFS)	981181,77(2)$\cdot 10^{-5}$ $м \cdot сек^{-2}$	0,02

*) В этой таблице, как и во всех прочих, число в скобках после численного значения величины соответствует стандартному отклонению для этого значения в виде последних указанных значащих цифр.

Все электрические единицы выражены через установленные Международным Бюро мер и весов (МБ) эталоны ома и вольта с помощью повторявшихся каждые три года взаимных сличений в период 1948—1970 гг. (с учетом переопределений 1969 г.). После 1970 г. национальные лаборатории эталонов использовали джозефсоновские контакты для сравнения национальных эталонов вольта и произвели как взаимное сличение этих эталонов, так и их сличение с эталоном вольта в Национальном Бюро стандартов США, применив для этого передвижные термостабилизированные эталоны. На основе этих сличений был установлен эталонный вольт МБ, имеющий *определенное* значение, такое, что соотношение Джозефсона получает вид [8] *)

$$\frac{2e}{h} = 483594{,}0\ Гц/в_{МБ69}.$$

*) Обозначение «МБ69» использовано здесь для различения вольта, определяемого указанным соотношением, и эталона вольта $в_{69МБ}$, реализованного на эталонных

Скорость света измерялась путем определения как частоты (с помощью цезиевого эталона времени), так и длины волны (с помощью криптонового эталона длины) стабилизированного метаном гелий-неонового лазера. Погрешность этого измерения в три раза меньше, чем та, с которой определен сам метр·

$$c = 299792458(1,2)\ м \cdot сек^{-1}.$$

Эта величина c была рекомендована Консультативным комитетом по определению метра [9], так что, возможно, метр будет переопределен. Указанная здесь погрешность *) есть следствие неопределенности при практическом выражении метра через длину волны излучения криптона-86.

Постоянная Ридберга основывается на среднем из четырех недавних определений [10-13] **). Поскольку указываемые в этих работах погрешности скорее отражают личный оптимизм экспериментаторов, а не действительные вариации ошибки измерений, то в таблицу включено невзвешенное среднее и приведенная его ошибка есть стандартное отклонение отдельных данных (а не стандартное отклонение среднего значения), что указывает на возможное наличие систематической погрешности.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные данные, использованные для анализа методом наименьших квадратов, приведены в табл. II. 27 позиций в этой таблице соответствуют измерениям 6 независимых переменных по 11 различным соотношениям. В качестве переменных для такого анализа были выбраны:

α^{-1} — обратная величина постоянной тонкой структуры,

N_A — число Авогадро ***),

μ_μ/μ_p — отношение магнитных моментов мюона и протона,

Λ — отношение килоикс-единицы к ангстрему;

2 переводных множителя, связывающих принятые эталоны МБ с единицами СИ тока и сопротивления.

Приведенные в табл. II данные отобраны из значительно более широкого массива экспериментальных данных. Например, результат 3, в) в табл. II есть взвешенное среднее из 37 измерений, выполненных в течение 8 лет, значение 11 есть результат комбинирования трех отдельных экспериментов в Йельском университете и трех — в Чикагском университете, в которых сверхтонкое расщепление в мюонии было измерено несколькими различными методами в широком диапазоне давлений газообразных аргона и криптона, где тормозились мюоны. Поэтому в таких экспериментах оказалось возможным измерить линейное и квадратичное барические смещения сверхтонкого расщепления и экстраполировать данные к нулевому давлению при условии, что данные для аргона и криптона экстраполируются к одному и тому же значению [5].

Некоторые данные в таблицу не включены по ряду причин. Все прежние данные по скорости света с ошибкой на уровне 0,1 ppm «вытеснены» данными лазерных измерений, которые вывели эту величину явно в разряд вспомогательных констант. Не приведены результаты двух измерений числа Фарадея [47, 48], поскольку они расходятся (примерно в четыре раза больше стандартного отклонения) с полученным косвенно значением F из анализа других данных методом наименьших квадратов. В дополнение к двум измерениям $\mu'_p/_{яд}$, указанным в табл. II, существуют три других измерения, выполненные в последние три года, с погрешностями 6—8 ppm [49-51]. Эти определения полностью согласуются с теми двумя, что приведены в табл. II, но так как их погрешности от 10 до 20 раз больше, чем погрешности 0,4 ppm и 0,8 ppm соответственно в советских и английских измерениях, то указанным выше измерениям можно приписать лишь ничтожно малый вес, и поэтому они не приводятся. Не приводятся два результата Ноулса по измерению λ_c: один потому, что получен в предварительном измерении с неизвестной систематической ошибкой [52], а второй [53] потому, что более чем на три стандартных отклонения расходится с полученным путем анализа по всем прочим данным [5]. Для сверхтонкого расщепления в водороде использовалось теоретическое значение лэмбовского сдвига, вычисленное Эриксоном [54] и имеющее точность 0,01 *Мгц*, а не существующие экспериментальные данные, имеющие в несколько раз более низкую

элементах в МБ в соответствии с переопределением 1969 г. На основе результатов измерений джозефсоновской частоты в нескольких национальных лабораториях последний из эталонов пришлось снижать примерно на 0,4 *мкв* в год в период 1969—1972 гг. [5].

*) Все приводимые в настоящем докладе погрешности (за исключением специально указанных) соответствуют одному стандартному отклонению.

**) См. [59]. (*Прим. ред.*)

***) Новое значение числа Авогадро с уменьшенной в 30 раз ошибкой [60] внесет изменения в значения ряда постоянных и, в особенности, в величины ошибок. (*Прим. ред.*)

Таблица II

Наблюдательные данные для анализа методом наименьших квадратов

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
1. Переводной множитель для ома. Томпсон (Лаб. яд. физ.) [5]	$\bar{R} \equiv ом_{МБ69}/ом$	0,99999946(19)	0,19
2. Переводной множитель для ампера	$K \equiv a_{МБ69}/a$		
а) Дрисколл, Каткоски (НБС, 1958) [17]		0,9999988(77)	7,7
б) Дрисколл, Олсен (НБС, 1968) [18]		1,0000018(97)	9,7
в) Вигорё (НФЛ, 1965—1970) [19]		1,0000000(55)	5,5
3. Гиромагнитное отношение в слабом поле	$\gamma'_p = \frac{1}{4R_\infty} c \frac{\mu'_p}{\mu_B} \times \left(\frac{2e}{h}\right)_{МБ69} \alpha^2 \bar{R}^{-1}$		
а) Вигорё (НФЛ, 1965) [20]		$2{,}6751187(153) \times 10^8$ $сек^{-1} тл^{-1}{}_{МБ69}$	5,7
б) Хара и др. (ЭТЛ, 1968) [21]		2,6751156(153)	5,7
в) Маляревская и др. (ВНИИМ, 1971) [5,22]		2,6751100(230)	8,6
г) Олсен, Дрисколл (НБС, 1972) [23]		2,6751370(76)	2,9
4. Гиромагнитное отношение в сильном поле	$\gamma'_p = \frac{c}{4R_\infty} \frac{\mu'_p}{\mu_B} \times \left(\frac{2e}{h}\right)_{МБ69} \alpha^2 K^{-2} \bar{R}^{-1}$		
а) Ягола и др. (ХГНИИМ, 1966) [24]		$2{,}675130(20) \times 10^8$ $а \cdot сек \cdot кг^{-1}$	7,4
б) Киббл, Хант (НФЛ, 1971) [25]		2,675075(43)	16
5. Магнитный момент протона	$\frac{\mu'_p}{\mu_{яд}} = \frac{M_p \mu_0 c^2}{16 R_\infty} \left(\frac{2e}{h}\right)^2_{МБ69} \times \alpha K^{-2} N_A^{-1} \bar{R}^{-2}$		
а) Мамырин и др. (ФТИ, 1972) [26]		2,7927738(12)	0,43
б) Петли, Моррис (НФЛ, 1972) [27]		2,7927748(23)	0,82
6. Рентгеновский переводной множитель	Λ		
а) Бирден (Балтимор, 1931) [28]		1,002027(43)	43
б) Спийкерман (Балтимор, 1964) [29]		1,002041(43)	43
в) Хенинс (Балтимор, 1971) [30]		1,0020655(126)	12,5
7. Постоянная Зигбана—Авогадро	$N_A \Lambda^3$		
а) Хенинс, Бирден (Балтимор, 1964) [31]		$6{,}059768(121) \times 10^{23}$ $моль^{-1}$	20
б) Бирден (Балтимор, 1965) [32]		$6{,}05961(22) \times 10^{23}$ $моль^{-1}$	36
8. Комптоновская длина волны электрона. Ван-Аше и др. (Моль, 1971) [33]	$\lambda_c = \frac{10^{10}}{2R_\infty} \alpha^2 \Lambda^{-1}$	24,21315(102) $кX$	42

Продолжение табл. II

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
9. Постоянная тонкой структуры*	α^{-1}		
а) Сверхтонкое расщепление в водороде [34,35]		137,03597(31)	2,2
б) Уэсли, Рич (Энн-Арбор, 1972) [14]		137,03563(59)	4,3
в) Бэрд и др. (Провиденс, 1972) [36]		137,03544(76)	5,5
г) Козинс, Форбургер (Нью-Хейвен, 1970) [37]		137,03563(44)	3,2
д) Шайн и др. (Энн-Арбор, 1971) [38]		137,03508(64)	4,7
10. Магнитный момент мюона	μ_μ/μ_p		
а) Хатчинсон и др. (Принстон, 1970) [39]		3,183356(43)	13,4
б) Дево и др. (Чикаго, 1970) [40]		3,183350(21)	6,5
в) Кроу и др. (Беркли, 1972) [41]		3,1833467(115)	3,6
11. Сверхтонкое расщепление в мюонии. Объединенные данные Чикаго и Йеля [5, 40, 42–46]	$\nu_\mu = \frac{16}{3} R_\infty c \frac{\mu_e}{\mu_B} \frac{\mu_p}{\mu_B} \times$ $\times [0,9854359(28)]\, \alpha^2 \frac{\mu_\mu}{\mu_p}$	4463303,8(1,8) *кгц*	0,4

точность. Не приведено значение разности энергий уровней $2P_{3/2}$ и $2S_{1/2}$, измеренное Кауфманом и др. [55], поскольку оно сильно расходится со всеми другими данными вследствие какой-то неизвестной систематической ошибки. В таблицу не включено тонкое расщепление в гелии [56], так как теория двухэлектронных систем все еще недостаточно точна, хотя и собственно экспериментальная погрешность уже находится на уровне 1 ppm.

По-видимому, наиболее точным экспериментальным результатом в физике является *сверхтонкое расщепление в водороде (погрешность менее* 10^{-6} *ppm). К сожалению,* теория в настоящее время разработана не в такой степени, чтобы оценивать эффекты *внутренней структуры и поляризуемости протона с точностью выше* 2—3 ppm, *и современный* расчет поляризационной поправки, видимо, дает ошибку 0—3 ppm. В таблицу не включено сверхтонкое расщепление в позитронии [57], так как оно имеет погрешность 25 ppm, а неполное теоретическое выражение, известное сегодня, может иметь ошибку 50—100 ppm из-за невычисленных еще членов.

Ошибки, приписанные различным группам данных в табл. II, в общем случае вычислялись на основе критерия внутренней согласованности; однако для данных по гиромагнитному отношению в слабых полях, для рентгеновских и квантовоэлектродинамических данных ошибки приписывались согласно критерию внешней согласованности, поскольку такой критерий дает более «безопасную» меру.

Для указанной совокупности данных анализ методом наименьших квадратов дал критерий согласия $\chi^2 = 14{,}5$ при 21 степени свободы. Отношение Берджа равно 0,83; это говорит о том, что вычисленная ошибка анализа может быть снижена в шесть раз, *если использовать критерий внешней согласованности, однако все же следует сохранить* более безопасный критерий внутренней согласованности. Табл. II является в на*стоящее время, по-видимому, наилучшей сводкой данных; совокупность значений, полу*ченных из них методом наименьших квадратов, приведена в табл. III; указанные в ней погрешности представляют одно стандартное отклонение, вычисленное исходя из тех ошибок, которые были приписаны величинам в табл. I.

Имеются существенные отличия последней сводки от сводки рекомендованных значений 1963 г.; одним из наибольших отличий является увеличение постоянной Планка на 88 ppm. Важное отличие значения протонного магнитного момента на 23 ppm

Таблица III

Рекомендуемые согласованные значения фундаментальных констант

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
1. Магнитная проницаемость вакуума	μ_0	$4\pi\cdot10^{-7}$ *гс·м*$^{-1}$ = $=12{,}5663706144\cdot10^{-7}$ *гс·м*$^{-1}$	
2. Скорость света в вакууме	c	299792458 (1,2) *м·сек*$^{-1}$	0,004
3. Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\varepsilon_0=1/\mu_0c^2$	$8{,}85418782\,(7)\cdot10^{-12}$ *ф·м*$^{-1}$	0,008
4. Постоянная тонкой структуры	α	0,0072973506 (60)	0,82
	α^{-1}	137,03604 (11)	0,82
5. Элементарный заряд	e	$1{,}6021892\,(46)\cdot10^{-19}$ *кул*	2,9
6. Постоянная Планка	h	$6{,}626176\,(36)\cdot10^{-34}$ *дж·гц*$^{-1}$	5,4
	$\hbar=h/2\pi$	$1{,}0545887\,(57)\cdot10^{-34}$ *дж·сек*	5,4
7. Число Авогадро *)	N_A	$6{,}022045\,(31)\cdot10^{23}$ *моль*$^{-1}$	5,1
8. Атомная единица массы	1 а. е. м. = $=10^{-3}$ *кг·моль*$^{-1}/N_A$	$1{,}6605655\,(86)\cdot10^{-27}$ *кг*	5,1
9. Масса покоя электрона	m_e	$0{,}9109534\,(47)\cdot11^{-30}$ *кг*	5,1
		$5{,}4858026\,(21)\cdot10^{-4}$ а. е. м.	0,38
10. Масса покоя мюона	m_μ	$1{,}883566\,(11)\cdot10^{-28}$ *кг*	5,6
		0,11342920 (26) а. е. м.	2,3
11. Масса покоя протона	m_p	$1{,}6726485\,(86)\cdot10^{-27}$ *кг*	5,1
		1,007276470 (11) а. е. м.	0,011
12. Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}6749543\,(86)\cdot10^{-27}$ *кг*	5,1
		1,008665012 (37) а. е. м.	0,037
13. Отношение масс протона и электрона	m_p/m_e	1836,15152 (70)	0,38
14. Отношение масс мюона и электрона	m_μ/m_e	206,76865 (47)	2,3
15. Удельный заряд электрона	e/m_e	$1{,}7588047\,(49)\cdot10^{11}$ *кул·кг*$^{-1}$	2,8
16. Число Фарадея	$F=N_Ae$	$9{,}648456\,(27)\cdot10^{4}$ *кул·моль*$^{-1}$	2,8
17. Квант магнитного потока	$\Phi_0=h/2e$	$2{,}0678506\,(54)\cdot10^{-15}$ *вб*	2,6
	h/e	$4{,}135701\,(11)\cdot10^{-15}$ *дж·гц*$^{-1}\cdot$*кул*$^{-1}$	2,6
18. Отношение Джозефсона между частотой и напряжением	$2e/h$	483,5939 (13) *Тгц·в*$^{-1}$	2,6
19. Квант циркуляции	$h/2m_e$	$3{,}6369455\,(60)\cdot10^{-4}$ *дж·гц*$^{-1}\cdot$*кг*$^{-1}$	1,6
	h/m_e	$7{,}273891\,(12)\cdot10^{-4}$ *дж·гц*$^{-1}\cdot$*кг*$^{-1}$	1,6
20. Постоянная Ридберга **)	R_∞	$1{,}097373177\,(83)\cdot10^{7}$ *м*$^{-1}$	0,075
21. Боровский радиус	$a_0=\alpha/4\pi R_\infty$	$0{,}52917706\,(44)\cdot10^{-10}$ *м*	0,82
22. Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C=\alpha^2/2R_\infty$	$2{,}4263089\,(40)\cdot10^{-12}$ *м*	1,6
	$\lambda\!\!\!^{-}_C=\lambda_C/2\pi=\alpha a_0$	$3{,}8615905\,(64)\cdot10^{-13}$ *м*	1,6
23. Классический радиус электрона	$r_e=\mu_0e^2/4\pi m_e=$ $=\alpha\lambda\!\!\!^{-}_C$	$2{,}8179380\,(70)\cdot10^{-15}$ *м*	2,5
24. g-фактор для электрона	$g_e/2=\mu_e/\mu_B$	1,0011596567 (35)	0,0035

Продолжение табл. III

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
25. g-фактор для мюона	$g_\mu/2$	1,00116616 (31)	0,31
26. Магнитный момент протона в ядерных магнетонах	$\mu_p/\mu_{яд}$	2,7928456 (11)	0,38
27. Магнетон Бора	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	$9{,}274078\,(36)\cdot 10^{-24}$ *дж·тл*$^{-1}$	3,9
28. Ядерный магнетон	$\mu_{яд} = e\hbar/2m_p$	$5{,}050824\,(20)\cdot 10^{-27}$ *дж·тл*$^{-1}$	3,9
29. Магнитный момент электрона	μ_e	$9{,}284832\,(36)\cdot 10^{-24}$ *дж·тл*$^{-1}$	3,9
30. Магнитный момент протона	μ_p	$1{,}4106171\,(55)\cdot 10^{-26}$ *дж·тл*$^{-1}$	3,9
31. Магнитный момент протона в магнетонах Бора	μ_p/μ_B	$1{,}521032209\,(16)\cdot 10^{-3}$	0,011
32. Отношение магнитных моментов электрона и протона	μ_e/μ_p	658,2106880 (66)	0,010
33. Отношение магнитных моментов мюона и протона	μ_μ/μ_p	3,1833402 (72)	2,3
34. Магнитный момент мюона	μ_μ	$4{,}490474\,(18)\cdot 10^{-26}$ *дж·тл*$^{-1}$	3,9
35. Гиромагнитное отношение для протона	γ_p	$2{,}6751987\,(75)\cdot 10^{8}$ *сек*$^{-1}$ *тл*$^{-1}$	2,8
36. Фактор диамагнитного экранирования для сферического образца H_2O	$1+\sigma\,(H_2O)$	1,000025637 (67)	0,067
37. Гиромагнитное отношение для протона (не исправленное)	γ'_p $\gamma'_p/2\pi$	$2{,}6751301\,(75)\cdot 10^{8}$ *сек*$^{-1}$ *тл*$^{-1}$ 42,57602 (12) *Мгц·тл*$^{-1}$	2,8 2,8
38. Магнитный момент протона в ядерных магнетонах (не исправленный)	$\mu'_p/\mu_{яд}$	2,7927740 (11)	0,38
39. Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{C,p} = h/m_pc$ $\lambda\!\!\!^{-}_{C,p} = \lambda_{C,p}/2\pi$	$1{,}3214099\,(22)\cdot 10^{-15}$ *м* $2{,}1030892\,(36)\cdot 10^{-16}$ *м*	1,7 1,7
40. Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{C,n} = h/m_nc$ $\lambda\!\!\!^{-}_{C,n} = \lambda_{C,n}/2\pi$	$1{,}3195909\,(22)\cdot 10^{-15}$ *м* $2{,}1001941\,(35)\cdot 10^{-16}$ *м*	1,7 1,7
41. Универсальная газовая постоянная	R	8,31441 (26) *дж·моль*$^{-1}$ (°K)$^{-1}$	31
42. Объем 1 моля идеального газа ($T_0 = 273{,}15$ °K, $P_0 = 1$ *атм*)	$V_m = RT_0/p_0$	0,02241383 (70) *м*^{3}*·моль*$^{-1}$	31
43. Постоянная Больцмана	$k = R/N_A$	$1{,}380662\,(44)\cdot 10^{-23}$ *дж·*(°K)$^{-1}$	32
44. Постоянная Стефана	$\sigma = (\pi^2/60)\,k^4/\hbar^3c^2$	$5{,}67032\,(71)\cdot 10^{-8}$ *вт·м*$^{-2}$(°K)$^{-4}$	125

Продолжение табл. III

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
45. Первая радиационная постоянная	$c_1 = 2\pi hc^2$	3,741832 (20)·10^{-16} *вт·м*^{2}	5,4
46. Вторая радиационная постоянная	$c_2 = hc/k$	0,01438786 (45) *м·°К*	31
47. Гравитационная постоянная	G	6,6720 (41)·10^{-11} *н·м*^{2}*кг*$^{-2}$	615

*) В 1974 г. опубликовано существенно уточненное значение

$$N_A = 6{,}0220943\,(61)\cdot 10^{23}\ (1{,}02\ \text{ppm})$$ [59].

В отличие от значения, приведенного в таблице, последнее значение получено непосредственно измерением плотности и постоянной решетки кристалла кремния. (*Прим. ред.*)

**) Новое значение

$$R_\infty = 1{,}097373143\,(10)\cdot 10^7\ м^{-1}\ (0{,}009\ \text{ppm})$$ [60]. (*Прим. ред.*)

Таблица IV

Переводные множители и различные константы

Величина	Обозначение	Значение	Погрешность, ppm
Отношение ампера МБ к амперу СИ	$K \equiv a_{МБ69}/a$	1,0000007 (26)	2,6
Отношение ома МБ к ому СИ	$\overline{R} \equiv ом_{МБ69}/ом$	0,99999947 (19)	0,19
Отношение вольта МБ к вольту СИ	$в_{МБ69}/в$	1,0000002 (26)	2,6
Отношение килоикс-единицы к ангстрему, λ (Cu$K\alpha_1$) = 1,537400 *kX*	Λ	1,0020772 (54)	5,3
Отношение Å* к ангстрему, λ (W$K\alpha_1$) = = 0,2090100 Å*	Λ^*	1,0000205 (56)	5,6
Энергетические эквиваленты:			
1 а. е. м.		931,5016 (26) *Мэв*	2,8
1 массы протона		938,2796 (27) *Мэв*	2,8
1 массы нейтрона		939,5731 (27) *Мэв*	2,8
1 массы мюона		105,65948 (35) *Мэв*	3,3
1 массы электрона		0,5110034 (14) *Мэв*	2,8
1 электрон-вольт	1 *эв/k*	11604,50 (36) °K	31
	1 *эв/hc*	8065,479 (21) *см*$^{-1}$	2,6
	1 *эв/h*	2,4179696 (63)·10^{14} *гц*	2,6
Произведение напряжения на длину волны	$V\lambda$	12398,520 (32) *эв·*Å	2,6
		13,605804 (36) *эв*	2,6
Постоянная Ридберга	$R_\infty hc$	82,0568 (26) *см*^{3} *атм* × × *моль*$^{-1}$ (°K)$^{-1}$	31
Универсальная газовая постоянная	R	1,98719 (6) *кал·моль*$^{-1}$ (°K)$^{-1}$	31

от полученного Тэйлором и др. [2] в 1969 г., обусловлено результатами новых более точных измерений, проведенных в Ленинграде и Теддингтоне.

В табл. IV дана сводка переводных множителей и некоторых других констант, выраженных не в единицах СИ, но применяемых в специальных областях. Табл. III и IV не являются полной сводкой всех возможных констант [5]. Следует помнить, что когда по данным табл. III вычисляются значения не приведенных в ней величин, то погрешности последних в общем надо определять, пользуясь матрицей полных дисперсий, приведенной в табл. V, поскольку методом наименьших квадратов получаются

Таблица V

Матрица дисперсий

(в нижеследующей таблице приведены элементы матрицы коэффициентов корреляции и матрицы дисперсий (диагональные элементы v_{ii} этой матрицы суть квадраты стандартных отклонений σ_i соответствующих переменных в единицах 10^{-12}; ковариация между двумя переменными v_{ij} располагается на соответствующем месте выше (и справа) от диагонали, коэффициент корреляции $r_{ij}=v_{ij}/\sigma_i\sigma_j$ располагается под диагональю и набран курсивом))

	α^{-1}	K	N_A	$\overline{R}$	Λ
α^{-1}	0,676	−0,399	0,142	−0,010	−0,058
K	*−0,186*	6,808	−13,206	−0,005	3,470
N_A	*−0,034*	*−0,983*	26,516	−0,052	−6,948
$\overline{R}$	*−0,064*	*−0,011*	*−0,053*	0,036	0,014
Λ	*−0,013*	*0,249*	*0,253*	*0,014*	28,544
μ_μ/μ_p	*0,388*	*−0,072*	*0,013*	*−0,025*	*−0,005*
e	*−0,457*	*0,956*	*−0,902*	*0,075*	*0,230*
h	*−0,334*	*0,986*	*−0,951*	*0,070*	*0,242*
m_e	*−0,034*	*0,986*	*−0,997*	*0,053*	*0,252*
F	*−0,404*	*−0,811*	*0,898*	*−0,020*	*−0,225*

	μ_μ/μ_p	e	h	m_e	F
α^{-1}	0,725	−1,086	−1,495	−0,142	−0,943
K	−0,428	7,203	14,006	13,207	−6,003
N_A	0,153	−13,400	−26,658	−26,373	13,116
$\overline{R}$	−0,011	0,041	0,072	0,052	−0,011
Λ	−0,062	3,542	7,027	6,911	−3,406
μ_μ/μ_p	5,165	−1,165	−1,604	−0,153	−1,012
e	*−0,178*	8,330	15,573	13,401	−5,071
h	*−0,130*	*0,991*	29,651	26,661	−11,085
m_e	*−0,013*	*0,904*	*0,953*	26,376	−12,972
F	*−0,157*	*−0,619*	*−0,718*	*−0,890*	8,045

значения, погрешности которых уже не независимы, но коррелированы. Так, если величина X есть функция других переменных $x_1, \ldots, x_n$, то стандартное отклонение значения X следует вычислять по соотношению

$$\sigma^2 x=\sum_i \left(\frac{\partial X}{\partial x_i}\right)^2 V_{ii}+2\sum_{j>i}\frac{\partial X}{\partial x_i}\frac{\partial X}{\partial x_j}V_{ij},$$

где V_{ij} — элементы матрицы дисперсий.

Если, как это часто бывает, X есть одночлен, $X = x_1^{p_1}x_2^{p_2}\ldots x_n^{p_n}$, то этот результат можно записать в виде

$$\varepsilon^2 x=\sum_i p_i\varepsilon_i^2+2\sum_{j>i} p_ip_j\varepsilon_{ij}=\sum r_{ij}p_i\varepsilon_ip_j\varepsilon_j,$$

где ε_i — относительные погрешности (в 10^{-6}), ε_{ij} — элементы матрицы дисперсий (в 10^{-12}), а r_{ij} — корреляционные коэффициенты: $\varepsilon_{ij}=r_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j$.

Рабочая группа рекомендует результаты анализа Коэна — Тэйлора (табл. III—V) в качестве согласованной совокупности фундаментальных констант, представляющих сегодня наилучшую доступную численную информацию о них.

Точность и согласованность анализа существенно выше по сравнению с анализами 1963 и 1969 гг., однако все еще остаются области, где остро необходимы дальнейшие эксперименты и теоретические расчеты. Наиболее важными из них являются гиромагнитное отношение для протона (как в сильных, так и в слабых полях) и тонкое расщепление в водороде. Также важно улучшить теорию сверхтонкого расщепления (в позитронии, мюонии и водороде). Эти усовершенствования приведут не только к более точному значению постоянной тонкой структуры α, но в столь же равной мере и к более высокой точности значений числа Авогадро и постоянной Планка, которые в настоящее время известны с точностью лишь 5 ppm. Следует отметить, что табл. II не содержит результатов прямых измерений числа Фарадея. Сейчас в Национальной физической лаборатории Англии и в Национальном Бюро стандартов США готовятся новые эксперименты. Результаты измерений Бауэра [58] в анализ Коэна — Тэйлора не были включены из-за своего предварительного характера. Они не согласуются с рекомендованным значением в табл. III, хотя это отчасти вызвано и большой ошибкой, приписанной этому измерению.

В ближайшие годы станет, вероятно, доступной новая информация, которая улучшит наше знание фундаментальных констант и может повлечь существенные изменения в численных значениях некоторых из них. Значения констант, приведенные в табл. III и IV, вполне пригодны для широкого их использования и поэтому официально рекомендуются; но могут найтись и такие специалисты, которым потребуются значения физических констант с наивысшей доступной точностью. Рекомендации Рабочей группы не отвергают возможность использования более точных значений. Однако для подавляющего большинства физических и химических данных, их взаимная согласованность и ясная взаимосвязь не менее важны, чем точность (понимая, конечно, что абсолютная точность есть награда, которая вечно ускользает из наших рук), приведенные значения могут служить как стандартные в течение нескольких последующих лет.

Рабочая группа CODATA по фундаментальным константам

Д-р *Э. Р. Коэн* (председатель)
(Научный центр «Роквелл интернейшнл», Калифорния, США),

Д-р *Р. Д. Делат*
(Национальное Бюро стандартов, Вашингтон, США),

Проф. *Г. Э. Дьюкворт*
(Виннипегский университет, Манитоба, Канада),

Д-р *Э. Хорсфилд*
(Отдел квантовой метрологии Национальной физической лаборатории, Теддингтон, Великобритания),

Д-р *Б. А. Мамырин*
(Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Ленинград, СССР),

Д-р *Б. Н. Олейник*
(Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Ленинград, СССР),

Д-р *Г. Престон-Томас*
(Отдел физики Национального исследовательского совета, Оттава, Канада),

Проф. *У. Штилле*
(Федеральный физико-технический институт, Брауншвейг, ФРГ),

Д-р *И. Ямамото*
(Национальная исследовательская лаборатория метрологии, Токио, Япония)

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. R. Cohen, J. W. M. Du Mond, *а*) Proc. of 2nd Intern. Conference on Nuclidic Masses, Ed. W. H. Johnson, Vienna, Springer-Verlag, 1964, p. 152; *б*) Rev. Mod. Phys. **37**, 537 (1965).
2. B. N. Taylor, W. H. Parker, D. N. Langenberg, ibid. **41**, 375 (1969) (см. перевод: Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг, Фундаментальные константы и квантовая электродинамика, М., «Мир», 1972.)
3. Precision Measurement and Fundamental Constants, Ed. D. N. Langenberg and B. N. Taylor, NBS Spec. Publ. 343, Washington, 1971.
4. Atomic Masses and Fundamental Constants — 4, Ed. J. H. Sanders and A. H. Wapstra, N. Y., Plenum, 1972.
5. E. R. Cohen, B. N. Taylor, J. Phys. Chem. Ref. Data **2**, No. 4 (1973).
6. A. H. Wapstra, N. B. Gove, K. Bos, Nucl. Data Tables (в печати).
7. G. H. Fuller, Nucl. Data Tables, 1959, p. 66.

8. CIPM Consultative Committee on Electricity, October 1972.
9. CIPM Consultative Committee for the Definition of the Metre, June 1973.
10. L. Csillag, Acta Phys. Ac. Sci. Hung. **24**, 1 (1968); см. [4], p. 411.
11. T. Masui, см. [3], p. 83, а также частное сообщение.
12. E. G. Kessler, Phys. Rev. **A7**, 408 (1973).
13. B. P. Kibble, W. R. C. Rowley, G. W. Series, R. E. Shawyer, J. Phys. **B6**, 1079 (1973).
14. S. Granger, G. W. Ford, Phys. Rev. Lett. **28**, 1479 (1972); J. C. Wesley, A. Rich, Rev. Mod. Phys. **44**, 250 (1972); Phys. Rev. **A4**, 1341 (1971).
15. J. Bailey et al., Nuovo Cimento **A9**, 369 (1972).
16. P. F. Winkler, D. Kleppner, T. Myint, F. G. Waltner, Phys. Rev. **A5**, 83 (1972).
17. R. L. Driscoll, R. D. Cutcosky. J. Res. Nat. Bur. Stand. **60**, 297 (1958).
18. R. L. Driscoll, P. T. Olsen, in: Consultative Committee on Electricity, CIPM, October 1968.
19. P. Vigoreux, Metrologia **1**, 3 (1965); P. Vigoreux, N. Dupuy, Nat. Phys. Lab. Rept. Qu 16 (1970), Qu 23 (1972).
20. P. Vigoreux, Proc. Roy. Soc. **A270**, 72 (1962).
21. K. Hara, H. Nakamura, T. Sakai, N. Koizumi. in: Consultative Committee on Electricity, CIPM, October 1968; см. [3], p. 123.
22. Т. Н. Маляревская, Н. В. Студенцов, В. Я. Шифрин, Тр. метрол. ин-тов СССР, № 120 (180) (1971).
23. P. T. Olsen, R. L. Driscoll, см. [4], p. 471.
24. Г. К. Ягола, В. И. Цингерман, В. Н. Сепети, Изм. техн. **5**, 24 (1962); **7**, 44 (1966).
25. B. P. Kibble, G. J. Hunt, см. [3], p. 131; Nat. Phys. Lab. Rept. Qu 15 (1971).
26. Б. А. Мамырин, Н. Н. Аруев, С. А. Алексеенко, ЖЭТФ **63**, 3 (1972); см. [4], p. 451; см. также [5].
27. B. W. Petley, K. Morris, Nature (Phys. Sci.) **240**, 83 (1972).
28. J. A. Bearden, Phys. Rev. **37**, 1210 (1931); I. Henins, J. A. Bearden, ibid. **A135**, A890 (1964).
29. J. J. Spijkerman, J. A. Bearden, ibid. **A134**, A871.
30. A. Henins, см. [3], p. 255.
31. A. Henins, J. A. Bearden, Phys. Rev. **A135**, 890 (1964).
32. J. A. Bearden, ibid. **B137**, B181 (1965).
33. P. H. M. van Assche et al., см. [3], p. 271.
34. H. Hellwig et al., IEEE Trans. Instrum. and Meas. **IM-19**, 200 (1970).
35. L. Essen et al., Nature **229**, 110 (1971).
36. J. C. Baird, J. Brandenberger, K. I. Gondaira, H. Metcalf, Phys. Rev. **A5**, 564 (1972).
37. B. L. Cosens, T. V. Vorburger, ibid. **A2**, 16 (1970).
38. T. W. Shyn, T. Rebane, R. T. Robiscoe, W. L. Williams, ibid. **A3**, 116 (1971).
39. D. P. Hutchinson et al., Phys. Rev. Lett. **24**, 1254 (1970); см. [3], p. 337.
40. R. DeVoe, et al., ibid. **25**, 1779 (1970).
41. K. M. Crowe et al., Phys. Rev. **D5**, 2145 (1972).
42. W. E. Cleland et al., ibid. **A5**, 2338.
43. P. A. Thompson et al., Phys. Rev. Lett. **22**, 163 (1969).
44. P. A. Thompson et al., Phys. Rev. **A8**, 86 (1973).
45. R. D. Ehrlich et al., ibid. **A5**, 2357 (1972).
46. D. Favart et al., Phys. Rev. Lett. **27**, 1336 (1971).
47. D. N. Craig, J. I. Hoffman, C. A. Law, W. J. Hamer, J. Res. Nat. Bur. Stand. **A64**, 381 (1960).
48. G. Marinenko, J. K. Taylor, Analyt. Chem. **40**, 1645 (1968).
49. D. O. Fystrom, Phys. Rev. Lett. **25**, 1469 (1970); см. [3], p. 169.
50. J. L. Luxon, A. Rich, Phys. Rev. Lett. **29**, 665 (1972).
51. H. Gubler et al., см. [3], p. 177; H. Staub, частное сообщение.
52. J. W. Knowles, Canad. J. Phys. **40**, 257 (1962).
53. J. W. Knowles, цит. в [1a] сборник, p. 113.
54. G. W. Erickson, Phys. Rev. Lett. **27**, 780 (1971).
55. S. L. Kaufman, W. E. Lamb, Jr., K. R. Lea, M. Leventhal, Phys. Rev. **A4**, 2128 (1971).
56. A. Kponou et al., Phys. Rev. Lett. **26**, 1613 (1971).
57. E. R. Carlson et al., ibid. **29**, 1059 (1972).
58. V. E. Bower, см. [4], p. 516.
59. T. W. Hänsch et al., Phys. Rev. Lett. **32**, 1336 (1974).
60. R. D. Deslattes et al., ibid. **33**, 463.