

Глава 1

ИЗМЕРЕНИЕ

Несмотря на математическую красоту некоторых своих наиболее сложных и абстрактных теорий, таких как теория элементарных частиц и общая теория относительности, физика прежде всего является экспериментальной наукой. Поэтому крайне необходимо, чтобы те, кто проводит точные измерения, имели бы согласованные стандарты, через которые они могли бы выражать результаты своих измерений, обмениваться ими и подвергать проверке. В этой главе мы начинаем изучать физику с рассмотрения некоторых основных единиц физических величин и стандартов, которые были приняты для их измерения. Мы рассмотрим способы выражений результатов измерений и вычислений, включая анализ размерностей и число значащих цифр. Мы обсудим и проиллюстрируем важность обращения внимания на размерные величины, появляющиеся в уравнениях. Другие основные единицы и их производные будут вводиться позднее по мере необходимости

1-1 Физические величины, стандарты и единицы

Строительными кирпичами физики являются величины, которые мы используем для выражения физических законов. Такими величинами являются длина, масса, время, сила, скорость, плотность, сопротивление, температура, яркость, напряженность магнитного поля и многие другие. Многие из этих слов, такие, например, как сопротивление и сила, являются для нас повседневными. Вы можете, например, сказать: "Я использую всю свою *силу*, чтобы помочь вам, если вы не будете оказывать мне *сопротивления*". В физике, однако, надо быть осторожным, чтобы не путать эти понятия с их повседневными значениями. Точное научное определение сопротивления и силы не имеет ничего общего с их значением в только что приведенном предложении.

Мы можем каким угодно способом определить алгебраическую величину, например, L в качестве длины и считать ее точно известной. Однако, когда мы попытаемся выразить в каких либо единицах определенное значение этой величины, мы неизбежно придем к необходимости установления *стандарта*, так чтобы при сравнении одной длины с другой можно было бы прийти к единому мнению относительно единиц измерения. Одно время в качестве основной единицы длины был ярд, определенный как размер королевской талии. Можно легко увидеть проблемы, которые возникают при таком определении стандарта: такой стандарт едва ли доступен тем, кому необходимо прокалибровать свои вторичные стандарты, и кроме того, он неизбежно будет меняться с течением времени.

К счастью нет необходимости определять стандарты для каждой физической величины. Для некоторых элементарных величин стандарты ввести сравнительно легко, а более сложные величины часто выражаются через единицы этих элементарных величин. Например, *длина* и *время* в течении многих лет были среди наиболее точно измеряемых физических величин и поэтому для них существуют общепризнанные стандарты. *Скорость*, с другой стороны, измерялась менее точно и поэтому рассматривалась как производная единица (скорость=длина/время). Сегодня, например, когда измерение скорости света производится с гораздо большей точностью, чем точность измерения прошлого стандарта длины, мы, тем не менее, считаем длину фундаментальной единицей, но ее стандарт определяется из стандартов скорости и времени.

Таким образом, основная проблема заключается в том, чтобы по возможности выбрать наименьшее число физических величин в качестве фундаментальных и установить согласованные стандарты для их измерений. Такие стандарты должны быть доступны и неизменны со временем, что может быть трудно достичь одновременно. Если стандарт, например, килограмма должен быть неизменным, то он должен быть изолирован, чтобы на него не влияли перемещения и коррозия.

Соглашение по стандартам было достигнуто через ряд международных конференций Генеральной Конференции по Весам и Мерам, первая из которых состоялась в 1889 г.; 19-я конференция была проведена в 1991 г. Как только стандарт принят, например, такой как *секунда-единица времени*, мы можем применить эту единицу к измерению разнообразных величин: от времени жизни протона (больше, чем 10^{40} секунд) до времени жизни наименее стабильных частиц, получаемых в современных лабораториях (около 10^{-23} секунд). Когда мы выражаем такое число как 10^{40} в секундах, это значит, что *отношение* времени жизни протона к некоторому интервалу времени, который мы произвольно выбрали как стандарт секунды, равно 10^{40} . Чтобы осуществить такое измерение, у нас должен быть способ сравнения измерительных приборов со стандартом. Многие из этих сравнений являются непрямыми, так как нет такого прибора, который бы измерял в диапазоне 40 порядков. Тем не менее, и это существенно для научного прогресса, что когда исследователь измеряет прибором конкретное значение временного интервала, то это значение некоторым способом может быть прокалибровано на основе стандарта секунды.

Разработка более точных и доступных стандартов сама по себе является важной научной задачей, которой занимаются физики и другие исследователи по всему миру. В США в лабораториях Национального Института Стандартов и Технологии (бывшее Национальное Бюро Стандартов) ведутся исследования по поддержанию, разработке и тестированию стандартов как для фундаментальных исследований, так и для ученых и инженеров, занятых в промышленности. За последние годы были достигнуты впечатляющие успехи в улучшении наших стандартов. Например, со времени выхода первого издания этой книги в 1960 г точность стандарта секунды повысилась более чем в 1000 раз.

1-2 Международная система единиц*

Генеральная Конференция по Весам и Мерам на своих конференциях в период 1954-1971 выбрала в качестве базовых единиц семь основных величин, перечисленных в Таблице 1. Они являются базисом Международной Системы Единиц, сокращенно СИ, от французского названия *Le Systeme International d'Unites*.

Таблица 1 Основные единицы системы СИ

Величина	Название	Обозначение	
		Международ.	Русское
Время	Секунда	s	с
Длина	Метр	m	м
Масса	Килограмм	kg	кг
Количество вещества	Моль	mol	моль
Термодинамическая температура	Кельвин	K	К
Электрический ток	Ампер	A	А
Сила света	Кандела	cd	кд

*См. "SI: International System of Units" by Robert A. Nelson (Американская ассоциация учителей физики, 1981). Официальное "руководство" по системе СИ имеется в специальном выпуске Национального Бюро Стандартов (Special Publication 330, 1986 edition).

На протяжении всего изложения мы будем приводить много примеров производных единиц СИ, таких, например, как скорость, сила, электрическое сопротивление, которые следуют из Таблицы 1. Например, как мы увидим в Главе 5, единицей силы в СИ является ньютон (сокращенно Н), который выражается через основные единицы СИ следующим образом:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг м/с}^2$$

При выражении в единицах СИ физических свойств, таких, например, как мощность электростанции или временной интервал между двумя ядерными событиями, мы часто сталкиваемся с очень большими или с очень маленькими числами. Поэтому Генеральная Конференция по Весам и Мерам на своих заседаниях в 1960-1975 гг рекомендовала использовать множители для образования десятичных кратных и дольных единиц. Эти множители приведены в Таблице 2.

Таблица 2 Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц СИ

Множитель	Наименование	Обозначение		Множитель	Наименование	Обозначение	
		Междун.	Русское			Междун.	Русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санتي	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

Таким образом, выходную мощность обычной электростанции равную 1.3×10^9 ватт, можно записать как 1.3 гигаватт или 1.3 ГВт. Аналогично, типичный временной интервал в ядерной физике равный 2.35×10^9 секунды, можно записать как 2.35 наносекунд или 2.35 нс. Названия множителей больших единицы происходят от греческих слов, названия множителей меньших единицы имеют латинские корни, за исключением *фемто* и *атто*, которые происходят от корней датского языка.

Для того, чтобы придать смысл Таблице 1, необходимо иметь семь наборов операционных процедур, с помощью которых мы могли бы воспроизвести в лаборатории семь базовых единиц СИ. В последующих трех разделах мы опишем эти процедуры для времени, длины и массы.

Существуют также две другие системы единиц, которые употребляются наряду с системой СИ. Одна из них, называемая гауссовой системой, широко употребляется в физической литературе. В этой книге мы не будем использовать эту систему. Преобразующие множители из гауссовой системы в СИ приведены в Приложении Ж.

Другой системой является английская система, которая до сих пор широко применяется в повседневной жизни в США. Основными механическими единицами этой системы являются длина (в футах), сила (в фунтах) и время (в секундах). В Приложении Ж также приведены преобразующие множители из английской системы в систему СИ. В этой книге мы всюду используем систему СИ, но иногда будем приводить эквиваленты единиц в английской системе, чтобы помочь тем, кто еще не совсем привык к системе СИ. Только в трех странах (Мьянма (Бирма), Либерия и США) в качестве национальных стандартов измерений применяется не СИ, а английская система единиц.

Пример 1

Любая физическая величина может быть умножена на 1, при этом ее значение не изменится. Например, 1 мин=60 с, так что 1=60 с/1 мин; аналогично, 1 фут=12 дюймов, так что 1=1 фут/12 дюймов. Используя подходящие множители, найти: а) скорость в метрах в секунду, эквивалентную 55 миль в час; б) объем в кубических сантиметрах емкости, в которой содержится 16 галлонов бензина.

Решение

а) Преобразующие множители возьмем из Приложения Ж. 1 миля=1609 м (так что 1=1609 м/1 миля); 1 час=3600 с (1=1 час/3600 с). Следовательно:

$$\text{скорость} = 55 \frac{\text{миль}}{\text{час}} \times \frac{1609 \text{ м}}{1 \text{ миля}} \times \frac{1 \text{ час}}{3600 \text{ с}} = 25 \text{ м/с}$$

б) Один галлон жидкости равен 231 кубическим дюймам, а 1 дюйм=2.54 см. Следовательно:

$$\text{объем} = 16 \text{ галлонов} \times \frac{231 \text{ дюйм}^3}{1 \text{ галлон}} \times \left(\frac{2.54 \text{ см}}{1 \text{ дюйм}} \right)^3 = 6.1 \times 10^4 \text{ см}^3$$

Обратите внимание, что в этих вычислениях конверсионные множители записываются таким образом, что нежелательные единицы появляются и в числителе и в знаменателе, и таким образом, сокращаются.

1-3 Стандарт времени*

Измерение времени имеет два аспекта. В обычной жизни и для некоторых научных целей мы хотим знать время дня, чтобы мы могли упорядочить события в их последовательности. В большинстве научных работ нас интересует как долго то или иное событие длилось (временной интервал). Таким образом, любой стандарт времени должен отвечать на два вопроса: "В какой момент времени это произошло?" и "Как долго это длилось?" В Таблице 3 приведены некоторые измеренные интервалы времени. Диапазон этих временных интервалов составляет примерно 10^{63} раз.

Таблица 3 Некоторые временные интервалы (приближенные значения)

Временной интервал	Секунды
Время жизни протона	$>10^{40}$
Время жизни ^{82}Se относительно двойного бета распада	3×10^{27}
Возраст Вселенной	5×10^{17}
Возраст пирамиды Хеопса	1×10^{11}
Предстоящее время жизни человека (США)	2×10^9
Период обращения Земли вокруг Солнца (1 год)	3×10^7
Период обращения Земли вокруг своей оси (1 день)	9×10^4
Типичный период обращения низкоорбитального спутника вокруг Земли	5×10^3
Временной интервал между ударами сердца	8×10^{-1}
Период музыкального камертона	2×10^{-3}
Период колебаний 3-х сантиметровых волн	1×10^{-10}
Типичный период вращения молекулы	1×10^{-12}
Самый короткий световой импульс (1990)	6×10^{-15}
Время жизни наименее стабильных частиц	$<10^{-23}$

*История измерения времени изложена в Revolution in Time: Clocks and the Making of the Modern World, by David S. Landes (Harvard University Press, 1983). Современное развитие методов точного измерения времени обсуждается в статье Norman F. Ramsey "Точное измерение времени" в журнале American Scientist, январь-февраль 1988, стр. 42. Обзор различных систем времени можно найти в статье Алана М. МакРоберта "Время и астроном-любитель" в журнале Sky and Telescope, апрель 1989, стр. 378.

В качестве меры времени можно использовать любое повторяющееся явление. Измерение состоит в том, что считается число повторений с учетом их долей. Для этого можно взять колеблющийся маятник, массу на пружине или кристалл кварца. Из множества повторяющихся природных явлений в качестве стандарта времени в течение столетий использовалось вращение Земли вокруг своей оси, которое определяет долготу дня. Одна (средняя световая) секунда определялась как $1/86400$ часть (среднего светового) дня.

В качестве хорошего примера вторичного стандарта времени можно назвать часы, содержащие кристалл кварца, в котором электрически поддерживаются периодические колебания. Такие кварцевые часы можно прокалибровать по вращению Земли астрономическими наблюдениями и использовать для измерения времени в лаборатории. Лучшие из таких часов могут в течение года "уходить" от точного времени не более чем на 5 мкс, но даже такая точность сегодня недостаточна для решения ряда научных и технологических задач.

Для получения лучшего стандарта времени в нескольких странах были разработаны атомные часы. Такие часы показаны на Рис. 1. Они основаны на характерной частоте микроволнового излучения, испускаемой атомами цезия. Эти часы, находящиеся в Национальном Институте Стандартов и Технологии, являются основой для Системы Универсального Времени, звуковые сигналы которой передаются по коротковолновому радио и по телефону.

Для сравнения с цезиевыми часами на Рис. 2 показаны вариации скорости вращения Земли за 4-х летний период. Из этого графика видно, что стандарт времени, основанный на долготе дня, является очень плохим для точных измерений. Вариации, которые видны на Рис. 2, можно объяснить приливным влиянием со стороны Луны и сезонными вариациями атмосферных ветров.



Рис. 1. Цезиевый атомный стандарт частоты № NBS-6 в Национальном Институте Стандартов и Технологии (Boulder, Colorado). Это первичный стандарт для единицы времени в США

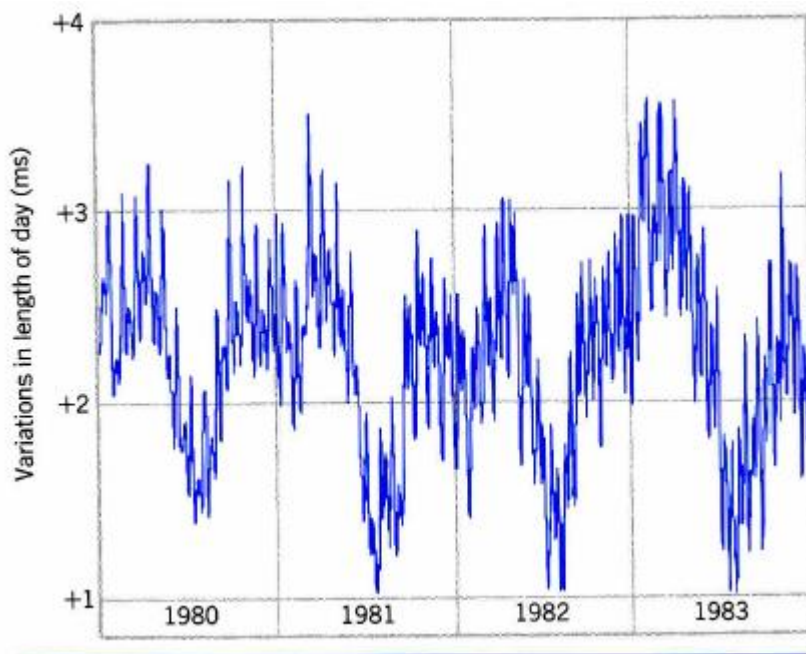


Рис. 2. Вариации длительности дня за четырехлетний период. Обратите внимание, что вертикальная шкала составляет всего $3 \text{ мс} = 0.003 \text{ с}$. См. статью J. Wahr Скорость вращения Земли, American Scientist, January-February 1985, p. 41.

Секунда, основанная на цезиевых часах, была принята в качестве международного стандарта на 13-й Генеральной Конференции по Весам и Мерам в 1967 г. Стандарт секунды определен следующим образом:

Одна секунда равна времени, в течении которого происходит 9192631770 колебаний излучения (определенной длины волны) атома цезия.

Если взять двое таких цезиевых часов, то только через 300000 лет их показания разойдутся более чем на 1 с. Если взять в качестве часов водородный мазер, то их точность будет еще выше: 1 с за 30000000 лет. Точность часов, основанных на колебаниях захваченного в ловушке одного атома, может быть выше еще на три порядка. На Рис. 3 приведены впечатляющие достижения в точности стандарта времени, достигнутые за последние 300 лет, начиная с маятника, изобретенного Христианом Гюйгенсом, и кончая водородным мазером.

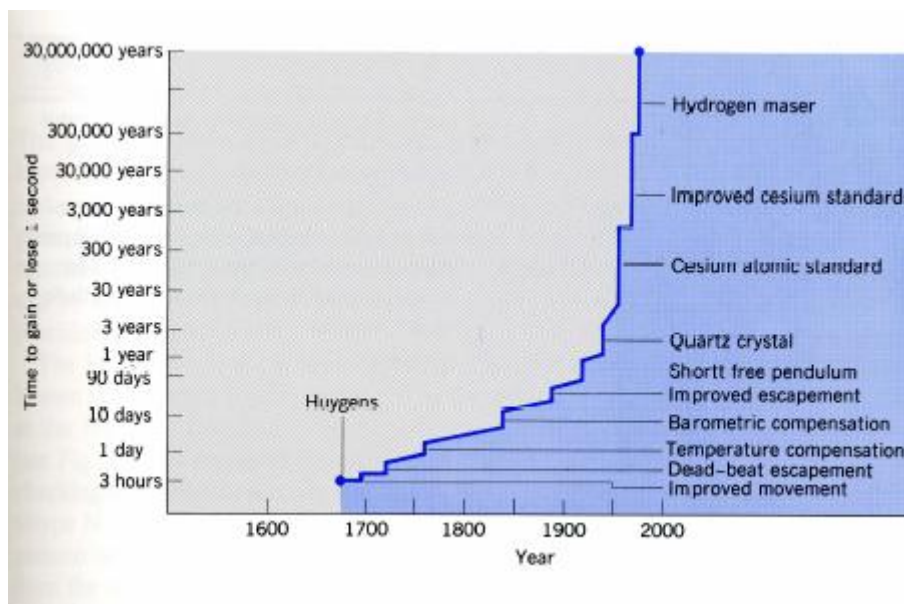


Рис. 3. Прогресс в измерении времени за столетия. Первые маятниковые часы уходили на одну секунду каждые несколько часов. Современные часы на основе водородного мазера уйдут на одну секунду только за 30 000 000 лет.

1-4 Стандарт длины*

Первым международным стандартом длины был брусок из платино-иридиевого сплава, который назывался стандартом метра. Он хранился в Международном Бюро Весов и Мер под Парижем. Расстояние между двумя тонкими линиями, нанесенными около концов бруска, было определено как один метр. При этом брусок должен был находиться при температуре 0°C и удерживаться механически определенным образом. Исторически метр был определен как одна десятиллионная часть расстояния от северного полюса до экватора вдоль меридиана, проходящего через Париж. Однако, точные измерения показали, что платино-иридиевый стандарт метра немного (примерно на 0.023%) отличается от этого значения.

Поскольку стандарт метра не вполне доступен, то были сделаны точные его копии и разосланы в лаборатории по стандартам по всему миру. По этим вторичным стандартам калибровались другие, более доступные, измерительные стержни. Таким образом, до совсем недавнего времени каждый измерительный стержень или прибор получали свою "легитимность" от стандарта метра через сложную цепочку сравнительных процедур с использованием микроскопов и делительных устройств. С 1959 года такая же процедура существовала и для ярда, когда он получил в США легальный статус и был определен как:

$$1 \text{ ярд} = 0.9144 \text{ метра (точно)}$$

что эквивалентно

$$1 \text{ дюйм} = 2.54 \text{ сантиметра (точно)}$$

Точность, которую можно достигнуть при взаимных сравнениях длины, сравнивая положение тонких полосок с помощью микроскопа, не является удовлетворительной для современной науки и технологии. Более точный и воспроизводимый стандарт длины был получен когда американский физик Альберт Майкельсон в 1893 году сравнил длину стандарта метра с длиной волны красного света, испускаемого атомами кадмия. Майкельсон тщательно измерил длину метрового бруска и обнаружил, что стандарт метра оказался равным 1553163.5 длинам волн упомянутого излучения. Аналогичными кадмиевыми лампами можно сравнительно легко оснастить любую лабораторию, и, таким образом, Майкельсон обнаружил способ, который давал возможность ученым всего мира иметь точный стандарт длины, не основанный на платино-иридиевом стандарте метра.

Несмотря на это технологическое достижение, платино-иридиевый стандарт метра оставался официальным вплоть до 1960 г., когда 11-я Генеральная Конференция по Весам и Мерам приняла в качестве метра атомный стандарт. За основу была взята длина волны в вакууме определенного красно-оранжевого света, излучаемого при электрическом разряде атомами одного из изотопов криптона*, ^{86}Kr (см. Рис. 4). Конкретно, один метр был определен как 1650763.73 длин волн этого излучения. Поскольку можно также измерять доли длины волны, то этот стандарт можно было использовать для сравнений длин с точностью лучшей, чем 10^{-9} .

*См. P. Giacomo "Новое определение метра" *American Journal of Physics*, июль 1984, с. 607.

* Верхний индекс 86 в ^{86}Kr означает *массовое число* (число протонов и нейтронов в ядре) этого изотопа криптона. Встречающийся в природе газ криптон содержит изотопы с массовыми числами 78, 80, 82, 83, 84 и 86. Выбранная длина волны излучения отличается в этих изотопах примерно на одну сотысячную (10^{-5}), что является неприемлемо много по сравнению с точностью стандарта, составляющего одну миллиардную (10^{-9}). В случае цезия имеется только один естественный изотоп цезия с массовым числом 133.

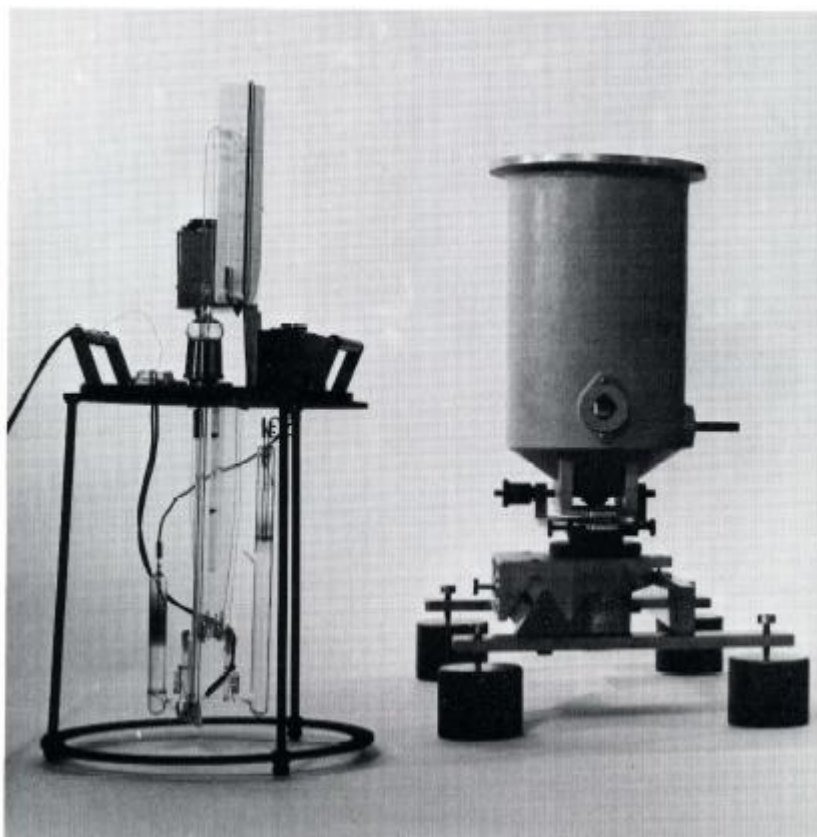


Рис. 4. Криптоновая лампа в Национальной Физической Лаборатории (Англия). Основным элементом этого устройства, показанного слева, является стеклянный капилляр, содержащий газ ^{86}Kr , который при возбуждении его электрическим током излучает свет. Все устройство помещается в криостат (на рисунке справа), в котором поддерживается температура жидкого азота (-210°C). В криостате имеется небольшое отверстие, через которое выходит излучение.

Помимо высокой точности выбор атомного стандарта имеет и другие преимущества. Атомы ^{86}Kr имеются везде, они полностью идентичны друг другу и излучают свет одной и той же длины волны. Эта длина волны является уникальной характеристикой ^{86}Kr и она четко регистрируется экспериментально. Также, этот изотоп легко получается в чистом виде.

К 1983 году даже криптоновый стандарт перестал удовлетворять возросшие требования к точности и поэтому был сделан следующий шаг. Было введено новое определение метра как расстояние, которое проходит свет за определенный интервал времени. Вот определение, которое дала метру 17-я Генеральная Конференция по Весам и Мерам:

Метром называется расстояние, которое проходит свет в вакууме за время равное $1/299\,792\,458$ часть секунды.

Это эквивалентно тому, что скорость света c сейчас определена как

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с (точно)}$$

Это новое определение метра оказалось необходимым, поскольку измерение скорости света стало таким точным, что ограничивающим фактором стала воспроизводимость криптонового стандарта. Поэтому пришлось принять скорость света как заданную величину и с помощью нее и точного определенного стандарта времени (секунды) переопределить метр.

В Таблице 4 приведены некоторые измеренные длины, которые можно сравнить со стандартом.

Таблица 4 Некоторые измеренные длины (приближенные значения)

Длина	Метры
Расстояние до самого далекого квазара	2×10^{26}
Расстояние до галактики Андромеда	2×10^{22}
Радиус нашей галактики	6×10^{19}
Расстояние до ближайшей звезды (Проксима Центавра)	4×10^{16}
Средний радиус орбиты самой далекой планеты (Плутон)	6×10^{12}
Радиус Солнца	7×10^8
Радиус Земли	6×10^6
Высота Эвереста	9×10^3
Высота среднего человека	2×10^0
Толщина книжной страницы	1×10^{-4}
Типичный размер вируса	1×10^{-6}
Радиус атома водорода	5×10^{-11}
Эффективный радиус протона	1×10^{-15}

Пример 2

Световым годом называется мера длины (а не мера времени), равное расстоянию, которое свет проходит за один год. Вычислите преобразующий множитель между световым годом и метром и определите расстояние до звезды Проксима Центавра (4.0×10^{16} м) в световых годах.

Решение

Преобразующий множитель между годом и секундой есть:

$$1 \text{ год} = 1 \text{ год} \times \frac{365.25 \text{ дней}}{1 \text{ год}} \times \frac{24 \text{ часа}}{1 \text{ день}} \times \frac{60 \text{ минут}}{1 \text{ час}} \times \frac{60 \text{ секунд}}{1 \text{ минуту}} = 3.16 \times 10^7 \text{ секунд}$$

Скорость света с точностью до трех значащих цифр есть 3.00×10^8 м/с. Таким образом, за один год свет проходит расстояние равное

$$(3.00 \cdot 10^8 \text{ м/с}) (3.16 \cdot 10^7 \text{ с}) = 9.48 \cdot 10^{15} \text{ м}$$

Таким образом

$$1 \text{ световой год} = 9.48 \cdot 10^{15} \text{ м}$$

Расстояние до Проксима Центавра равно:

$$(4.0 \times 10^{16} \text{ м}) \times \frac{1 \text{ световой год}}{9.48 \times 10^{15} \text{ м}} = 4.2 \text{ световых года}$$

Свет от звезды Проксима Центавра идет до Земли 4.2 года.

1-5 Стандарт массы

В качестве стандарта массы в системе СИ принят цилиндр из сплава платины с иридием, который хранится в Национальном Бюро Весов и Мер в Париже, и которому в соответствии с международным соглашением присвоена масса равная 1 килограмму. Вторичные стандарты разосланы в национальные лаборатории стандартов в разные страны, и массы других тел можно найти с помощью рычажных весов с точностью 10^{-8} .

В США копия международного стандарта массы, известная как Прототип Килограмма № 20, хранится в подземном помещении в Национальном Институте Стандартов и Технологии (см. Рис. 5). Этот прототип извлекается не более одного раза в год для проверки значений третичных стандартов. С 1889 г. прототип № 20 дважды доставлялся во Францию для сравнения с первичным стандартом. При извлечении этого прототипа из хранилища обязательно присутствие двух человек, один из которых несет килограмм с помощью специальных щипцов, а второй страхует его на тот случай, если первый упадет.



Рис. 5. Национальный стандарт килограмма (под двойным стеклянным колоколом). Прототип № 20, хранящийся в Национальном Институте Стандартов и Технологии (США).

Некоторые измеренные массы приведены в Таблице 5. Отметим, что область их изменения составляет около 10^{83} раз. Большинство масс измеряются в единицах килограмма косвенно. Например, мы можем измерить массу Земли (см. раздел 16-3) измеряя в лаборатории силу гравитационного притяжения между двумя свинцовыми шарами и сравнивая ее с притяжением известной массы Землей. Предварительно массы шаров должны быть известны их непосредственным сравнением со стандартом килограмма.

Таблица 5 Некоторые измеренные массы (приближенные значения)

Объект	Килограммы
Известная Вселенная (оценка)	10^{53}
Наша галактика	2×10^{43}
Солнце	2×10^{30}
Земля	6×10^{24}
Луна	7×10^{22}
Океанский лайнер	7×10^7
Слон	4×10^3
Человек	6×10^1
Виноградная ягода	3×10^{-3}
Пылинка	7×10^{-10}
Вирус	1×10^{-15}
Молекула пенициллина	5×10^{-17}
Атом урана	4×10^{-26}
Протон	2×10^{-27}
Электрон	9×10^{-31}

На атомных масштабах имеется еще один стандарт массы, который не является единицей СИ. Этим стандартом массы является атом ^{12}C , которому согласно международному соглашению присвоено точно 12 атомных единиц массы (сокращенно а. е. м.). С помощью масс-спектрометра можно с высокой точностью определить массы других атомов (см. Рис. 6 и раздел 34-2). В Таблице 6 приведены массы некоторых элементов вместе с оценкой погрешности измерений.

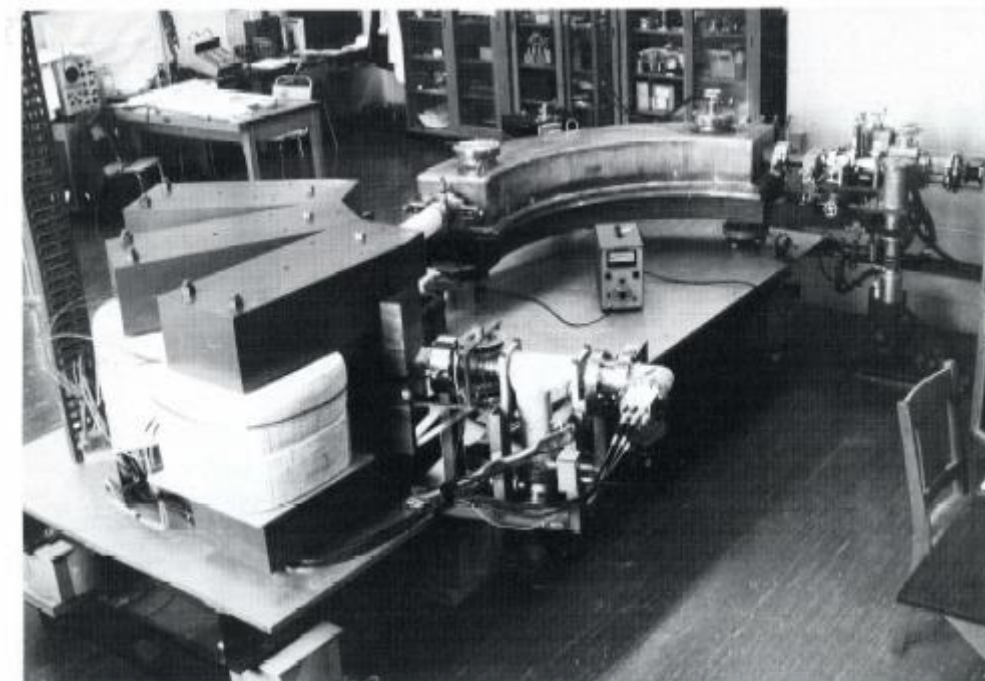


Рис. 6. Масс-спектрометр высокого разрешения в Университете Манитоба (Канада). Приборы подобного типа применяются для точного измерения атомных масс (см. Таблицу 6).

Таблица 6 Некоторые измеренные атомные массы

Изотоп	Масса (а. е.м.)	Погрешность (а. е. м.)
^1H	1.00782504	0.00000001
^{12}C	12.00000000	(точно)
^{64}Cu	63.9297656	0.0000017
^{102}Ag	101.91195	0.00012
^{137}Cs	136.907073	0.000006
^{190}Pt	189.959917	0.000007
^{238}Pu	238.0495546	0.0000024

Необходимость второго стандарта массы следует из того, что современные лабораторные методы позволяют нам сравнивать атомные массы между собой с гораздо большей точностью, чем мы можем сравнить их со стандартом килограмма. В настоящее время все идет к тому, что развитие атомного стандарта массы возможно приведет к принятию его в качестве первичного стандарта вместо килограмма. Связь между атомным стандартом и первичным стандартом приближенно дается следующим соотношением:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

К атомному стандарту массы имеет отношение единица СИ *моль*, которая является мерой количества вещества. Один моль атомов ^{12}C имеет массу точно равную 12 грамм и содержит число атомов, численно равное числу Авогадро N_A :

$$N_A = 6.0221367 \cdot 10^{23} \text{ частиц/моль}$$

Это экспериментально определенное значение с погрешностью около 10^{-6} . Один моль любого другого вещества содержит одно и тоже число элементарных объектов (атомов, молекул или чего-то еще). Таким образом, 1 моль газообразного гелия содержит N_A атомов He; 1 моль кислорода содержит N_A молекул O_2 , 1 моль воды содержит N_A молекул H_2O .

Для того, чтобы связать атомную единицу массы с массой какого-либо тела, надо использовать число Авогадро. Замена стандарта килограмма атомным стандартом потребует увеличения точности измерения числа Авогадро по меньшей мере на два порядка, чтобы измерять массы с точностью до 10^{-8} .

1-6 Точность и значащие цифры

По мере улучшения качества наших измерительных инструментов и усложнения измерительных методов, мы можем проводить эксперименты на более высоком уровне точности. Иными словами, мы можем расширить результаты измерений на все большее число *значащих цифр* и соответственно, уменьшить *экспериментальную неопределенность* результата. Эти два параметра: число значащих цифр и неопределенность связаны как-то с оценкой точности результата. Например, результат $x=3 \text{ м}$ означает, что мы знаем о величине x меньше, чем в том случае, если $x=3.14159 \text{ м}$. В первом случае мы можем быть уверены, что x лежит между 2 м и 4 м, тогда как во втором случае x по всей вероятности лежит между 3.14158 м и 3.14160 м. Если вы пишете $x=3 \text{ м}$, тогда как на самом деле вы знаете, что $x=3.14159 \text{ м}$, то вы тем самым утаиваете информацию, которая может быть важной. С другой стороны, если вы пишете $x=3.14159 \text{ м}$, основываясь только на том, что вы определенно знаете, что $x=3 \text{ м}$, то в этом случае вы поступаете нечестно, заявляя больше информации, чем вы на самом деле обладаете. Внимание к значащим цифрам является важным при представлении результатов измерений и вычислений. Ошибочно приводить как слишком много так и слишком мало значащих цифр.

Имеется несколько простых правил, которым надо следовать, чтобы решить сколько надо удерживать значащих цифр.

Правило первое. Считая слева направо и игнорируя при этом все нули, удерживайте все цифры вплоть до первой сомнительной цифры. Например, $x=3 \text{ м}$ имеет только одну значащую цифру, и если вы запишите это же в виде $x=0.003 \text{ км}$, то число значащих цифр не изменится. Но если вы написали $x=3.0 \text{ м}$ (или, эквивалентно, $x=0.0030 \text{ км}$), то это значит, что вы знаете величину x с точностью до двух значащих цифр. В частности, никогда не записывайте результат расчета вашего калькулятора с 9 или 10 цифрами, если это не соответствует точности исходных данных! Большинство вычислений в данной книге выполнено с двумя или тремя значащими цифрами.

Избегайте использовать двусмысленные обозначения. Например, $x=300 \text{ м}$ не указывает на то сколько здесь значащих цифр: одна, две или три. Мы не знаем несут ли здесь нули какую либо информацию или просто служат в качестве дорожного указателя. Вместо этого следует писать $x=3 \times 10^2$ или $x=3.0 \times 10^2$ или $x=3.00 \times 10^2$, чтобы в более явном виде указать на точность.

Правило второе. При перемножении или делении удерживайте в результате только то количество значащих цифр, которое имеет наименее точный сомножитель. Например:

$$2.3 \cdot 3.14159 = 7.2$$

Иногда при применении этого правила запятую здравого смысла не помешает:

$$9.8 \cdot 1.03 = 10.1$$

здесь первый сомножитель имеет всего две значащие цифры, но его значение очень близко к числу с тремя значащими цифрами. Поэтому результат следует записать тоже с тремя значащими цифрами.

Правило третье. При сложении или вычитании наименее значащая (первая сомнительная) цифра результата должна занимать то же место, что и наименее значащая (первая сомнительная) цифра слагаемых. В этом случае *число* значащих цифр не имеет значения. Важно только их *место*. Предположим нам нужно найти общую массу трех тел:

$$\begin{array}{r} 103.\mathbf{9} \quad \text{кг} \\ 2.\mathbf{10} \quad \text{кг} \\ 0.\mathbf{319} \quad \text{кг} \\ \hline 106.\mathbf{319} \quad \text{или} \quad 106.\mathbf{3} \quad \text{кг} \end{array}$$

Наименее значащие или первые сомнительные цифры показаны жирным шрифтом. Согласно первому правилу мы должны включить в результат только одну сомнительную цифру. Таким образом, результат нужно записать как 106.3 кг, так как если цифра "3" сомнительна, то следующие за ней "19" не несут никакой информации и совершенно бесполезны.

Пример 3

Вы хотите узнать вес вашего любимого кота, но в вашем распоряжении есть только обычные напольные цифровые весы, которые показывают вес, начиная с 10 кг, только целым числом килограммов*. Поэтому вы поступаете следующим образом: вначале вы измеряете свой собственный вес, который оказался равным 60 кг, затем берете кота на руки, при этом ваш вес вместе с котом оказался равным 63 кг. С какой относительной погрешностью (в процентном отношении) вы измерили свой вес и вес вашего кота?

Решение

Наименее значащая цифра в показаниях весов равна единице измерения, то есть, одному кг, и таким образом вы знаете свой вес с точностью примерно в 1 кг. Это означает, что весы покажут 60 кг для любого веса между 59.5 кг и 60.5 кг. Таким образом, относительная погрешность вашего веса есть $1 \text{ кг}/60 \text{ кг} = 0.01$ или 1%. Вес кота равен $63 \text{ кг} - 60 \text{ кг} = 3 \text{ кг}$ и следовательно относительная погрешность его веса есть $1 \text{ кг}/3 \text{ кг} = 0.3$ или 30%. Несмотря на то, что *абсолютная* погрешность вашего веса и веса кота одинакова (1 кг), *относительная* погрешность вашего веса более чем на порядок меньше относительной погрешности веса кота. Если бы вы захотели таким же способом измерить вес котенка, весящего 1 кг, вы бы получили относительную погрешность равную 100%. Этот пример иллюстрирует часто встречающуюся

* Довольно часто в обиходной жизни в килограммах измеряется *вес* тела. Согласно системе СИ вес тела измеряется в ньютонах, так что $1 \text{ кг обиходного веса} = 1 \text{ кг (массы)} \times g \text{ Н}$, где g -ускорение свободного падения в данном месте Земли. В тех редких случаях, когда это не вызовет двусмысленности, как в настоящем примере, мы будем приводить вес в кг в его обиходном смысле (*Прим. перев.*)

опасность при вычитании двух близких по величине чисел: относительная погрешность разности может быть при этом очень большой.

1-7 Анализ размерности

С каждой измеренной или вычисленной величиной связана *размерность*. Например, такие разные величины как поглощение звука поверхностью окружающих источник тел или вероятность того, что ядерная реакция произойдет, имеют размерность площади. Единицы, в которых выражаются величины не влияют на размерность этих величин: площадь остается площадью независимо от того в каких единицах она выражается - в квадратных метрах, квадратных футах, акрах, или барнах (ядерные реакции). Поскольку ранее в этой главе мы уже определили измерительные стандарты в качестве фундаментальных величин, то мы можем на основе независимых измерительных стандартов выбрать набор фундаментальных размерностей. Для механических величин масса, длина и время являются элементарными и независимыми, так что их можно принять в качестве фундаментальных размерностей. Будем их обозначать М, L, T, соответственно.

Любое уравнение должно быть *согласовано по размерности*. Это означает, что размерность обеих частей уравнения должна быть одинаковой. Анализ размерности часто помогает избежать ошибок при написании уравнений. Например, как будет показано в следующей главе, расстояние x , которое проходит тело за время t , начав движение из состояния покоя и двигаясь с постоянным ускорением a , выражается следующим уравнением: $x=at^2/2$. Ускорение измеряется в единицах m/c^2 . Для обозначения размерности мы будем использовать квадратные скобки [], так что $[x]=L$ или $[t]=T$. Таким образом, $[a]=L/T^2$ или LT^{-2} . Поэтому, если вы помните в каких единицах измеряется ускорение, вы никогда не напишите $x=at/2$ или $x=at^3/2$. Анализ размерности часто помогает записать правильное уравнение. Это показано на двух примерах, приведенных ниже.

Пример 4

Для того, чтобы удержать тело,двигающееся по окружности с постоянной скоростью, необходима сила, называемая "центростремительной силой". (Движение по окружности обсуждается в Главе 4). Проанализируйте центростремительную силу с точки зрения размерности.

Решение.

Начнем с того, что спросим себя "От каких механических величин может зависеть центростремительная сила?" Двигающееся тело обладает только тремя параметрами, которые могут быть важными: это масса тела m , его скорость v , и радиус окружности r , по которой оно движется. Поэтому центростремительная сила F должна с точностью до безразмерной постоянной определяться следующим уравнением:

$$F \propto m^a v^b r^c$$

Где символ \propto означает "пропорционально", а a, b, c некоторые числа, которые надо будет определить из анализа размерности. Как уже было сказано в Разделе 1-2 (и как мы будем обсуждать в Главе 5), единица силы есть $kg\ m/c^2$, и, следовательно ее размерность есть $[F]=MLT^{-2}$. Запишем уравнение для центростремительной силы в терминах размерностей:

$$[F] = [m^a][v^b]r^c$$

$$MLT^{-2} = M^a(L/T)^b L^c = M^a L^{b+c} T^{-b}$$

Согласование по размерности означает, что размерности обеих частей последнего уравнения должны совпадать. Приравнивая степени, получим:

$$\begin{aligned} \text{степень } M: & \quad a=1; \\ \text{степень } T & \quad b=2; \\ \text{степень } L & \quad b+c=1 \text{ так что } c=-1. \end{aligned}$$

Таким образом, окончательное выражение для центростремительной силы есть:

$$F \propto \frac{mv^2}{r}$$

Правильное выражение для центростремительной силы, которое следует из законов Ньютона и геометрии криволинейного движения есть:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Таким образом, с помощью анализа размерностей мы получили точное выражение для зависимости центростремительной силы от механических переменных! Это, конечно, чистая случайность, так как анализ размерностей ничего не может сказать нам о постоянном множителе, который не имеет размерности. В рассмотренном примере оказалось, что этот множитель равен 1.

Пример 5

Важной характеристикой эволюции Вселенной после Большого Взрыва является Планковское время t_P , значение которого зависит от трех фундаментальных констант: (1) скорости света (фундаментальной постоянной теории относительности) $c=3.00 \times 10^8$ м/с; (2) гравитационной постоянной (фундаментальной постоянной теории тяготения) $G=6.67 \times 10^{-11}$ м³/с²кг; и (3) постоянной Планка (фундаментальная константа квантовой механики) $h=6.63 \times 10^{-34}$ кгм²/с. Найти с помощью анализа размерности величину Планковского времени.

Решение

Используя единицы трех фундаментальных постоянных, мы можем записать их размерности:

$$\begin{aligned} [c] &= [m/c] = LT^{-1} \\ [G] &= [m^3/c^2 \text{кг}] = L^3 T^{-2} M^{-1} \\ [h] &= [\text{кгм}^2/c] = ML^2 T^{-1} \end{aligned}$$

Предположим, что Планковское время зависит от этих постоянных следующим образом:

$$t_P \propto c^i G^j h^k,$$

где степени i, j, k надо определить.

Последнее выражение имеет следующую размерность:

$$[t_P] = [c^i][G^j][h^k]$$

$$T = (LT^{-1})^i (L^3 T^{-2} M^{-1})^j (ML^2 T^{-1})^k = L^{i+3j+2k} T^{-i-2j-k} M^{-j+k}$$

Приравнивая степени с обеих сторон, получим:

$$\text{степень L: } 0=i+3j+2k$$

$$\text{степень T: } 1=-i-2j-k$$

$$\text{степень M: } 0=-j+k$$

решая эти три уравнения относительно трех неизвестных, найдем:

$$i=-5/2; j=1/2; k=1/2$$

Таким образом,

$$t_P \mu c^{-5/2} G^{1/2} h^{1/2}$$

$$= \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 / \text{с}^2 \text{ кг}) (6.63 \times 10^{-34} \text{ кг м}^2 / \text{с})}{(3.00 \times 10^8 \text{ м} / \text{с})^5}} = 1.35 \times 10^{-43} \text{ с.}$$

Общепринятое значение Планковского времени отличается от этой величины на безразмерный множитель $(2\pi)^{-1/2}$, который невозможно определить этим способом. Аналогичным образом можно найти Планковскую длину и Планковскую массу, которые, также как и Планковское время, имеют фундаментальный характер (см. задачи 41 и 42).

ВОПРОСЫ

1. Какие критические замечания можно высказать по поводу следующего утверждения: "Если вы выбрали стандарт, то уже по своему определению "стандарт" он является неизменяемым"?
2. Какие, по вашему, характеристики, кроме доступности и неизменяемости, вы считали бы желательными для физического стандарта?
3. Можете ли вы представить себе систему основных единиц (Таблица 1), в которую не включено время?
4. Из семи основных единиц, перечисленных в Таблице 1 только одна- килограмм-имеет приставку (см. Таблицу 2). Целесообразно ли переопределить массу платино-иридиевого цилиндра, хранящегося в Международном Бюро по Весам и Мерам, то есть установить что эта масса равна 1 г, а не 1 кг?
5. Что означает приставка "микро" в словах "микроволновая печь"? Однажды было предложено, чтобы пищевые продукты, которые облучаются гамма лучами для увеличения сроков их годности, назывались "пиковолновыми". Что, по вашему мнению, это означает?
6. Некоторые исследователи верят в реальность экстрасенсорного восприятия. Допустим такое явление действительно существует. Какую физическую величину или величины вы бы предложили чтобы количественно описать это явление?
7. Согласно одной из точек зрения, разделяемой некоторыми физиками и философами, если мы не можем описать процедуру определения физической величины, то такую величину невозможно обнаружить и, таким образом, эта величина не имеет физического смысла. Эту точку зрения разделяют не все ученые. Каковы на ваш взгляд достоинства и недостатки такой точки зрения?
8. Назовите несколько повторяющихся природных явлений, которые могли бы быть взяты в качестве разумных стандартов времени.

9. Вы можете определить "1 секунду" как один удар пульса нынешнего президента Американской Ассоциации Преподавателей Физики. Известно, что Галилей пользовался своим пульсом в качестве измерителя времени в некоторых своих экспериментах. Почему определение секунды, основанное на атомных часах лучше?
10. Каким критериям должны удовлетворять хорошие часы?
11. Какие, по вашему мнению, недостатки не позволяют принять период колебаний маятника в качестве стандарта времени?
12. 30 июня 1981 г. было произвольно установлено, что минута между 10: 59 и 11: 00 содержит 61 с. Последний день 1989 г был также увеличен на 1 с. Такую *лишнюю секунду* иногда вводят для компенсации того обстоятельства, что согласно измерению атомных часов скорость вращения Земли медленно уменьшается. Почему желательно таким образом подводить наши часы?
13. Что означает цифра 89.5 на коротковолновой шкале вашего радиоприемника?
14. Почему в системе СИ нет базовых единиц площади или объема?
15. Первоначально в качестве метра была взята одна миллионная длины проходящего через Париж меридиана от северного полюса до экватора. Эта величина на 0.023% расходится с платино- иридиевым стандартом метра. Означает ли это, что точность этого стандарта составляет 0.023%?
16. Можно ли измерить длину вдоль кривой линии? Если да, то как?
17. Платино- иридиевый стандарт метра определен при строго определенной температуре. Можно ли длину считать фундаментальным свойством, если для определения ее стандарта необходимо указать температуру, при которой эта длина считается стандартом?
18. Когда в 1983 г делегаты генеральной Конференции по Весам и Мерам переопределили метр через скорость света, почему они не взяли скорость света точно равной 3×10^8 м/с? Или точно равной 1 м/с? Возможно ли было в принципе так определить скорость света? Если да, то почему эти возможности были отвергнуты?
19. Предложите способом, которым можно было бы измерить: а) радиус Земли; б) расстояние между Солнцем и Землей; в) радиус Солнца?
20. Предложите способом, которым можно было бы измерить: а) толщину листа бумаги; б) толщину пленки мыльного пузыря; в) диаметр атома?
21. Если вам кто-нибудь скажет, что за ночь размеры всех тел уменьшились в два раза, то как вы сможете опровергнуть это утверждение?
22. Является ли стандарт массы- килограмм доступным, неизменным, воспроизводимым и неразрушимым? Удобен ли он для сравнения? Будет ли в некоторых аспектах атомный стандарт лучшим? Почему в качестве стандарта массы не принят атомный стандарт, как это сделано для длины и времени?
23. Почему целесообразно иметь два стандарта массы: килограмм и атом углерода ^{12}C ?
24. Каким образом можно установить связь между массами стандарта килограмма и атома углерода ^{12}C ?
25. Предложите практические способы, с помощью которых можно определить массы разных тел, приведенных в Таблице 5.
26. Назовите тела, массы которых будут между приведенными в Таблице 5 массами океанского лайнера и Луны. Оцените массы названных вами тел.
27. Критики метрической системы считают, что ее введение только усложняет жизнь, поскольку как они говорят: " Вместо того, чтобы попросить в магазине 1 фунт масла, вам придется просить 0.454 кг масла." Как вы можете опровергнуть этот аргумент?

ЗАДАЧИ

Раздел 1-2 Международная система единиц

1. С помощью кратных приставок из Таблицы 2 выразите: а) 10^6 фон; б) 10^{-6} фон; в) 10^1 карт; г) д) 10^9 быков; е) 10^{-1} друзей; ж) 10^{-18} мальчиков; з) 2×10^3 пересмешников; и) 10^{-9} девочек. Теперь когда вы поняли как это делать, придумайте несколько подобных выражений. (См. стр. 61 в кн. *Random Walk in Science*, R. L. Weber; Crane, Russak & Co., New York, 1974)
2. Некоторые приставки системы СИ проникли в повседневную жизнь. (а) Чему равен еженедельный эквивалент годовой зарплаты в 36К (=36k\$)? (б) Главный приз лотереи равен 10 мегабаксам, которые выплачиваются в течение 20 лет. Сколько денег будет выплачиваться каждый месяц? (в) Жесткий диск компьютера имеет емкость 30 Мб (=30 мегабайт). Машинное слово состоит из 8 байт. Сколько слов содержит такой диск? На компьютерном языке *кило* означает не 1000, а $1024 (=2^{10})$.

Раздел 1-3 Стандарт времени

3. Однажды Энрико Ферми сказал, что время обычной лекции (50 минут) примерно равно микровеку. Сколько минут содержится в микровеке и на сколько процентов это отличается от цифры Ферми?
4. Расстояние между Нью-Йорком и Лос-Анжелесом равно примерно 3000 миль. Разница во времени между этими двумя городами составляет 3 часа. Вычислите по этим данным приблизительную длину окружности Земли, проходящей через эти два города.
5. Число секунд в году можно приближенно записать как $\pi \times 10^7$. Какую относительную погрешность имеет это значение?
6. Вскоре после Французской Революции Национальный Революционный Конвент в рамках программы по внедрению метрической системы предпринял попытку ввести *десятичное* время. Согласно этому проекту, который, впрочем, не был успешным, день, начинающийся в полночь, был разделен на 10 *десятичных* часов, каждый из которых содержал по 100 *десятичных* минут. На Рис. 7 показан один из сохранившихся экземпляров таких карманных часов, стрелки которых остановились на 8 *десятичных* часах и 22.8 *десятичных* минутах. Какому времени это соответствует?



Рис. 7. К задаче 6.

7. (а) В микроскопической физике иногда применяется единица времени, которая называется *шейк*. Один шейк равен 10^{-8} с. Содержится ли в 1 с больше шейков, чем секунд в году? (б) Человек как вид существует на Земле примерно 10^6 лет, тогда как возраст Вселенной составляет примерно 10^{10} лет. Если возраст Вселенной принять за 1 день, то каков по этой шкале возраст человека в секундах?

8. Два спортсмена, бегущие на одну и ту же дистанцию по двум разным дорожкам показали время 3 мин. 58.05 с и 3 мин. 58.20 с, соответственно. С какой максимальной допустимой погрешностью должны быть измерено расстояние по этим двум дорожкам, чтобы можно было утверждать, что бегун показавший меньшее время, действительно пришел первым?

9. Настенные (с маятником) часы (с 12-ти часовым циферблатом) в течение дня уходят на 1 минуту вперед. Если на часах установить правильное время, то сколько времени пройдет пока они снова будут показывать правильное время?

10. В лаборатории на тестировании находятся пять часов. В течение недели каждый день точно в полдень показания часов фиксируются по сигналу службы точного времени. Ниже приведены эти результаты:

Часы	Воскр.	Понед.	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

В каком порядке по степени их пригодности для измерения времени вы бы расположили эти часы? Обоснуйте свой выбор.

11. Возраст Вселенной равен примерно 5×10^{17} с. Длительность самого короткого светового импульса, полученного в лаборатории (1990) составляет всего 6×10^{-15} с (см. Таблицу 3). Определите по логарифмической шкале имеющий физический смысл интервал времени, находящийся приблизительно посередине между этими двумя временными точками.

12. Предположив, что длительность дня увеличивается на 0.001 с за столетие, определите совокупный эффект этого явления за 20 веков. Такое замедление вращения Земли было определено по наблюдениям времени наступления солнечных затмений за этот период.

13. Если зафиксировать положение Луны относительно неподвижных звезд, то она возвратится на это же место через 27.3 дня. Этот период называют *сидеральным* месяцем. А время между повторяющимися *фазами* Луны называется *лунным* месяцем. Лунный месяц больше сидерального. Почему и насколько?

Раздел 1-4 Стандарт длины

14. Ваш друг Пьер из Франции пишет, что его рост равен 1.9 м. Каков его рост согласно Британской системе мер?

15. Беговые дорожки размечаются как отрезками по 100 ярдов, так и по 100 метров. Какой из этих отрезков длиннее и на сколько метров? На сколько футов? Забеги практикуются как на милю, так и на метрическую милю (1500 м). Сравните эти дистанции.

16. Стабильность цезиевых часов, которые используются в качестве атомного стандарта времени такова, что, если взять двое таких часов, то за 300000 лет их показания разойдутся не более чем на 1 с. Если бы с такой точностью измерялись

расстояния, то насколько бы отличались между собой два последовательных измерения расстояния между Нью-Йорком и Сан-Франсиско, которое составляет 2572 мили?

17. Антарктида по своей форме представляет полукруг радиусом 2000 км. Средняя толщина льда 3000 км. Сколько кубических сантиметров льда содержится в Антарктиде? (Кривизной Земли пренебречь)

18. Для измерения площади земли часто применяется единица площади, называемая *гектаром*, который равен по определению 10^4 м^2 . При добычании угля открытым способом угольный разрез занимает 77 гектар и в течении года он углубляется на 26 м. Какой объем земли в кубических километрах удаляется за это время?

19. Земля приблизительно представляет собой сферу радиусом $6.37 \times 10^6 \text{ м}$. Найдите: а) длину экватора в километрах; б) площадь поверхности Земли в квадратных километрах; в) объем Земли в кубических километрах.

20. Ниже приведены в разных единицах приблизительные максимальные скорости некоторых животных. Преобразуйте эти скорости в м/с и расположите животных в порядке возрастания их максимальной скорости. Белка-19 км/час; кролик-30 узлов; улитка-0.030 мили/час; паук-1.8 футов в секунду; гепард- 1.9 км/мин; человек-1000 см/с; лиса-1100 м/мин; лев-1900 км в день.

21. Космический корабль движется со скоростью 19200 миль в час. Запишите эту скорость в световых годах в столетие.

22. В автомобиле на передней панели перед водителем имеется цифровой дисплей, который показывает расход горючего. С помощью переключателя показания дисплея можно устанавливать как в Британской системе единиц, так и в системе СИ. В Британской системе расход горючего показывается в милях на галлон, а в СИ, наоборот, в литрах на километр. Чему в СИ соответствуют показания дисплея 30.0 миль/галлон?

23. Астрономические расстояния настолько велики по сравнению с земными, что для удобства их выражения используются гораздо большие единицы длины. *Астрономическая единица* (АЕ) равна среднему расстоянию от Земли до Солнца $1.5 \times 10^8 \text{ км}$. Один *парсек* (пк) равен расстоянию, на котором угол в 1 угловую секунду будет иметь длину дуги равную 1 АЕ. *Световой год* (сг) равен расстоянию, которое свет, двигаясь со скоростью $3.00 \times 10^5 \text{ км/с}$, проходит за год. (а) Выразите расстояние от Земли до Солнца в парсеках и в световых годах. (б) Выразите парсек и световой год в километрах. Хотя световой год часто используется в популярной литературе, тем не менее в астрономии профессионалы в качестве единицы длины используют именно парсек.

24. Эффективный радиус протона равен примерно $1 \times 10^{-15} \text{ м}$. Радиус наблюдаемой Вселенной (расстояние до наиболее удаленного видимого квазара) равен $2 \times 10^{26} \text{ м}$ (см. Табл. 4). Укажите по логарифмической шкале имеющее физический смысл расстояние, которое лежит приблизительно посередине между этими двумя величинами.

25. Среднее расстояние от Земли до Солнца в 390 раз больше расстояния от Земли до Луны. Рассмотрите полное солнечное затмение (Луна между Солнцем и Землей; см. Рис. 8) и вычислите (а) отношение диаметра Солнца к диаметру Луны; (б) отношение объема Солнца к объему Луны; (в) диаметр Луны, если угол, под которым виден ее диаметр равен 0.52° и расстояние от Земли до Луны равно $3.82 \times 10^5 \text{ км}$.

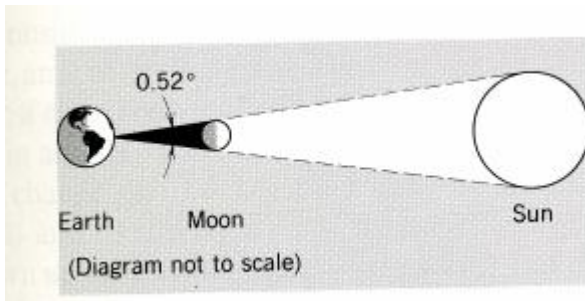


Рис. 8. К задаче 25.

26. С помощью спутниковой системы GPS (Global Positioning System; см Рис. 9) определены координаты нефтяного танкера: $43^{\circ} 36' 25.3''$ северной широты и $77^{\circ} 31' 48.2''$ западной долготы. Если точность этого результата равна $\pm 0.5''$, то какова неопределенность в положении танкера измеренная вдоль (а) линии север-юг (меридиан долготы) и (б) линии восток-запад (параллель широты)? Где находится танкер?

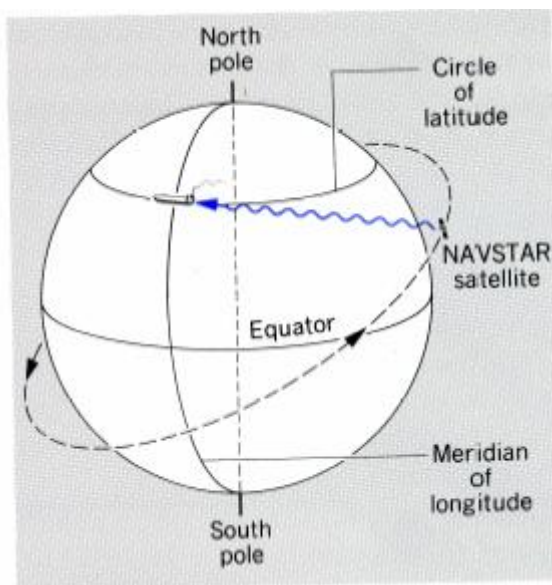


Рис. 9. К задаче 26.

Раздел 1-5 Стандарт массы

27. Используя материал этой главы, определите сколько атомов водорода содержит 1.00 кг этого вещества.

28. Молекула воды (H_2O) состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Масса атома водорода равна 1.0 а. е. м., атома кислорода- 16 а. е. м. (а) Чему равна масса одной молекулы воды в кг? (б) Сколько молекул воды содержится во всех океанах мира? Полная масса воды в океанах равна 1.4×10^{21} кг.

29. В континентальной Европе один "фунт" равен полкилограмма. Что лучше: купить в Париже один фунт кофе за \$3.00 или купить в Нью-Йорке один фунт кофе за \$2.40?

30. размеры комнаты составляют 21 фт×13 фт×12 фт. Чему равна масса воздуха в комнате? Плотность воздуха при комнатной температуре и нормальном давлении равна 1.21 кг/м^3 .

31. Обычный кубик сахара имеет ребро длиной 1 см. Допустим, у вас есть ящик в виде куба, в котором содержится 1 моль таких сахарных кубиков. Чему равна длина ребра такого ящик?

32. Человек, соблюдающий диету, теряет в неделю 2.3 кг. Чему равна скорость уменьшения массы человека в миллиграммах в секунду?

33. Для того, чтобы осушить контейнер, содержащий 5700 м^3 воды требуется 12 часов. Чему равна (в кг/с) скорость вытекания воды из контейнера? Плотность воды равна 1000 кг/м^3 .
34. Средний размер песчинок на Калифорнийском пляже равен 50 мкм. Чему равна масса такого песка покрывающая площадь, равную площади поверхности куба со стороной один метр? Песок состоит из двуокиси кремния, 1 м^3 которого имеет массу равную 2600 кг.
35. Эталон килограмма (см. Рис. 5) представляет собой цилиндр, высота которого равна его диаметру. Покажите, что при фиксированном объеме, это условие соответствует минимально возможной площади поверхности, что важно с точки зрения минимизации влияния загрязнения поверхности и ее изнашивания.
36. Расстояние между соседними атомами или молекулами в твердом теле можно оценить, вычислив удвоенный радиус сферы, объем которой равен объему, приходящемуся на один атом. Вычислите расстояние между соседними атомами в (а) железе и (б) натрии. Плотности железа и натрия равны 7870 кг/м^3 и 1013 кг/м^3 , соответственно. Масса атома железа равна $9.27 \times 10^{-26} \text{ кг}$, атома натрия- $3.82 \times 10^{-26} \text{ кг}$.

Раздел 1-6 Точность и значащие цифры

37. В период с 1960 по 1983 годы эталон метра определялся как 1650763.73 длин волн определенного красно- оранжевого излучения атомов криптона. Вычислите с учетом надлежащего числа значащих цифр расстояние в нанометрах, соответствующее одной длине волны этого излучения.
38. Вычислите с учетом надлежащего числа значащих цифр: а) $37.76 + 0.132$; б) $16.264 - 16.26325$.
39. Вычислите с учетом надлежащего числа значащих цифр площадь металлической пластины, имеющей форму: а) прямоугольника длиной 8.43 см и шириной 5.12 см; б) диска, радиус которого равен 3.7 см.

Раздел 1-7 Анализ размерностей

40. Пористая каменная порода, через которую могут течь подземные воды, называется водоносным пластом. Объем воды V , протекающей за время t через поперечное сечение A такого пласта дается так называемым законом Дарсу:

$$\frac{V}{t} = KA \frac{H}{L},$$

где H - перепад высоты водоносного пласта на длине L (см. Рис. 10). Величина K называется гидравлическим сопротивлением пласта. Каковы единицы измерения K в системе СИ?

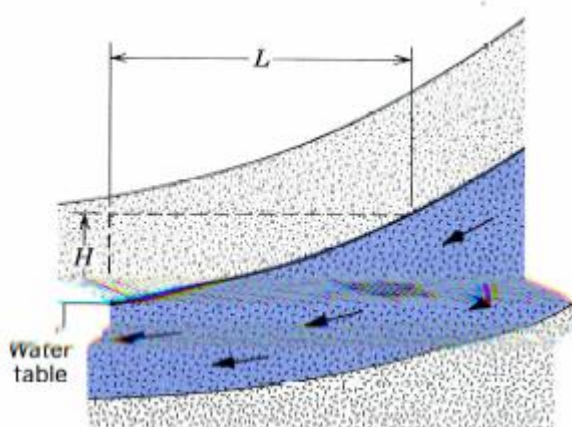


Рис. 10. К задаче 40.

41. В примере 5 постоянные h , G , и c были скомбинированы таким образом, чтобы получилась величина, имеющая размерность времени. Повторите этот вывод, чтобы получить величину, имеющую размерность длины и дайте численную оценку результата. Безразмерные константы игнорируйте. Полученный вами результат есть так называемая *Планковская длина*- размер наблюдаемой Вселенной в момент времени равный Планковскому времени.

42. Повторите процедуру, описанную в задаче 41, чтобы получить величину, имеющую размер массы. Это так называемая *Планковская масса*-масса наблюдаемой Вселенной в момент времени равный Планковскому времени.