

# ФИЗИЧЕСКИЕ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И ИХ РАЗМЕРНЫЕ И БЕЗРАЗМЕРНЫЕ КОМБИНАЦИИ

*Р. М. Мурадян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дан обзор фундаментальных физических и астрофизических констант и их размерных и безразмерных комбинаций.

The review of fundamental physical and astrophysical constants and their dimensional and dimensionless combinations is given.

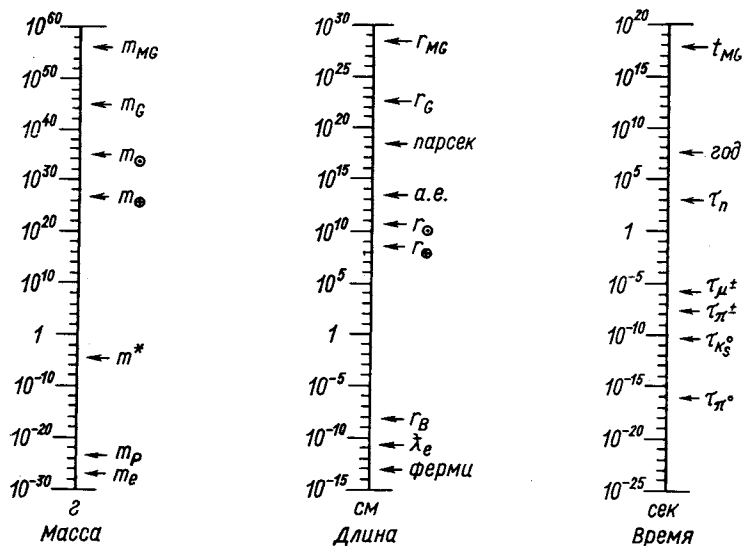
## ВВЕДЕНИЕ

Изучение законов природы основано на измерениях, в результате которых данные определенных экспериментов или наблюдений связываются с числами. В свою очередь, знание численных значений необходимо для того, чтобы иметь возможность применять наиболее мощный инструмент исследования природы — математические методы теоретической физики. Любые вычисления остаются незавершенными, если в окончательные формулы не подставлены числа. Поэтому необходимо иметь под рукой таблицу часто употребляемых величин, расположенных в удобной компактной форме, в которой можно было бы легко отыскать значение нужной величины.

Хорошо известно, что число фундаментальных констант, которые можно измерить, превышает число независимых констант и для того, чтобы получить согласованные значения, необходимо применить определенную процедуру статистической пригонки. Эта работа выполняется специальной международной рабочей группой по фундаментальным физическим постоянным, и в настоящее время наилучшими считаются рекомендуемые согласованные значения фундаментальных физических постоянных, опубликованные в обзоре [1].

В настоящем обзоре приведены систематические данные о фундаментальных физических и астрофизических константах и их

часто встречающихся комбинациях; они расположены так, чтобы подчеркнуть единство и взаимосвязь различных физических величин при всех изученных к настоящему времени значениях масс и интервалов длин и времен (рисунок).



Характерные масса, длина и время жизни различных физических и астрофизических объектов:

$m_{MG}$  — масса Метагалактики,  $m_G$  — Галактики,  $m_{\odot}$  — Солнца,  $m_{\oplus}$  — Земли,  $m^*$  — планковской частицы,  $m_p$  — протона,  $m_e$  — электрона;

$r_{MG}$  — радиус Метагалактики,  $r_G$  — Галактики,  $r_{\odot}$  — Солнца,  $r_{\oplus}$  — Земли,  $r_B$  — боровской орбиты,  $\lambda_e$  — комптоновская длина волны электрона;

$t_{MG}$  — время жизни Метагалактики,  $\tau_n$  — нейтрона,  $\tau_{\mu}$  — мюона,  $\tau_{\pi^{\pm}}$  — заряженных пионов,  $\tau_{K_S^0}$  — короткоживущего нейтрального каона,  $\tau_{\pi^0}$  — ней-

трального пиона

Для этой цели использованы в основном периодически издаваемые обзоры [1—3], в которых приводится исчерпывающая информация об огромном количестве экспериментальных и теоретических работ по фундаментальным физическим и астрофизическим константам.

В отдельных случаях, требующих уточнения, даны ссылки на оригинальные источники. Кроме того, особый раздел посвящен обзору эмпирических соотношений, не вытекающих из какой-либо известной в настоящее время теории, но обладающих простотой и высокой точностью.

1. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Следует отметить, что значения астрофизических и физических величин непрерывно уточняются. Например, принятое в настоящее

Таблица 1

Общие постоянные

Величина	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме *	$c$	$2,997924580 (12) \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$
Гравитационная постоянная	$G$	$6,6720 (41) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{сек}^2)$
	$G/c$	$2,225 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{сек})$
	$G/c^2$	$7,424 \cdot 10^{-29} \text{ см/г}$
Сидерический год	$1 \text{ год}$	$365,256 \text{ суток} = 3,1558 \cdot 10^7 \text{ сек} \approx$ $\approx (\pi \cdot 10^7 \text{ сек})$
Световой год	$1 \text{ св. год}$	$9,460 \cdot 10^{17} \text{ см}$
Парсек	$1 \text{ пс}$	$3,086 \cdot 10^{18} \text{ см} = 3,261 \text{ св. год}$
Астрономическая единица длины — среднее расстояние Земля — Солнце	$1 \text{ а. е.}$	$1,495985 (5) \cdot 10^{13} \text{ см}$

\* Согласно работе [12], более точное значение скорости света в вакууме  $c = 2,997924590 (8) \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ .

Таблица 2

Метагалактика

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_{MG}$	$10^{56} \text{ г}$
Число нуклонов (число Эддингтона)	$N_E = m_{MG}/m_p$	$10^{80}$
Постоянная Хаббла	$H_0$	$50 \text{ км/(сек} \cdot \text{Мпс)} =$ $= 1,62 \cdot 10^{-18} \text{ 1/сек}$ $0,62 \cdot 10^{18} \text{ сек} =$ $= 19,7 \cdot 10^9 \text{ лет}$
Возраст по Хабблу	$t_{MG} = 1/H_0$	$1,86 \cdot 10^{28} \text{ см} = 6000 \text{ Мпс}$
Радиус	$r_{MG} = c/H_0$	$0,74 \cdot 10^{28} \text{ см}$
Гравитационный радиус	$Gm_{MG}/c^2$	$2,2 \cdot 10^{94} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Керровский момент	$Gm_{MG}^2/c$	$5,6 \cdot 10^{94} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Действие для Метагалактики	$m_{MG}c^2/H_0$	$0,5 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$
Критическая плотность	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$2,68 (10) \text{ }^\circ\text{К}$
Температура эффективного чернотельного излучения	$T_{\gamma 0}$	$0,48 \text{ см}$
Длина волны максимума планковского распределения	$\lambda_{\text{макс}} =$ $= \text{Пост. Вина}/T_{\gamma 0}$	$3,67 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$
Плотность энергии излучения	$\rho_{\gamma 0} = aT_{\gamma 0}^4 =$ $= (\pi^2/15)(\kappa T_{\gamma 0}^4/(\pi c)^3$ $\rho_{\gamma 0}/c^2$	$4,42 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3$

Таблица 3

## Галактика

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_G$	$1,67 \cdot 10^{11} m_\odot = 3,32 \cdot 10^{44} \text{ г}$
Число нуклонов	$N_G = m_G/m_p$	$2 \cdot 10^{68}$
Радиус	$r_G$	$20 \text{ кпс} = 6 \cdot 10^{22} \text{ см}$
Толщина диска	$h_G$	$1 \text{ кпс}$
Гравитационный радиус	$Gm_G/c^2$	$2,46 \cdot 10^{16} \text{ см}$
Собственный угловой момент	$J_G$	$1,8 \cdot 10^{74} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Керровский момент	$Gm_G^2/c$	$2,4 \cdot 10^{71} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Радиус ядра	$r_G$	$10 \text{ пс} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}$
Средняя плотность вещества	$\rho_G$	$7 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 = 0,1 m_\odot/\text{пс}^3$
Средняя напряженность магнитного поля в диске	$\overline{\mathcal{H}}_G$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ гс}$
Оптическая светимость	$L_G^{\text{опт}}$	$4 \cdot 10^{43} \text{ эрг/сек}$
Возраст		$7 \cdot 10^9 \text{ лет}$

Таблица 4

## Солнце

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_\odot$	$1,989 \cdot 10^{33} \text{ г}$
Число нуклонов	$N_\odot = m_\odot/m_p$	$1,2 \cdot 10^{57}$
Радиус	$r_\odot$	$6,960 \cdot 10^{10} \text{ см}$
Гравитационный радиус	$Gm_\odot/c^2$	$1,475 \text{ км}$
Собственный угловой момент	$J_\odot$	$1,8 \cdot 10^{48} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Керровский момент	$Gm_\odot^2/c$	$8,7 \cdot 10^{48} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$
Расстояние до центра Галактики		$10 \text{ кпс} = 3 \cdot 10^{22} \text{ см}$
Скорость вращения вокруг центра Галактики	$v_\odot$	$220 \text{ км/сек}$
Средняя напряженность магнитного поля на поверхности	$\overline{\mathcal{H}}_\odot$	$1,5 \text{ гс}$
Магнитный момент эквивалентного диполя	$\mu_\odot$	$0,35 \cdot 10^{33} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Полная светимость	$L_\odot$	$3,9 \cdot 10^{33} \text{ эрг/сек}$

Т а б л и ц а

Земля

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_{\oplus}$	$5,977 \cdot 10^{27} \text{ г}$
Число нуклонов	$N_{\oplus} = m_{\oplus} / m_p$	$3,58 \cdot 10^{51}$
Экваториальный радиус	$r_{\oplus}$	$6,378 \cdot 10^8 \text{ см}$
Гравитационный радиус	$Gm_{\oplus} / c^2$	$0,444 \text{ см}$
Собственный угловой момент	$J_{\oplus}$	$5,91 \cdot 10^{40} \text{ г} \cdot \text{см}^2 / \text{сек}$
Керровский момент	$Gm_{\oplus}^2 / c$	$7,95 \cdot 10^{36} \text{ г} \cdot \text{см}^2 / \text{сек}$
Средняя орбитальная скорость	$v_{\oplus}$	$29,78 \text{ км/сек}$
Орбитальный угловой момент	$J_{\oplus}^{\text{орб}}$	$2,672 \cdot 10^{47} \text{ г} \cdot \text{см}^2 / \text{сек}$
Напряженность магнитного поля на полюсах и экваторе	$\mathcal{H}_{\oplus}^p$	$0,6 \text{ гс}$
	$\mathcal{H}_{\oplus}^e$	$0,3 \text{ гс}$
Магнитный момент эквивалентного диполя	$\mu_{\oplus}$	$8,06 \cdot 10^{25} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Возраст		$4,6 (1) \cdot 10^9 \text{ лет}$

Т а б л и ц а 6

Луна

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_{\text{л}}$	$7,347 \cdot 10^{25} \text{ г} = m_{\oplus} / 81,35$
Радиус	$r_{\text{л}}$	$1737,63 \text{ км}$
Среднее расстояние Земля—Луна	$r_{\oplus \text{л}}$	$3,844 \cdot 10^{10} \text{ см}$
Верхняя граница значения дипольного магнитного момента	$\mu_{\text{л}}$	$< 4 \cdot 10^{18} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Период осевого вращения	$t_{\text{л}}$	$29,531 \text{ суток}$

время значение постоянной Хаббла почти на порядок меньше оценки самого Хаббла, сделанной двадцать лет назад. И вообще, большинство данных, относящихся к Метагалактике, может содержать неопределенность от одного до двух порядков величины. Приведены основные параметры нашей Галактики, Солнца, Земли и планет Солнечной системы. Большой прогресс в изучении Солнечной системы за последние годы обусловлен успехами космонавтики. К имеющимся в настоящее время данным, по-видимому, будут в ближайшее время сделаны соответствующие поправки. Например, скоро расстояние от Земли до Луны будет точнее измерено с помощью времени пролета лазерного импульса, отраженного от

Таблица 7

## Планеты

Планета	Масса, $g$	Радиус, $км$	Среднее расстояние от Солнца, $см$	Период осевого вращения	Сидерический период обращения, $год$	Орбитальная скорость, $км/сек$	Момент количества движения, $г \cdot см^2/сек$		Дипольный магнитный момент, $гс \cdot см^3$
							собственный	орбитальный	
Меркурий ☿	$0,32 \cdot 10^{27}$	2437	$5,8 \cdot 10^{12}$	58,646 суток	0,241	47,90	—	8,890 · 10 <sup>45</sup>	$\sim -10^{21}$
Венера ♀	$4,78 \cdot 10^{27}$	$6052,5 \pm 2,5$	$1,08 \cdot 10^{13}$	244,3 суток	0,615	35,05	—	$1,809 \cdot 10^{47}$	$\sim 0$
Земля ⊕	$5,977 \cdot 10^{27}$	6378	$1,50 \cdot 10^{13}$	23 ч 56 мин 4 сек	1,000	29,80	$5,91 \cdot 10^{40}$	$2,672 \cdot 10^{47}$	$-8,06 \cdot 10^{25}$
Марс ♂	$6,423 \cdot 10^{26}$	$3386 \pm 6$	$2,28 \cdot 10^{13}$	24 ч 37 мин 23 сек	1,881	24,14	—	$3,535 \cdot 10^{46}$	$+2,47 \cdot 10^{22}$
Юпитер ♃	$1,899 \cdot 10^{30}$	71600	$7,78 \cdot 10^{13}$	9 ч 50 мин	11,86	13,06	$4,43 \cdot 10^{45}$	$1,929 \cdot 10^{50}$	$+1,3 \cdot 10^{30}$
Сатурн ♄	$5,685 \cdot 10^{29}$	60250	$1,43 \cdot 10^{14}$	10 ч 14 мин	29,46	9,65	$7,9 \cdot 10^{44}$	$7,813 \cdot 10^{49}$	—
Уран ♅	$0,87 \cdot 10^{29}$	25400	$2,87 \cdot 10^{14}$	10 ч 7 мин	84,01	6,80	$1,9 \cdot 10^{43}$	$1,700 \cdot 10^{49}$	—
Нептун ♆	$1,00 \cdot 10^{29}$	24750	$4,50 \cdot 10^{14}$	15 ч 8 мин	164,7	5,43	—	$2,444 \cdot 10^{49}$	—
Плутон ♇	$5,38 \cdot 10^{27}$	3200	$5,93 \cdot 10^{14}$	6 суток 9 ч 16 мин 54 сек ± 26 сек	248,9	4,74	—	$1,5 \cdot 10^{47}$	—

Примечания: 1. Суммарная масса планет  $m_{tot} = 2,68 \cdot 10^{30} g = 447,9 m_{\oplus}$ .

2. Полный угловой момент Солнечной системы  $J_{tot} = 3,15 \cdot 10^{50} g \cdot см^2/сек$ .

3. Дипольные магнитные моменты, заключенные в скобки, полученные на основе эмпирической формулы Блекетта (Блекетт П. М. «УФН», 1947, т. 33, с. 52):  $\mu = \sqrt{GJ/c} \approx 10^{-15} J$ .

специальных отражателей, доставленных на Луну советским «Луноходом» и американскими астронавтами.

Более подробные данные об астрофизических величинах можно найти в книге [3].

### 2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В этом разделе приведены фундаментальные константы и параметры элементарных частиц. Фундаментальными константами обычно называются величины, определяющие характер квантовых явлений: квант действия или постоянная Планка, элементарный электрический заряд и др. В последние годы большой про-

Таблица 8

Общие постоянные

Величина	Обозначение	Значение
Постоянная Планка	$h$	$6,626176 (36) \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$
	$\hbar = h/2\pi$	$1,0545887 (57) \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек} =$ $= 6,582173 (17) \cdot 10^{-22} \text{ Мэв} \cdot \text{сек}$
	$hc$	$3,16129 \cdot 10^{-17} \text{ эрг} \cdot \text{см} =$ $= 197,32858 (51) \text{ Мэв} \cdot \text{ферми}$
Элементарный заряд	$e$	$4,803242 (14) \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} =$ $= 1,6021892 (46) \cdot 10^{-19} \text{ к}$
Постоянная тонкой структуры*	$\alpha = e^2/\hbar c$	$1/137,03604 (11) =$ $= 0,0072973506 (60)$
Частота фотона с энергией 1 эв	$\omega/h$	$2,4179696 (63) \cdot 10^{14} \text{ гц}$
Длина волны фотона с энергией 1 эв	$hc/\omega$	$1,2398520 (32) \cdot 10^{-4} \text{ см}$
Ферми	1 ферми	$10^{-13} \text{ см}$
Барн	1 барн	$10^{-24} \text{ см}^2$
Переводные множители	1 Мэв	$1,6021892 (46) \cdot 10^{-6} \text{ эрг}$
	1 Мэв/с	$5,344 \cdot 10^{-17} \text{ г} \cdot \text{см/сек}$
	1 Мэв/с <sup>2</sup>	$1,783 \cdot 10^{-27} \text{ г}$

\* Наиболее точное значение постоянной тонкой структуры [23]  $\alpha = 1/137,035987 (29)$ .

Таблица 9

### Дейтон

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_d$	$1875,628 (5) \text{ Мэв}/c^2$
Дефект массы	$\Delta m_d = m_d - (m_p + m_n)$	$-2,22462 (150) \text{ Мэв}/c^2$
Энергия связи	$E_B = \Delta m_d c^2$	$-2,22462 (150) \text{ Мэв}$
Радиус	$r_d$	$4,3157 (5) \text{ ферми}$
Магнитный момент	$\mu_d$	$0,18579612 \mu_N$
	$\mu_d - (\mu_p + \mu_n)$	$0,0224 \mu_N$
Электрический квадрупольный момент	$Q$	$2,88 \text{ мбарн} = 0,288 \text{ ферми}^2$

Таблица 10

## Мюон

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_\mu$	105,65948 (35) $Mэв/c^2 =$ $= 1,883566 (11) \cdot 10^{-25} \text{ г}$
Отношение масс мюона и электрона	$m_\mu/m_e$	206,76865 (47)
Магнитный момент *	$\mu_\mu$	1,00116616 (31) $e\hbar/2m_\mu c =$ $= 4,490474 (18) \cdot 10^{-23} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Отношение магнитных моментов мюона и протона	$\mu_\mu/\mu_p$	3,1833402 (72)
Среднее время жизни	$\tau_\mu$	2,19711 (8) $\cdot 10^{-6} \text{ сек}$

\* Согласно работе [13], уточненное значение  $\mu_\mu = 1,0011658350 (22) e\hbar/2m_\mu c$ .

Таблица 11

## Протон

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_p$	938,2796 (27) $Mэв/c^2 =$ $= 1,6726485 (86) \cdot 10^{-24} \text{ г} =$ $= 1836,15152 (70) m_e =$ $= 6,72270 (31) m_{\pi^\pm}$
Радиус	$\langle r_p^2 \rangle^{1/2}$	0,85 (6) ферми
Комптоновская длина волны	$\lambda_p = \hbar/m_p c$	0,21030892 (36) $\cdot 10^{-13} \text{ см}$
Ядерный магнетон	$\lambda_{p/c} = \hbar/m_p c^2$	0,7015 $\cdot 10^{-24} \text{ сек}$
Магнитный момент	$\mu_N = e\hbar/2m_p c$	0,5050824 (20) $\cdot 10^{-23} \text{ гс} \cdot \text{см}^3 =$ $= 3,1524515 (53) \cdot 10^{-18} Mэв'гс$
Отношение магнитных моментов электрона и протона	$\mu_p$	2,7928456 (11) $\mu_N =$ $= 1,4106171 (55) \cdot 10^{-23} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Отношение магнитных моментов нейтрона и протона	$\mu_e/\mu_p$	-658,2106880 (66)
Гравитационный радиус	$\mu_n/\mu_p$	-0,6850
Керровский момент	$Gm_p/c^2$	1,242 $\cdot 10^{-52} \text{ см}$
	$Gm_p^2/c$	3,723 $\cdot 10^{-66} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$



Таблица 12

## Пион

Величина	Обозначение	Значение
Масса заряженного пиона	$m_{\pi^{\pm}}$	$139,5688 (64) M_{\text{эв}}/c^2 =$ $= 2,488 \cdot 10^{-25} \text{ г} = 273,1 m_e$
Масса нейтрального пиона	$m_{\pi^0}$	$134,9645 (74) M_{\text{эв}}/c^2 =$ $= 2,407 \cdot 10^{-25} \text{ г}$
Радиус	$\langle r^2 \rangle_{\pi^{\pm}}^{1/2}$	$0,78^{+0,09}_{-0,10}$ ферми
Комптоновская длина волны	$\lambda_{\pi^{\pm}} = \hbar/m_{\pi^{\pm}}c$	1,4135 ферми
	$\lambda_{\pi^0} = \hbar/m_{\pi^0}c$	1,4615 ферми
Среднее время жизни	$\tau_{\pi^{\pm}}$	$2,6030 (23) \cdot 10^{-8}$ сек
	$\tau_{\pi^0}$	$8,21 (43) \cdot 10^{-17}$ сек
Усредненная масса	$m_{\pi} =$ $= (m_{\pi^{\pm}} + m_{\pi^0})/2$	$137,26665 M_{\text{эв}}/c^2$

Таблица 13

## Электрон

Величина	Обозначение	Значение
Масса	$m_e$	$0,5110034 (14) M_{\text{эв}}/c^2 =$ $= 0,9109534 (47) \cdot 10^{-27} \text{ г}$
Классический радиус Комптоновская длина волны	$r_e = e^2/m_e c^2 = \alpha \lambda_e$	$2,8179380 (70) \cdot 10^{-13} \text{ см}$
	$\lambda_e = \hbar/m_e c$	$3,8615905 (64) \cdot 10^{-11} \text{ см}$
Радиус первой боровской орбиты	$\lambda_e/c$	$1,2881 \cdot 10^{-21} \text{ сек}$
Скорость на первой бор- овской орбите	$r_B = \hbar^2/m_e e^2 =$ $= \alpha^{-1} \lambda_e$	$0,52917706 (44) \cdot 10^{-8} \text{ см}$
	$v_B = e^2/\hbar = \alpha c$	$2,1877 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$
Импульс на первой бор- овской орбите	$P_B = m_e v_B = \alpha m_e c$	$1,9929 \cdot 10^{-19} \text{ г} \cdot \text{см/сек}$
Магнетон Бора *	$\mu_B = eh/2m_e c$	$0,9274078 (36) \cdot 10^{-20} \text{ эс} \cdot \text{см}^3 =$ $= 0,57883785 (95) \cdot 10^{-14} M_{\text{эв}}/\text{эс}$
	$\mu_e$	$-1,0011596567 (35) \mu_B =$ $= -0,9284832 (3,6) \cdot 10^{-20} \text{ эс} \cdot \text{см}^3$
Частота и амплитуда спредингеровского дрож- ания в системе покоя	$\nu = 2m_e c^2/\hbar$	$1,553 \cdot 10^{21} \text{ гц}$
	$\hbar/2m_e c$	$193,08 \text{ ферми}$
Гравитационный радиус Керровский момент	$Gm_e/c^2$	$6,763 \cdot 10^{-56} \text{ см}$
	$Gm_e^2/c$	$1,846 \cdot 10^{-72} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$

 \* Так как  $[\text{эс}] = [e^{1/2}/(\text{см}^{1/2}\text{сек})]$ , то  $\text{эс} \cdot \text{см}^3 \equiv \text{эрг}/\text{эс}$ .

## Электромагнитные взаимодействия

Величина	Обозначение	Значение
Характерное время	$r_B/v_B = \hbar^3/m_e e^4$	$2,4189 \cdot 10^{-17}$ сек
Томсоновское сечение	$\sigma_{Te}^0 = 8\pi r_e^2/3$	$0,6652448$ (33) барн
Постоянная Ридберга	$R_\infty = (\alpha^2/2) m_e c^2 = m_e e^4/2\hbar^2$	$13,605804$ (36) эв
Квант магнитного потока	$R_\infty/\hbar$	$3,28984200$ (25) $\cdot 10^{15}$ гу
Квант циркуляции	$\Phi_0 = h/2e$	$2,0678506$ (54) $\cdot 10^{-7}$ гс $\cdot$ см <sup>2</sup>
Электрический потенциал протона на первой боровской орбите	$h/2m_e$	$3,6369455$ (60) см <sup>2</sup> /сек
Напряженности критических полей	$e/r_B = m_e e^3/\hbar^2$	$27,210$ в
Лэмбовский сдвиг [19] в водороде	$\mathcal{E}_{\text{крит}} = m_e^2 c^3/e\hbar$ $\mathcal{E}'_{\text{крит}} = m_e^2 c^3/e\hbar$	— $4,414 \cdot 10^{13}$ гс
Частота сверхтонкого расщепления (эксперимент):	$1057,90$ (6) Мгц (эксперимент)	$1057,911$ (12) Мгц (теория)
в водороде ( $\lambda \approx \approx 21$ см)	$\nu H h f_s$	$1420405751,7662$ (3) гу
в мюонии, $\mu^+e^-$ [23]	$\nu M h f_s$	$4463302,2$ (1,4) кгц
в позитронии, $e^+e^-$ [20]	$\nu P h f_s$	$203387,0$ (1,6) Мгц
Скорость распада парапозитрония ( $1S_0$ )	$1/\tau_{2\gamma} = \alpha^5 m_e c^2/2\hbar \times$ $\times \left[ 1 - \frac{\alpha}{\pi} (5 - (1/4)\pi^2) \right] =$ $= 0,79854 \cdot 10^{10}$ сек <sup>-1</sup> (теория)	$0,799$ (11) $\cdot 10^{10}$ сек <sup>-1</sup> (эксперимент)
ортопозитрония ( $3S_1$ )	$1/\tau_{3\gamma} = 2\alpha^6 m_e c^2 (\pi^2 - 9)/9\pi\hbar \left[ 1 + \frac{\alpha}{\pi} (1,86 \pm \pm 0,45) \right] = 0,7242$ (8) $\times$ $\times 10^7$ сек <sup>-1</sup> (теория)	$0,7275$ (15) $\cdot 10^7$ сек <sup>-1</sup> (эксперимент)

гресс в определении численных значений фундаментальных констант был достигнут, в частности, в результате использования эффекта Дژهозефсона. Кроме того, непрерывно уточняются параметры элементарных частиц, такие, как масса, время жизни, магнитный момент и др. Наиболее полные данные в этой области содержатся в обзоре [2].

Т а б л и ц а 15

Слабые взаимодействия

Величина	Обозначение	Значение
Перенормированная константа Ферми для $\mu$ -распада	$G_{\mu}$	$1,4320(11) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3 =$ $= 1,024 \cdot 10^{-5} \text{ } \hbar^3 / m_p^2 c$
Перенормированная константа векторного взаимодействия Ферми для $\beta$ -распада нейтрона	$G_V$	$1,4149(22) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3 =$ $= 1,012 \cdot 10^{-5} \text{ } \hbar^3 / m_p^2 c$
Отношение аксиально-векторной и векторной констант для $\beta$ -распада нейтрона	$\left  \frac{G_A}{G_V} \right $	1,23 (2)
Угол Кабиббо	$\vartheta_c$ $\cos \vartheta_c$ $\sin \vartheta_c$	$13^{\circ}20'$ 0,973 (3) 0,230 (3)
Безразмерная «постоянная тонкой структуры» для взаимодействия Ферми	$\frac{G_V^2}{(\hbar c)^2} \left( \frac{m_e c}{\hbar} \right)^2 \left( \frac{m_p c}{\hbar} \right)^2 \equiv$ $\equiv \left( \frac{G_V m_e m_p c}{\hbar^3} \right)^2$	$1,085 \cdot 10^{-17}$
Характерное время	$\left( \frac{G_V m_e m_p c}{\hbar^3} \right)^{-2} \frac{\hbar}{m_e c^2} \equiv$ $\equiv \frac{\hbar^7}{G_V^2 m_e^3 m_p^2 c^4}$	$1,187 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$
Фундаментальная длина Гейзенберга	$\sqrt{\frac{G_V}{\hbar c}}$	$6,690 \cdot 10^{-17} \text{ см}$
Характерное сечение	$\left( \frac{G_V m_e m_p c}{\hbar^3} \right)^2 \left( \frac{\hbar}{m_e c} \right)^2 \equiv$ $\equiv \frac{G_V^2 m_p^2}{\hbar^4}$	$4,528 \cdot 10^{-38} \text{ см}^2$
Константа распада заряженных пионов (соотношение Голдбергера — Треймана $g_{\pi NN} f_{\pi} =$ $= \sqrt{2} m_p \frac{G_A}{G_V}$ )	$f_{\pi}$	0,97 $m_{\pi}$

Стабильные и метастабильные элементарные частицы

Частица $I^G(J^P)C_n$	Масса $m$ , $M\text{эв}/c^2$	Среднее время жизни $\tau$ , $\text{сек}$	
$\gamma$	0,1 (1 <sup>-</sup> ) <sup>-</sup>	0 ( $< 3,5 \cdot 10^{-48}$ э)	Стабилен
$\nu_e, \bar{\nu}_e$	$J = 1/2$	0 ( $< 60 \text{ эв}/c^2$ )	»
$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	$J = 1/2$	0 ( $< 1,2 M\text{эв}/c^2$ )	»
$e^\pm$	$J = 1/2$	0,5110034 (14)	»
$\mu^\pm$	$J = 1/2$	105,65948 (35)	$2,19711 (8) \cdot 10^{-6}$
$\pi^0$	1 <sup>-</sup> (0 <sup>-</sup> ) <sup>+</sup>	134,9645 (74)	$8,21 (43) \cdot 10^{-17}$
$\pi^\pm$	1 <sup>-</sup> (0 <sup>-</sup> )	139,5688 (64)	$2,6030 (23) \cdot 10^{-8}$
$K^\pm$	1/2 (0 <sup>-</sup> )	493,707 (37)	$1,2371 (26) \cdot 10^{-8}$
$K^0, \bar{K}^0$	1/2 (0 <sup>-</sup> )	497,70 (13)	50% $K_S^0$ , 50% $K_L^0$
$K_S^0$	1/2 (0 <sup>-</sup> )	$m_{K_L^0} - m_{K_S^0} =$	$0,886 (7) \cdot 10^{-10}$
$K_L^0$	1/2 (0 <sup>-</sup> )	$= 3,5564 \cdot 10^{-12}$	$5,179 (40) \cdot 10^{-8}$
$\eta$	0 <sup>+</sup> (0 <sup>-</sup> ) <sup>+</sup>	548,8 (6)	$7,74 (1,09) \cdot 10^{-19}$
$p$	1/2 (1/2 <sup>+</sup> )	938,2796 (27)	Стабилен ( $> 2 \cdot 10^{30}$ лет)
$n$	1/2 (1/2 <sup>+</sup> )	939,5731 (27)	918 (14)
$\Lambda$	0 (1/2 <sup>+</sup> )	1115,60 (5)	$2,578 (21) \cdot 10^{-10}$
$\Sigma^+$	1 (1/2 <sup>+</sup> )	1189,37 (6)	$0,800 (6) \cdot 10^{-10}$
$\Sigma^0$	1 (1/2 <sup>+</sup> )	1192,48 (8)	$\leq 10^{-14}$
$\Sigma^-$	1 (1/2 <sup>+</sup> )	1197,35 (6)	$1,482 (17) \cdot 10^{-10}$
$\Xi^0$	1/2 (1/2 <sup>+</sup> )	1314,9 (6)	$2,96 (12) \cdot 10^{-10}$
$\Xi^-$	1/2 (1/2 <sup>+</sup> )	1321,29 (14)	$1,652 (23) \cdot 10^{-10}$
$\Omega$	0 (3/2 <sup>+</sup> )	1672,2 (4)	$1,3_{-0,2}^{+0,3} \cdot 10^{-10}$
$J/\psi$ (3098)	0 <sup>-</sup> (1 <sup>-</sup> ) <sup>-</sup>	3095 (5)	$9,54 (2,07) \cdot 10^{-21}$
$\psi'$ (3684)	0 <sup>-</sup> (1 <sup>-</sup> ) <sup>-</sup>	3684	$2,93 (73) \cdot 10^{-21}$

Примечание. Таблица составлена на основании обзора [2], за исключением времени жизни частиц  $\mu^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\psi$  (3095) и  $J/\psi$  (3684) [18].

В настоящем разделе помимо данных об элементарных частицах приведены также различные размерные и безразмерные комбинации фундаментальных констант, играющие важную роль в физике электромагнитных, сильных и слабых взаимодействий.

Отметим, что уточнение фундаментальных констант кроме принципиального чисто научного интереса имеет также большое прикладное значение для установления прецизионных единиц и стандартов измерения на основе методов квантовой метрологии [4].

Т а б л и ц а 17

Сильные взаимодействия

Величина	Обозначение	Значение
Характерное время	$\hbar/m_{\pi}c^2$	$4,8 \cdot 10^{-24}$ сек
Характерное сечение	$\sigma = \pi (\hbar/m_{\pi}c)^2$	$65$ мбарн $= 6,5 \cdot 10^{-26}$ см <sup>2</sup>
Перенормированная константа $\pi N$ -взаимодействия	$g_{\pi NN}^2/4\pi$	14,5
Перенормированная константа $\rho$ -взаимодействия	$f_{\rho\pi\pi}^2/4\pi$	2,6 (3)
Среднее значение поперечного импульса частиц, образующихся в адрон-адронных столкновениях	$\langle P_{\perp} \rangle$	0,4 (1) Гэв/с
Предельная температура Хэгедорна	$T_H$ $KT_H$	$2,56 \cdot 10^{12}$ К 160 Мэв

3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Недавно были предложены новые методы измерения постоянной Фарадея и числа Авогадро, что позволило уточнить их значе-

Т а б л и ц а 18

Физико-химические постоянные

Величина	Обозначение	Значение
Число Авогадро *	$N_A$	$6,022045(31) \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Газовая постоянная	$R$	$8,31441(26) \cdot 10^7$ эрг/(моль °К) = $= 1,98719(6)$ кал/(моль °К)
Объем одного моля идеального газа при $T_0 = 273,15^\circ$ К, $P_0 = 1$ атм	$V_m = RT_0/P_0$	$22,41383(70) \cdot 10^3$ см <sup>3</sup> /моль
Число Лошмидта	$L_0 = N_A/V_m$	$2,686754(84) \cdot 10^{19}$ см <sup>-3</sup>
Постоянная Фарадея	$F = N_{Ae}$	$2,8925342(82) \cdot 10^{14}$ СГСЭ/моль = $= 9,6484456(27)$ к/моль
Постоянная Больцмана	$k = R/N_A$	$1,380662(44) \cdot 10^{-16}$ эрг/°К = $= 8,61735(27) \cdot 10^{-11}$ Мэв/°К = $= 1/11604,50(36)$ эв/°К
Постоянная Стефана ( $\sigma T^4$ — плотность энергии, излучаемой в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела)	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$5,67032(71) \cdot 10^{-5}$ эрг/(сек·см <sup>2</sup> ·°К <sup>4</sup> )
Постоянная Вина	$a = 4\sigma/c = \pi^2 k^4/15c^3\hbar^3$	$7,5657 \cdot 10^{-15}$ эрг/(см <sup>3</sup> ·°К <sup>4</sup> )
		0,289 см·°К

\* В работе [15] получено более точное значение числа Авогадро  $N_A = 6,0220943(61) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

ния. Однако эти значения не вошли в число рекомендуемых значений в обзоре [1].

#### 4. ЧАСТИЦЫ И ГРАВИТАЦИЯ

Здесь приведены значения некоторых комбинаций, содержащих гравитационную постоянную и фундаментальные константы.

Т а б л и ц а 19

Частицы и гравитация

Величина	Обозначение	Значение
Планковская масса	$m^* = \sqrt{\hbar c/G}$	$2,177 \cdot 10^{-5} \text{ г}$
Планковский радиус	$r^* = \hbar/m^*c = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,616 \cdot 10^{-33} \text{ см}$
Планковское время	$t^* = r^*/c = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,390 \cdot 10^{-44} \text{ сек}$
Планковская плотность	$\rho^* = m^*/r^{*3} = c^5/G^2\hbar$	$5,159 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3$
Планковская энергия	$E^* = m^*c^2 = \sqrt{\hbar c^5/G}$	$1,224 \cdot 10^{28} \text{ эв}$
Планковский магнетон	$\mu^* = e\hbar/m^*c$	$0,776 \cdot 10^{-42} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$
Гравитационный заряд электрона	$\sqrt{G}m_e$	$2,353 \cdot 10^{-31} \text{ э}^{1/2} \cdot \text{см}^{3/2}/\text{сек}$
Гравитационный заряд протона	$\sqrt{G}m_p$	$4,320 \cdot 10^{-28} \text{ э}^{1/2} \cdot \text{см}^{3/2}/\text{сек}$
Отношение электрического заряда к гравитационному:		
для электрона	$e/\sqrt{G} m_e$	$2,041 \cdot 10^{21}$
для протона	$e/\sqrt{G} m_p$	$1,112 \cdot 10^{18}$
Безразмерные гравитационные соотношения:		
для электрона	$\hbar c/Gm_e^2$	$5,710 \cdot 10^{44}$
для протона	$\hbar c/Gm_p^2$	$1,694 \cdot 10^{38}$
для пиона	$\hbar c/Gm_\pi^2$	$0,793 \cdot 10^{40}$

#### 5. ЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Имеется несколько соотношений между различными величинами, которые не вытекают из существующих в настоящее время теорий и поэтому их следует рассматривать как нумерологические (цифровые) совпадения. Несколько таких соотношений вместе с ссылками на первоисточники приведено в данном разделе.

Некоторые из этих соотношений выполняются с исключительно высокой степенью точности. Например, отношение масс недавно открытых частиц  $\mathcal{Y}/\psi$  и  $\psi'$  равно  $m_{\psi'}/(3684/m_{\mathcal{Y}/\psi})$  (3098) = 1,1891542, в то время как  $\sqrt[4]{2} = 1,1892071$ . Аналогично с высокой степенью точности имеет место соотношение  $m_\Delta/m_p = \sqrt[4]{2}$ . Можно ожидать,

что некоторые из приведенных здесь соотношений не случайны и вскоре будут теоретически объяснены.

Т а б л и ц а 20

Соотношения между массами элементарных частиц

Соотношение	Литература	Соотношение	Литература
$m_p/m_e = 6\pi^5$ (1836, 1515 $\approx$ 1836, 1181)	[24]	$m_n = 2m_{\pi^\pm} + 2m_{\pi^0}$	[28]
$m_e/m_\mu = 2\alpha/3$	[25]	$m_p : m_\Delta : m_\Sigma : m_\Xi =$ $= 1 : \sqrt[4]{2} : \sqrt[3]{2} : \sqrt{2}$	[29]
$m_e/m_{\pi^\pm} = \alpha/2$	[26]	$m_{\psi'} (3684)/m_{\psi} (3098) = \sqrt[4]{2}$	
$m_e/m_\mu = 3\alpha \ln 2/\pi$ [(3 $\alpha \ln 2/\pi)^{-1} m_e = 105,7943 \text{ Мэв}]$	[27]	$m_\mu = \sqrt{3/G} e\alpha^9$	[30]
$(m_n - m_p)/(m_\Delta - m_p) = \alpha$			

Т а б л и ц а 21

Эмпирические соотношения Мак-Грегора между временами жизни метастабильных частиц [17]

Частица	Экспериментальное время жизни $\tau$ , сек	Отношение $\tau$ ко времени жизни нейтрона (эксперимент)	По Мак-Грегору
$n$	918 (14)	1	1
$\mu^\pm$	$2,19711 (8) \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$\alpha^4$
$K_L^0$	$5,179 (40) \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^{-11}$	$\alpha^{5.2}$
$\pi^\pm$	$2,6030 (23) \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$\alpha^5$
$K^\pm$	$1,2371 (26) \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$\alpha^{5.1/2}$
$\Xi^0$	$2,96 (12) \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^{6.2}$
$\Lambda$	$2,578 (21) \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^{6.2}$
$\Xi^-$	$1,652 (23) \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^{6.2}$
$\Sigma^-$	$1,482 (17) \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^6$
$\Omega^-$	$1,3_{-0}^{+0}, \frac{3}{2} \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^6$
$K_S^0$	$0,886 (7) \cdot 10^{-10}$	$0,9 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^{6.1/2}$
$\Sigma^+$	$0,800 (6) \cdot 10^{-10}$	$0,9 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^{6.1/2}$
$\Sigma^0$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-14}$	$\leq 1,1 \cdot 10^{-17}$	$\alpha^8$
$\pi^0$	$8,21 (43) \cdot 10^{-17}$	$8,9 \cdot 10^{-20}$	$\alpha^9$
$\eta$	$7,74 (1,09) \cdot 10^{-19}$	$8,4 \cdot 10^{-22}$	$\alpha^{10}$
$\psi/\psi' (3098)$	$9,54 (2,07) \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-23}$	$\alpha^{11.2}$
$\psi' (3684)$	$2,93 (73) \cdot 10^{-21}$	$3,2 \cdot 10^{-24}$	$\alpha^{11}$

П р и м е ч а н и е. Значения  $\alpha^n$  при  $n$  от 1 до 11 приведены на стр. 189.

Таблица 22

Космологические соотношения

Величина	Формула	Литература
Соотношение Стюарта $Gm_e^2/r_e = \alpha^2 \hbar H_0$	$m_e = \alpha (\hbar^2 H_0 / Gc)^{1/3}$	[31]
Соотношение Вейнберга $Gm_\pi^2 / \hbar \pi = \hbar H_0$	$m_\pi = (\hbar^2 H_0 / Gc)^{1/3}$	[32]
Соотношение Дирака	$m_{MG} = m_p (\hbar c / Gm_p^2)^2$	[33]
Типичная масса галактик	$10^{11} m_\odot = m_\pi (\hbar c / Gm_\pi^2)^{7/4}$	[34]
Типичная масса звезд	$3,8 \cdot 10^{33} e = m_p (\hbar c / Gm_p^2)^{3/2}$	—
Масса планковской частицы (по определению)	$m^* \equiv m_p (\hbar c / Gm_p^2)^{1/2}$	—
Число Эддингтона $N_E = m_{MG} / m_p$	$N_E = \frac{3}{2} \cdot 2^{162} \cdot 136 \approx 10^{79}$	[35]
Отношение действия для Метагалактики к элементарному действию	$m_{MG} c^2 / \hbar H_0 \approx 10^{120} \approx N_E^{3/2}$	—
Отношение параметров Метагалактики и планковской частицы	$m_{MG} / m^* = r_{MG} / r^* = t_{MG} / t^* \approx 10^{60}$	—
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = 1 / \ln 10^{60} \approx 1 / \frac{3}{4} \ln N_E$	—
Возраст по Хабблу	$t_{MG} = \hbar / \alpha^{18} m_e c^2$	[36]

Таблица 23

Закон планетных расстояний Тициуса—Боде\*

Планета	♃	♀	♁	♂	Астероиды	♃	♅	♁	♄	♅
Вычисленное расстояние, а. е. д.	0,55	0,70	1,0	1,60	2,80	5,20	10	19,6	38,8	77,2
Истинное расстояние, а. е. д.	0,39	0,72	1,0	1,52	—	5,20	9,54	19,2	30,1	39,4

Примечание. Расстояние  $n$ -й планеты от Солнца в астрономических единицах дается эмпирической формулой Тициуса—Боде:  $a_n = 0,4 + 0,075 \cdot 2^n$ ,  $n=1,2,3, \dots$



### 6. ЧИСЛЕННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Здесь приведены некоторые математические константы, а также степени постоянной тонкой структуры.

$\pi$	$= 3,1415927 = 1 : 0,3183099$		
$\sqrt{\pi}$	$= 1,7724539 = 1 : 0,5641896$		
$4\pi/3$	$= 4,1887902 = 1 : 0,2387324$		
$e$	$= 2,7182818 = 1 : 0,3678794$		
$\lg e$	$= 0,434945 = 1 : \ln 10 = 1 : 2,3025851$		
$\lg 2$	$= 0,3010300$		
$\ln 2$	$= 0,6931472$		
$\sqrt{2}$	$= 1,4142136$	$\sqrt{3}$	$= 1,7320508$
$\sqrt[3]{2}$	$= 1,2599211$	$\sqrt[3]{3}$	$= 1,4422496$
$\sqrt[4]{2}$	$= 1,1892071$	$\sqrt[4]{3}$	$= 1,3160740$
$\sqrt[5]{2}$	$= 1,1486984$		
$1 \text{ рад} = 180^\circ : \pi = 57^\circ 17' 44''$	$,8 = 57^\circ,2957795$		
$1^\circ = \pi : 180^\circ = 0,017453 \text{ рад}$	$,1'' = \pi : 648000 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$		
$\alpha = 7,2973506 (60) \cdot 10^{-3} = 1 : 137,03604 (11)$			
$\alpha^2 = 5,325 \cdot 10^{-5}$	$\alpha^6 = 1,510 \cdot 10^{-13}$	$\alpha^9 = 5,86 \cdot 10^{-20}$	
$\alpha^3 = 3,885 \cdot 10^{-7}$	$\alpha^7 = 1,102 \cdot 10^{-15}$	$\alpha^{10} = 4,282 \cdot 10^{-22}$	
$\alpha^4 = 2,836 \cdot 10^{-9}$	$\alpha^8 = 8,041 \cdot 10^{-18}$	$\alpha^{11} = 3,125 \cdot 10^{-24}$	
$\alpha^5 = 2,069 \cdot 10^{-11}$			

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen E. R., Taylor B. N. «J. Phys. Chem. Ref. Data», 1973, v. 2, p. 663; «УФН», 1975, т. 115, с. 621.
2. Particle Data Group. Review of Particle Properties.—«Phys. Lett. B», 1974, v. 50, p. 1.
3. Allen C. W. Astrophysical quantities. Athlone Press, 1973.
4. Cook A. H. Quantum metrology—standards of measurement based on atomic and quantum phenomena.—«Rep. Prog. Phys.», 1972, v. 35, p. 463.
5. Weinberg S. Gravitation and Cosmology. N.Y., Wiley-Interscience, 1972.
6. Озерной Л. М., Прилуцкий О. Ф., Розенталь И. Л. Астрофизика высоких энергий. М., Атомиздат, 1973.
7. Каула У. Введение в физику планет земной группы. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
8. Newburn R. L., Gulkis S. A survey of the other planets Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, Pluto and their satellites.—«Space Sci. Rev.», 1973, v. 3, p. 179.
9. Шелест В. П., Зиновьев Г. М., Миранский В. А. Модели сильновзаимодействующих элементарных частиц. Т. 1, 2. М., Атомиздат, т. 1, 1975, т. 2, 1976.
10. Фелд Б. Т. Модели элементарных частиц. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
11. Marschak R. E., Riazuddin, Ryan C. P. Theory of weak interaction in particle physics. N.Y., Wiley-Interscience, 1969.
12. Blaney T. G. e.a. «Nature», 1974, v. 251, p. 46.
13. Bailey J. e.a. «Phys. Lett. B», 1975, v. 55, p. 420.
14. Adylov G. T. e.a. «Phys. Lett. B», 1974, v. 51, p. 402.
15. Häsensch T. W. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1974, v. 32, p. 1336.
16. Марков М. А. «ЖЭТФ», 1967, v. 24, p. 584; Motz L. «Nuovo Cimento B», 1972, v. 12, p. 239; Станюкович К. П. Гравитационное поле и элементарные частицы. М., «Наука», 1965.
17. MacGregor M. H. «Phys. Rev. D», 1974, v. 9, p. 1312; «Lett. Nuovo Cimento», 1971, v. 1, p. 759; Preprint UCRL-76300, 1975.

18. Баладин М. П. и др. «ЖЭТФ», 1974, т. 67, с. 1631; Browman A. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1974, v. 33, p. 1400; Browman A. e.a. «Phys. Rev. Lett.» 1974, v. 32, p. 1067; Boyarski A. M. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1975, v. 34, p. 1357; Abrams G. S. e. a. «Phys. Rev. Lett.», 1975, v. 34, p. 1181.
19. Lautrup B. E., Peterman A., De Rafael E. «Phys. Rep. C», 1972, v. 3, p. 193; Brodsky S. J., Drell S. «Ann. Rev. Nucl. Sci.», 1970, v. 20, p. 147; Robiscoe R. T. «Cargese Lectures in Physics», 1968, v. 2.
20. Mills A. P., Berman G. H. «Phys. Rev. Lett.», 1975, v. 34, p. 246.
21. Stroschio M. A., Holt J. M. «Phys. Rev. A», 1974, v. 10, p. 749.
22. Stroschio M. A. «Phys. Rept. C», 1975, v. 22, p. 5.
23. Brodsky S. J. Preprint SLAC-PUB-1699, December 1975.
24. Lenz F. «Phys. Rev.», 1951, v. 82, p. 554.
25. Nambu Y. «Progr. Theoret. Phys.», 1952, v. 7, p. 595.
26. Fritzsche H., Minkowski P. «Ann. Phys.», 1975, v. 93, p. 193.
27. Tomazawa Y. «Progr. Theoret. Phys.», 1974, v. 52, p. 175.
28. Peierls R. E., Treiman S. B. «Phys. Rev. Lett.», 1962, v. 8, p. 339.
29. Muradyan R. Communication JINR, E2-8586, Dubna, 1975.
30. MacGregor M. H. «Nuovo Cimento», 1971, v. 1, p. 759.
31. Stewart J. O. «Phys. Rev.», 1934, v. 38, p. 2071.
32. Weinberg S. Gravitation and Cosmology, Wiley N. Y., 1972.
33. Dirac P. «Nature», 1937, v. 139, p. 323.
34. Harrison E. «Nature», 1970, v. 228, p. 258.
35. Eddington A. Fundamental Theory, Cambridge University Press, 1946.
36. MacGregor M. H. «Lett. Nuovo Cimento», 1971, v. 1, p. 759.