

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЭТАЛОНЫ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ*)

Г. Клеменс

До последнего времени существовал один основной эталон времени и частоты, который использовался на равных правах для обоих случаев как для гражданских, так и для научных целей. Таким эталоном служила секунда, которая была определена как $1/86400$ часть средних солнечных суток. В настоящее время используют новое официальное определение, которое выражено уже не через сутки, а через целый год, и приписывают за секунду $1/31\,556\,925\,975$ часть тропического года для 1900,0. Однако сейчас можно также указать на эталон частоты совершенно иного сорта, который появился благодаря достижениям в области измерений частот естественных колебаний, происходящих в атомах и молекулах. Для краткости эти новые эталоны мы будем называть атомными эталонами.

Таким образом, впервые в истории науки существуют одновременно, по крайней мере, два основных эталона времени и по крайней мере три основных эталона частоты. Такое изобилие эталонов встречается нечасто и для того, чтобы избежать путаницы и недоразумений, желательно пристально рассмотреть эти эталоны с точки зрения наших основных представлений об операциях измерения и выяснить в той степени, в какой мы это можем сделать сегодня, преимущества и недостатки каждого эталона в отдельности. Опасность путаницы и недоразумений велика еще и потому, что практическое определение времени и частоты находится в руках немногочисленной группы астрономов. Астрономы, не занимающиеся службой времени, и ученые, работающие в других отраслях науки, занятые своими собственными делами, уделяют мало внимания рассматриваемому вопросу. Таким образом, является прямым долгом тех немногих астрономов, которые что-то знают относительно эталонов времени и частоты, рассказать широкой аудитории, что же собственно им известно. В этом и состоит задача предлагаемой статьи.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Следует начать с обзора некоторых основных определений. Можно указать несколько различных видов определений, и лица, занимающиеся семантикой, уделяют большое внимание именно этой стороне дела, но для наших целей достаточно иметь в виду два сорта определений — операционные определения, во-первых, и все прочие определения, во-вторых. Операционные определения непосредственно указывают, что нужно делать, тогда как в прочих определениях таких указаний нет. Например, операционное определение метра состоит в том, что это есть расстояние между двумя отметками на платиновом стержне, хранящемся в опреде-

*) Science 123, 567 (1956).

ленном месте во Франции. Другое, более раннее определение метра подразумевало, что метр — это $\frac{1}{10\,000\,000}$ часть дуги меридиана, проходящего от Северного полюса до экватора через Париж. Кроме того, метр равен 39,37 дюйма. Если мы хотим вести рассуждения наиболее строгим образом, то всегда предпочтительно пользоваться операционными определениями. Это, по большей части, я и буду делать. Поэтому не следует удивляться тому, что некоторые из приводимых ниже определений будут отличаться от определений, которые приводятся в справочниках.

Всякое повторяющееся явление, повторяемость которого может быть определена, является мерой времени. Примерами являются прохождение железнодорожных поездов через определенный пункт, тиканье часов, колебания кристалла кварца или колебания в атоме, прохождение звезды через меридиан, оборот Луны вокруг Земли или Земли вокруг Солнца.

Интервал между двумя последовательными повторениями явления является единицей времени.

Часами может служить любой механизм, который считает такие повторения. Часы служат часто также и для того, чтобы отсчитывать промежутки времени, являющиеся частью основной единицы. Так, наши обычные часы делят сутки на часы и минуты, а специальные часовые устройства позволяют отсчитывать $\frac{1}{1000}$ и $\frac{1}{10\,000}$ части секунды.

Частота есть отношение между двумя различными единицами времени, обычно выраженное в виде числа, показывающего, сколько раз встречается единица одного сорта в течение единицы времени другого сорта. В качестве примера мы рассмотрим переменный ток. Единица времени задается одним периодом тока. Если мы выбираем в качестве другой единицы времени секунду, то частота тока может быть выражена, например, как 60 периодов в секунду. Строго говоря, две любые единицы времени могут быть использованы в качестве базиса для определений частоты; однако практически встречаются только два сорта частот: 1) Частота может быть использована как определение одной единицы времени через другую. Например, когда мы определяем (старую) секунду как $\frac{1}{86400}$ часть средних солнечных суток, мы можем с таким же основанием сказать, что частота секунды за средние солнечные сутки равна 86 400. Частоты, используемые как определения, являются точно определенными и неизменными. 2) Частота может быть использована для установления связи между единицей времени, полученной из эксперимента, и некоторой основной единицей времени. Частоты такого сорта бывают либо номинальными, либо фактическими. Так, например, номинальная частота переменного тока может быть равна 60 периодам в секунду, тогда как фактическая частота может оказаться равной 59,9998 периодам в секунду. Отметим, что так как фактическая частота должна определяться экспериментально, то она безусловно подвержена влиянию ошибок измерения.

Точность хода часов — это разность между их нормальной частотой и их фактической частотой, условно полагаемая равной разности между номинальной и фактической частотой. Например, секундный маятник имеет номинальную частоту 86 400 периодов в сутки. Если его фактическая частота равна 86 401 период в день, то точность его хода равна — 1 периоду в сутки. Обычно говорят, что часы спешат на 1 секунду в день, и это утверждение должно пониматься в том смысле, как это было только что разъяснено, хотя такой способ выражения менее точен, так как слово секунда употребляется уже в двух значениях: во-первых, как единица времени, определяемая самими часами, и, во-вторых, как единица, полученная делением средних солнечных суток на 86 400 ча-

стей. Точность хода часов может быть также выражена словами: «часы убегают вперед на 1 часть за 86 400 частей» или что «фактическая частота часов больше номинальной на 1 в $8,64 \cdot 10^4$ ». Мы видим, что частоты и точность хода тесно связаны между собой, но отнюдь не совпадают друг с другом.

Мы заметим, что, хотя период переменного тока и секундного маятника оба являются мерой времени, тем не менее часами может служить лишь секунднй маятник. Секундный маятник является часами потому, что его период может быть непосредственно определен, что не имеет места в случае переменного тока. Разумеется, можно придумать механизм для подсчета периода переменного тока, но такой механизм и есть часы. Различие это чрезвычайно существенно, потому что часы показывают время или, говоря техническим языком, устанавливают эпоху — под эпохой подразумевается некоторый определенный момент времени — тогда как переменный ток сам по себе этого делать не может. Я отмечу попутно, что слово «эпоха» часто используется для обозначения более или менее смутно определенного интервала времени (историческая эпоха, ледниковая эпоха). Мы не будем использовать здесь слово «эпоха» в таком смысле.

Если отношение двух различных единиц времени, т. е. частота, меняется от эпохи к эпохе, то говорят, что одна из единиц времени ускоряется относительно другой. Такого рода ускорение является скорее правилом, чем исключением. Следовательно, как общее правило, одни часы не только ускоряются относительно других, но и само ускорение меняется от эпохи к эпохе. Большинство работ, касающихся практического определения времени и частоты, ставят целью определения ускорения часов и изменения частот.

Предыдущие определения могут быть пояснены с помощью аналогии с привычными терминами, употребляемыми при измерениях длины. Это сопоставление проведено в двух параллельных столбцах таблицы 1.

Если представить себе шкалу времени как независимую последовательность единиц времени, поставленных в одно-однозначное соответствие с действительными числами, тогда эпоха является определенным моментом на шкале времени, точно таким же, каким является определенная точка на шкале длин.

Если обозначить две различные единицы времени через t_1 и t_2 , тогда частота определяется отношением t_1/t_2 , в то время как скорость определяется, скажем, отношением L/t_2 .

Аналогично изменение частоты или ускорение t_1 относительно t_2 может быть выражено как t_1/t_2^2 , тогда как обычно ускорение выражается в виде L/t_2^2 .

Очевидно, что величина, обратная частоте, есть также частота, однако это не имеет места в случае скорости. Также отношение двух частот есть снова частота при условии, что у частот, входящих в отношение, одна из единиц времени общая. Например, отношение t_1/t_2 к t_3/t_2 равно

Таблица I

Сопоставление терминов, используемых в связи с измерениями времени и длины

Время	Длина
Эпоха (определенный момент времени, время дня)	Положение (определенная точка)
Частота, точность хода часов	Скорость
Изменение частоты, ускорение	Ускорение
Изменение ускорения	Изменение ускорения

t_1/t_2 ; тогда как отношение двух скоростей является безразмерным числом, если только единица времени у этих скоростей выбрана одна и та же. Таким образом, аналогия между частотой и скоростью является далеко не полной.

Важно помнить, что изменение частоты само по себе есть ускорение одной шкалы времени относительно другой и что оно, собственно, не может быть названо ускорением частоты. Ускорение частоты, если только вообще следует вводить такой термин, есть изменение в фактическом ускорении, т. е. оно должно иметь форму t_1/t_2^3 .

Все то, что было сказано до сих пор о мерах времени, имеет в равной степени отношение к любым мерам времени, которые когда-либо употреблялись. Практически очевидно, что некоторые меры предпочтительнее других. Мы, например, не собираемся устанавливать основные единицы времени по промежуткам времени между прохождением железнодорожных поездов; практически мы поступаем наоборот: мы пускаем поездка более или менее согласно часам, вместо того чтобы ставить часы по прохождению поездов. Спросим себя, какие требования следует предъявить к мерам времени, чтобы они могли служить в качестве эталона. Разумеется, мы должны требовать от них непрерывного действия. Следует, конечно, иметь в виду и их доступность; из двух мер, имеющих по существу равную ценность, мы всегда отдадим предпочтение более доступной. Однако имеется еще одно существенное требование, формулировка которого сама по себе является уже затруднительной. Мы обычно выражаем его, говоря, что эталонная мера времени должна быть неизменной, но фактически мы не имеем абсолютного критерия неизменности. Допустим, что мы сравниваем две меры времени друг с другом и находим, что одна из них ускоряется относительно другой; мы в праве заключить, что одна из них или обе сразу меняются, но вопрос о том, какая из них меняется, остается открытым. Если же в другом случае никакого ускорения не наблюдается, мы все же не можем заключить, что обе меры неизменны (в пределах ошибок измерения); на самом деле обе меры могут каким-то образом изменяться относительно третьей. Тем не менее, термину неизменности меры времени может быть придан вполне определенный смысл. Чтобы полностью разобраться в этом вопросе, нам будет весьма полезно остановиться на небольшой главе из истории астрономии, которая объяснит нам, как и зачем совсем недавно секунда была переопределена через тропический год вместо старого определения через средние солнечные сутки.

НЕБЕСНЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Уравнения движения любого члена солнечной системы могут быть получены из ньютоновского закона тяготения. (Я не говорю о тех уточнениях, которые требует общая теория относительности и которые не имеют отношения к рассматриваемым вопросам.) Эти уравнения для каждого тела представляют собой три дифференциальных уравнения, определяющих вторые производные от трех координат по времени в зависимости от значений масс и взаимных расстояний всех присутствующих тел. Три таких уравнения для всякого тела могут быть решены последовательной аппроксимацией, если мы располагаем необходимыми сведениями относительно других тел и если нам известны шесть постоянных интегрирования, которыми могут служить три координаты и три компоненты скоростей прямоугольной декартовой системы координат в некоторую подходящую эпоху. Решение определяет три координаты тела в зависимости от времени, отсчитываемого от принятой эпохи как

вперед, так и назад; такое математическое выражение решения и называют теорией движения тела. Поскольку в солнечной системе имеется девять планет, обладающих значительными массами, способными влиять на движение каждой из других планет, легко понять, что задача построения теории для какой-либо из этих планет представляет значительные трудности. Тем не менее, задача эта была успешно разрешена, причем с очень высокой степенью точности. Координаты Юпитера, например, были подсчитаны вплоть до десятой значащей цифры на промежутке времени с 1653 по 2060 г., причем было достигнуто строгое соответствие с начальными условиями¹.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ МАССЫ, ВРЕМЕНИ И РАССТОЯНИЯ

Рассмотрим внимательно точные определения массы, шкалы времени и расстояния, принятые в астрономических теориях. Единицей массы служит масса Солнца, а массы всех остальных небесных тел выражаются через массу Солнца. Принято обычно говорить, что единицей времени являются средние солнечные сутки, но, как мы увидим ниже, это определение не совсем точно; фактически используемая единица — это среднее значение средних солнечных суток, взятое за XVIII и XIX вв. Единицей расстояния служит чисто астрономическая единица, получаемая через принятые единицы массы и времени с помощью ньютоновского закона притяжения. Для наших целей будет достаточным в качестве единицы расстояния взять такое расстояние от единичной массы, на котором тело с незначительной массой, движущееся по круговой орбите, проходит угол в 0,01720209897 радиана в единицу времени. Астрономическая единица длины близка, но отнюдь не равна среднему расстоянию Земли от Солнца.

Для физика единицы массы и длины, применяемые астрономами, могут показаться странными. Однако причиной для выбора этих единиц служит чрезвычайно ограниченная природа астрономических наблюдений. Исключая измерения скорости, направленной вдоль линии наблюдения, всё, что знают астрономы о движении, расстояниях и массах небесных тел, выводится из прямых измерений одного единственного вида: измерения угла между двумя линиями, являющимися направлениями, по которым ведет наблюдения астроном. Результатом наблюдения являются значения угла и эпохи. Угол в некоторых случаях представляет собой угловое расстояние между двумя небесными объектами, а в некоторых случаях — угловое расстояние между каким-либо небесным объектом и направлением на зенит. Из одних таких измерений можно получить с помощью теории отношение масс и отношение расстояний, но в любом случае астрономическими методами нельзя выразить эти массы и расстояния в граммах и сантиметрах. Верно, конечно, что мы в состоянии с точностью до пяти или несколько меньшего количества значащих цифр выразить массы небесных тел в граммах, а расстояния между ними в сантиметрах, но, для того чтобы получить эти числа, мы должны довериться физикам и геодезистам, определившим массу и размеры Земли; самим астрономам такие сведения для каких-либо астрономических целей вовсе не нужны, этими данными пользуются в тех случаях, когда приходится отвечать на вопросы, поставленные со стороны представителей других специальностей.

Даже после того, как были изобретены механические часы, астрономы-наблюдатели продолжали пользоваться в качестве единицы времени средними солнечными сутками. Для такого выбора имеется несколько причин. Прежде всего, астроному необходимо иметь естественную единицу

времени, а отнюдь не произвольную. Произвольную единицу времени нельзя перемещать с места на место столь же просто, как произвольную единицу длины. Далее, все произвольные единицы времени, — так сказать, изделия человеческих рук, такие, например, как механические или электрические часы — нестабильны и недолговечны. Невозможно построить пару механических или электрических часов, которые показывали бы всегда одинаковое время или одни часы, которые шли бы все время одинаково и без остановки. Следовательно, естественная единица времени является необходимостью для того, чтобы можно было сравнивать между собой астрономические наблюдения, сделанные в различных местах и в различные эпохи. Из всех естественных единиц времени, доступных астрономам, период обращения Земли является самым доступным и может быть измерен с очень высокой степенью точности. Нужно только пронаблюдать прохождение меридиана какой-либо звездой в две последовательные ночи и тем самым непосредственно получается период обращения Земли. Хотя звезды нельзя наблюдать в ненастную погоду, но часы, сделанные человеческими руками, вполне пригодны для того, чтобы вести счет времени от одной ясной ночи до другой, а также для того, чтобы разбить период обращения земли на 86 400 частей. Любопытно отметить попутно, что производство и усовершенствование часов получило наибольшее развитие в Англии — стране, отличающейся изобилием ненастных дней.

Средние солнечные сутки не совсем совпадают с периодом обращения Земли и их наблюдение менее доступно, поскольку Солнце наблюдать сложнее, чем звезды. Однако астрономы с готовностью пошли на это небольшое самопожертвование, необходимое для того, чтобы единица времени была подходящей также и для организации их жизни днем. Чтобы перейти от периода обращения Земли к средним солнечным суткам, необходимо, всего-навсего, ввести множитель 1,0027378118868. Это число, которое является фактической частотой, — одна из наиболее точно определенных в физике констант, а, быть может, самая лучшая по точности определения константа: лишь тринадцатая цифра после запятой сомнительна. Существенно подчеркнуть, что средние солнечные сутки определены таким образом, чтобы множитель, о котором идет речь, являлся абсолютно константой — это означает, что средние солнечные сутки жестко связаны с вращением Земли и любая причина, возмущающая средние солнечные сутки, вносит возмущение в скорость вращения Земли, и наоборот.

НАБЛЮДЕНИЕ И ТЕОРИЯ

Астрономы всегда стремились к получению таких теорий движения планет и спутников, которые давали бы полное согласие с результатами фактических наблюдений. С каждым значительным шагом вперед в наших основных теоретических построениях оживала надежда на достижение полного успеха, но непрерывный рост точности наблюдений обрек все надежды подобного рода на провал, по крайней мере для нашего поколения; трудно предсказать, конечно, что будет в будущем. После того как был установлен закон всемирного тяготения, казалось, что все практические проблемы небесной механики свелись к чисто вычислительным проблемам. Однако было обнаружено опережение перигелия Меркурия, которое не получило своего объяснения в течение следующих пятидесяти лет после своего открытия. Следовательно, одно дело — свести некоторую проблему к вычислениям, и совсем другое дело — решить поставленную проблему до конца. Вычисления планетарной теории или лунной теории представляют одну из наиболее значительных задач, из числа известных

в науке, по крайней мере, в тех случаях, когда необходимо получить значения координат с точностью до восьми и выше значащих цифр. Задача состоит не только в том, что нужно перемножить миллионы чисел — что вплоть до самых последних лет уже само по себе составляло проблему, но и в том, чтобы иметь подтверждение правильности решения; возможно, что самым трудным является организация всей работы таким образом, чтобы она вообще была доведена до конца. Десятилетие напряженной работы потребовалось, чтобы получить лучшие планетарные теории, а две лучшие лунные теории потребовали для своей разработки около двадцати пяти лет каждая. Движение Луны требует особенного внимания; не исключено, что Луне было посвящено не меньше усилий, чем всем остальным небесным объектам, взятым вместе.

Примерно лет восемьдесят тому назад начали подозревать, что расхождения при сопоставлении теории и наблюдений могут быть приписаны, по крайней мере отчасти, скорее дефектам в избранной мере времени, чем неадекватности теории. Для того чтобы нам было легче представить себе последствия дефектов в избранной мере времени, допустим некоторые вещи, которых на самом деле не было. Допустим, во-первых, что мы имели бы в своем распоряжении теории движения всех небесных тел, которые вполне согласовались бы с экспериментом; допустим, далее, что скорость вращения Земли уменьшается незаметным образом, в том смысле, что это уменьшение не может быть обнаружено часами, выполненными человеком; представим себе также, что наблюдения Солнца, Луны и планет отложены до такого момента, когда среднее солнечное время отстанет на час. Что будет обнаружено, когда наблюдения возобновятся? Очевидно, Солнце, Луна и планеты — все будут наблюдаться с опережением предвычисленных положений на углы, на которые они смещаются в течение одного часа. К примеру часовое движение Луны в течение месяца составляет угол от 0,48 до 0,68 градуса, и его изменения известны с большой точностью; таким образом, сразу станет ясным, что Луна опережает свое теоретическое движение и мы сразу начнем подозревать ошибку в лунной теории, до тех пор, пока не обратимся к наблюдениям Солнца. Солнце окажется впереди его предвычисленного положения на величину, изменяющуюся в течение года от 136 до 166 угловых секунд; величина этого расхождения и его вариации легко будут обнаружены. Более того, затмение Луны будет наблюдаться ровно на 1 час раньше предсказанного времени. Меркурий будет наблюдаться иногда восточнее, а иногда западнее положения, которое он должен был занимать согласно теории, в зависимости от того, совершает ли он прямое или обратное движение; величина и вариации этого расхождения указали бы на то, что в некоторую эпоху Меркурий находился в положении, которое по расчету соответствовало эпохе на 1 час позже. Аналогичные наблюдения и выводы могли бы быть сделаны и на основании наблюдений над другими планетами. Неизбежным заключением, к которому должны были бы прийти наблюдатели, состояло бы в том, что либо наши часы отстают на 1 час, либо Луна и остальные планеты приобрели ускорения на своих орбитах, так что они получили часовое опережение, а затем снова приобрели свою прежнюю скорость. Другими словами, либо что-то неладно с мерами времени, либо что-то неладно в теориях движения Луны и планет, и эти теории содержат ошибки весьма странного характера.

Нечто подобное описанному гипотетическому примеру произошло на самом деле, только это событие происходило не с часами и не с вращением Земли, потерявшей точно 1 час времени. Для того чтобы согласовать наблюдения с теорией, необходимо было предположить, что часы идут иногда быстрее, а иногда медленнее; необходимо предположить, что

Земля может вращаться с большей скоростью, чем средняя скорость вращения, несколько лет, затем довольно резко изменяет скорость своего вращения, так что начинает вращаться более медленно или даже быстрее. Две тысячи лет тому назад, согласно наблюдениям солнечных затмений, произведенным в то время, часы, соответствующие среднему солнечному времени, должны были отставать на 2,6 часа; около 1750 г. часы соответствовали верному времени; в 1850 г. они отставали на 2 секунды; в 1900 г. они были на 3,9 секунды вперед; в 1940 г. они отставали на 24,5 секунды². Относительно большое отклонение в начале нашей эры не может вызвать особого удивления, если вспомнить, что мы подгоняли нашу единицу среднего солнечного времени так, чтобы она была близка к средней длительности солнечных суток, усредненных по XVIII и XIX вв.; в очень отдаленные эпохи можно ожидать значительно большие отклонения, чем в наши дни.

Астрономы, не колеблясь, приписали наблюдаемое расхождение ошибкам при установлении единиц времени, а не ошибкам в теории движения. Вполне уместно спросить, почему они так поступили. На этот вопрос можно ответить по-разному, исходя из различных точек зрения. Для тех, кто разделяет убеждения Оккама (экономия гипотез), ответ очевиден. Либо мы должны предположить, что скорость вращения Земли изменяется некоторым образом, который мы не можем предусмотреть, либо мы должны предположить, что Луна и планеты испытывают некоторые изменения во время своего движения по орбите, тоже непредсказуемым способом, но все совместно, и что астрономическая единица длины тоже соответственно меняется; изменение единицы длины сопровождается изменением скорости света. Для тех, кто разделяет идеи общей теории относительности, достаточно последнего из приведенных следствий, поскольку постоянство скорости света является фундаментальной основой общей теории относительности. Тем, кто согласен принимать гипотезы лишь в том случае, если они имеют при себе некоторую подходящую модель, еще несколько лет тому назад нельзя было высказать ничего в оправдание упомянутого предположения; но даже и в настоящее время механизм, ведущий к изменению скорости вращения Земли, едва ли сколько-нибудь надежно раскрыт. Полагают, например, что турбулентность в жидкой сердцевине Земли, сопровождаемая электромагнитным взаимодействием между сердцевиной и оболочкой Земли, достаточна для того, чтобы вызвать соответствующие изменения. Наконец, для тех, кто практически несет службу времени и кто помнит времена, когда не было никаких сигналов по радио и когда на корабль брали три хронометра и считали правильными те два, которые шли одинаково, достаточно указать на то, что вращение Земли и обращение Луны и планет фактически всегда служили часами. Четверо часов — лунное обращение, обращение Меркурия, Венеры и самой Земли — согласуются между собой, тогда как вращение Земли не согласуется ни с одним из них.

Внешние планеты могут служить часами в такой же мере, как и три внутренние, и принципиально все небесные тела являются часами, но большинство из них имеет столь малое угловое движение из-за колоссального удаления от Земли, что их смещение за секунду или две не может быть измерено с такой точностью, какая необходима для проверки характера вращения Земли.

Таким образом, мы обнаруживаем, что имеется еще одно требование, которому должна удовлетворять практическая единица времени; в дополнение к тому, что она должна быть постоянно действующей, легко доступной и «неизменной», необходимо, чтобы повторяющееся явление, которое должно наблюдаться, должно повторяться умеренно часто. Точный

смысл выражения «умеренно часто» зависит от точности астрономических наблюдений. Для современной астрономии наибольшей естественной единицей времени, имеющей практическое значение, является год. Если точность астрономических наблюдений возрастет в 10 раз, то обращение Юпитера, которое происходит примерно за 12 лет, может представить нам меру времени, точность которой будет соответствовать точности меры времени, определяемой обращением Земли в настоящее время.

ЭФЕМЕРИДНОЕ ВРЕМЯ

Теперь мы уже в состоянии понять, почему недавно секунда была переопределена как определенная часть тропического года, а не как определенная часть средних солнечных суток³. Вместе с тем мы уже можем ответить на вопрос о том, в каком смысле можно говорить о неизменности меры времени; неизменная мера времени — это просто такая мера времени, которая позволяет полностью согласовать теории движения небесных тел с наблюдениями. Говоря даже более определенно, можно сказать, что это есть независимая переменная в принятых уравнениях движения. Вообще говоря, нет никакой практической необходимости ставить вопрос о неизменной мере времени совсем, и мы увидим позже, почему следует даже рекомендовать не делать этого. Само слово «неизменный» будит в умах многих представление о чем-то абсолютном, и поэтому его следует избегать, если мы хотим выражаться с предельной строгостью. Все, что требуется фактически для гражданских и научных целей, заключается в выборе подходящей меры времени и точном ее определении. Для удобства введено специальное наименование для той меры времени, которая служит независимой переменной в уравнениях движения; она называется эфемеридным временем в отличие от среднего солнечного времени. Эфемериды — это таблицы положений небесных тел в различные эпохи, вычисленных согласно принятым теориям движений; эфемеридное время, таким образом, есть просто мера времени, определяемая эфемеридами.

При переопределении секунды было принято, что будет использован тропический год для 1900,0; нуль в первом десятичном знаке указывает на начало 1900 года. Основанием для такого выбора послужило то, что тропический год (который соответствует временам года) уменьшается со скоростью 0,530 эфемеридных секунд в столетие или на единицу за $5,95 \cdot 10^9$ лет. Зная эти вариации, легко найти соотношение между интересующим нас годом и тропическим годом для 1900,0 с точностью до $1 \cdot 10^{-13}$.

Эфемеридное время практически определяется наблюдениями над Луной; Луна движется значительно быстрее планет и, следовательно, с помощью Луны время может быть определено со значительной точностью. Разумеется, единичное наблюдение Луны не позволяет определить эфемеридное время с требуемой точностью. Вплоть до самого последнего времени для того, чтобы набрать материал наблюдений, представляющий значение в этом смысле, было необходимо вести наблюдения за Луной в течение целого года. Обработка данных наблюдений также требовала некоторого времени; отсюда эти определения эфемеридного времени производились с запозданием порядка двух лет. Недавнее изобретение новой фотографической техники наблюдения Луны⁴ привело к резкому возрастанию точности наблюдений; теперь можно думать, что в недалеком будущем мы уже сможем определять эфемеридное время из месяца в месяц столь же аккуратно, как сейчас мы это делаем из года в год. Но даже в лучшем случае эфемеридное время не может быть определено

с такой же точностью, как среднее солнечное время. Вращение Земли происходит приблизительно в 27 раз быстрее, чем обращение Луны, что является существенным преимуществом. Ошибка в 0,1 угловой секунды при наблюдении экваториальной звезды соответствует ошибке в 0,007 секунды среднего солнечного времени, тогда как та же самая ошибка при наблюдении Луны соответствует ошибке в 0,18 секунды эфемеридного времени. Эфемеридное время менее доступно, чем среднее солнечное время. Таким образом, при переопределении секунды, как производной от года, вместо того, чтобы брать ее в качестве производной от суток, мы заменили менее доступную неизменную единицу на более доступную, изменяющуюся.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Практическое определение среднего солнечного времени состоит в том, что с помощью каких-либо механических или электрических часов отмечают момент прохождения звездой местного меридиана. Истинное среднее солнечное время прохождения звезды через меридиан известно заранее через целую серию наблюдений и вычислений, которые мы не станем здесь обсуждать. Расхождение между истинным временем прохождения звезды через меридиан и показаниями часов определяет ошибку часов. Часы, употребляемые в этом случае, вовсе не обязательно ставить на правильный отсчет, а вместо этого достаточно вести запись их ошибок; ошибки эти непрерывно меняются. Такая запись позволяет ставить всякие другие часы после сравнения их с часами, ошибка которых известна, на правильное время, подготавливая их для контроля радиосигнала времени. Но радиосигналы времени не могут быть абсолютно правильными из-за ошибок в астрономических наблюдениях, а также из-за ошибок в экстраполяции ошибок часов.

Наиболее точным инструментом для определения среднего солнечного времени является зенитная фотографическая труба и астролябия⁶. С помощью зенитной фотографической трубки в Военно-морской обсерватории США (U. S. Naval Observatory) установилась практика наблюдения примерно за 15 звездами в каждую ясную ночь, и вероятная ошибка среднего результата работы за ночь составляет примерно 3 миллисекунды. (Под вероятной ошибкой подразумевается величина, с одной стороны, превышающая половину фактических ошибок, но, с другой, меньшая другой половины этих ошибок.) Лучшие часы из кристаллов кварца идут с большей точностью, чем эта, и их используют для сглаживания случайных ошибок в астрономических наблюдениях от ночи к ночи, так что в пределах одной обсерватории, имеющей в своем распоряжении лучшие образцы инструментов и часов, среднее солнечное время может быть определено с вероятной ошибкой, скажем, в две миллисекунды. Международное Бюро времени в Париже, входящее в Международный астрономический союз сопоставляет данные, полученные различными национальными службами времени, и тем самым имеет возможность (с запозданием около года) вносить дальнейшие улучшения в наши знания среднего солнечного времени. В настоящее время ошибка в определении солнечного времени, вероятно, меньше чем 1 миллисекунда. В настоящей статье я буду предполагать вероятную ошибку равной 2 миллисекундам.

Все, что говорилось до сих пор, относится к установлению эпохи; физики и инженеры по большей части заинтересованы в определении частот или промежутков времени. Для этих целей кварцевые часы более точны, чем астрономические наблюдения, вплоть до интервалов времени, по крайней мере, в несколько недель, тогда как для более длительных

промежутков времени астрономические наблюдения позволяют достичь большей точности, чем часы. Постольку, поскольку речь идет только об астрономических наблюдениях, любой промежуток среднего солнечного времени может быть определен с абсолютной ошибкой, вероятное значение которой составляет 3 миллисекунды; эта величина получена умножением вероятной ошибки в определении эпохи на корень квадратный из двух. Относительная ошибка в определении интервалов времени определяется иным законом. Если наблюдения приурочены к обоим концам интервала, то относительная ошибка меняется обратно пропорционально длительности интервала, однако если интервал времени достаточно велик, так что многие наблюдения производились внутри этого интервала, то точность повышается и становится примерно пропорциональной длительности интервала, взятой в степени $\frac{3}{2}$. В таблице II приведены некоторые приближенные оценки величин вероятных относительных ошибок, с которыми могут быть определены различные интервалы среднего солнечного времени; они получены на основании показаний лучших кварцевых часов и лучших астрономических наблюдений.

Высокая степень точности, указанная для интервала времени в 356 суток, конечно, не имеет особого значения, поскольку долгота суток изменяется неизвестным нам образом каждые несколько лет на величину 1×10^8 или даже больше. Например, если долготу суток в 1936 г. взять за единицу, то в 1923 г. долгота суток была больше на 1 в 10^8 и уменьшалась со скоростью 2 в 10^9 в год, тогда как в 1940 г. она была больше тоже на 1 в 10^8 , но уже возрастала со скоростью 2 в 10^9 в год. Практически вопрос заключается в том, с какой точностью с помощью астрономических наблюдений может быть определена переопределенная секунда или — что эквивалентно — долгота года. Как это было уже упомянуто, точность определения в этом случае меньше, чем при определении старой секунды, главным образом благодаря относительно медленному движению Луны. В прошлом требовалось собирать наблюдения над Луной в течение целого года для того, чтобы определить эфемеридное время с вероятной ошибкой порядка 100 миллисекунд; причем такая точность была достигнута лишь в последнее время. Она соответствует вероятной ошибке в 140 миллисекунд при измерении долготы отдельного года или 1 в 2×10^8 .

Два последних усовершенствования Военно-морской обсерватории США резко повысили точность определений. Одно из этих усовершенствований — точнейшие исследования в краевой зоне Луны, позволяющие удовлетворительно находить особенности лунной поверхности; следует напомнить, что все наблюдения над Луной относят к яркому краю видимого диска, и поэтому всякая возвышенность в точке, в которой производятся измерения, вносит некоторую неопределенность в определение эфемеридного времени. Второе усовершенствование — это новая техника наблюдения, сообщение о которой уже опубликовано: положение Луны относится к нескольким звездам из числа звезд ее ближайшего окружения для того, чтобы избавиться от ошибок наблюдений, связанных с движением Луны относительно звезд. В настоящее время с помощью одного

Т а б л и ц а II

Приближенные оценки вероятной относительной ошибки определения различных интервалов среднего солнечного времени

Средний солнечный интервал	Вероятная ошибка
1 сутки и меньше 30 суток 365 »	1 в 10^8 1 в 4×10^8 1 в 10^{10}

телескопа стало возможным определение долготы года с вероятной ошибкой 4 в 10^8 . Хотя в настоящее время работает только один телескоп, однако во время Международного геофизического года в 1957—1958 гг. планируется работа двадцати телескопов, так что можно надеяться, что долгота этого отдельного года будет определена с вероятной ошибкой $1 \div 2$ в 10^9 .

Таблица III

Вероятная относительная ошибка
определения интервалов
эфемеридного времени

Интервал эфемеридного времени	Вероятная ошибка
1/12 года или меньше	1 в 10^8
1 год	1 в 10^9
5 лет	1 в 10^{10}

Следует полагать, что, по крайней мере, четыре телескопа продолжают свою работу и на будущее время независимо друг от друга. Исходя из этого предположения, можно подсчитать вероятную относительную ошибку в определении интервалов эфемеридного времени. Для некоторых интервалов времени эта ошибка приведена в таблице III.

Вероятная ошибка для 1/12 года или меньше рассчитана в предположении, что для временного подразделения года используются кварцевые часы; для таких интервалов астрономические наблюдения дают меньшую точность. Следует подчеркнуть, что определения, обладающие указанной степенью точности, возможны только с некоторым запозданием; это запоздание может доходить до года. Хотя это запоздание и не снижает ценности получаемого табличного значения, отсутствие данных для недавнего прошлого зачастую является неприятным обстоятельством.

АТОМНЫЕ ЭТАЛОНЫ

За последние несколько лет прогресс техники позволил приблизиться к процессам естественных колебаний, происходящих в атомах и молекулах. Нет никаких оснований сомневаться в том, что эти колебания имеют столь же высокую степень устойчивости, как обращение планет вокруг Солнца и Луны вокруг Земли. Практическое затруднение заключается в подсчете числа этих колебаний за секунду, которое по порядку величины равно 10^{10} . Для этой цели были разработаны специальные методики, и естественная резонансная частота цезия была измерена в Национальной физической лаборатории в Англии⁷ с гарантированной точностью 1 в 10^9 . Авторы утверждают, что потенциальная точность измерений значительно выше, но для того, чтобы более высокая точность была достигнута, необходима дальнейшая разработка специального электронного оборудования.

Таким образом, мы получили в свои руки новый эталон частоты, который можно использовать для калибровки других частот, причем за несколько минут может быть достигнута та же степень точности, какая достигается при годовых астрономических наблюдениях. Это существенное преимущество говорит за то, что для некоторых целей атомные эталоны частоты будут употребляться охотнее, чем астрономические эталоны. Атомные эталоны фактически представляют собой естественную единицу времени, не зависящую от секунды и отличающуюся от секунды по самому своему характеру, поскольку атомные эталоны не зависят от движения небесных тел, по крайней мере, в операционном смысле.

Очень важным вопросом для основ всякой научной деятельности является вопрос о том, постоянны или переменны атомные частоты, если их выражать через астрономические (эфемеридные) секунды. Физики не

могут дать определенного ответа на поставленный вопрос, который должен быть решен экспериментально. Милн с сотрудниками построили весьма детальную физическую теорию, названную ими кинематической относительностью⁸, в которой есть две естественные шкалы времени, причем одна из них все время ускоряется относительно другой, так что отношение обеих единиц времени непрерывно возрастает; это изменение в настоящую эпоху, по предположению, меньше, чем 1 в 10^9 за год. Дирак, Милн и Иордан, а также и некоторые другие высказывались в том смысле, что одна из этих единиц может быть отождествлена с атомными частотами, а другая — с астрономическими. Если дело обстоит именно так, тогда примерно в течение пяти лет было бы возможно измерить это ускорение и наши прежние представления о неизменности единиц времени должны были бы быть решительно пересмотрены. У нас нет никаких оснований давать предпочтение одной единице над другой, называя какую-либо из них неизменной; следовательно, само слово «неизменный» выйдет из нашего употребления. Очевидно также, если такое ускорение будет обнаружено, то это обстоятельство вызовет глубокие и далеко идущие последствия в основных физических построениях.

АТОМНАЯ ЕДИНИЦА ВРЕМЕНИ

До того как атомные эталоны частоты могут быть использованы с большим успехом, чем астрономические, необходимо определить частоту самого атомного эталона, выразив ее через секунду. Как это уже было упомянуто, эта операция уже была произведена для старой средней солнечной секунды, однако желательно выполнить такое же определение для новой эфемеридной секунды, что, разумеется, потребует некоторого времени. После того как однажды это будет сделано, по всей вероятности, астрономическая секунда будет скоро забыта всеми теми, кто ежедневно работает с атомным эталоном; при этом появится опасность некоторой путаницы, особенно в том случае, если отношение атомных и астрономических единиц будет постоянным или если его изменение будет настолько незначительным, что для его обнаружения понадобится значительный промежуток времени. Такая путаница уже существует до известной степени с единицами длины.

Метр определен как расстояние между двумя отметками на определенном платиновом стержне. Однако некоторые физики пришли к выводу, что более удобно, вместо того чтобы использовать фактически в качестве единицы длины метр, брать за единицу длины длину волны определенной спектральной линии кадмия или ртути. Во многих случаях длины волн можно сравнивать между собой с большей точностью, чем производить сравнение длины волны с метром. Число эталонных длин волн, содержащихся в метре, может быть измерено с определенной степенью точности. Такое определение вполне подходит для временного использования. Однако число длин волн в метре есть величина, определяемая экспериментально и подлежащая пересмотру и уточнению. Но что делать каждый раз после того, как такой пересмотр сделан. Подвергать пересмотру все измерения, в которые как-то входит эталонная длина волны? Совершенно очевидно, что подобная процедура практически неприемлема. Для того чтобы избежать повторной путаницы, необходимо только принять новый эталон длины, скажем ангстрем, который теперь уже будет рассматриваться не как величина, равная 10^{-10} метра, а будет определен определенным и постоянным отношением к эталонной длине волны; число ангстремов в метре будет определено уже экспериментально и может подвергаться пересмотру. Таким образом, если измерения

длины выражены в ангстремах, то это следует понимать, что они отнесены к атомной длине волны, а если они выражены в метрах, то к эталонному метру.

Было бы весьма желательно также поступить и с единицами времени. Мы предлагаем сохранить термин *секунда* за астрономической секундой и вместе с тем принять новую единицу, которую я буду здесь называть «эссен» (*essen*) и которая будет иметь определенное и постоянное отношение к частоте атома цезия, составляя примерно небольшую кратную часть секунды; точное число эссенов в секунде подлежит экспериментальному определению и пересмотру. В этом случае всякая частота, выраженная в периодах в эссен, понимается отнесенной к атомному эталону времени, а частота, выраженная в периодах в секунду, отнесена к астрономической секунде. Различие между атомной единицей времени и астрономической значительно более существенно, чем отличие в линейных эталонах, так как обе единицы времени будут неопределенно долгое время существовать совместно.

СЛЕДСТВИЯ ПРИНЯТИЯ АТОМНОЙ ЕДИНИЦЫ ВРЕМЕНИ

Два важных следствия вытекают из принятия атомной единицы времени, т. е. пользования ею наряду с астрономической секундой. Первое следствие вытекает из того обстоятельства, что атомная единица времени не является независимой от атомной единицы длины в том же самом смысле, в каком метр независим от секунд. Длины волн и частоты связаны определенным физическим соотношением: их произведение равно скорости света. Следовательно, если скорость света будет известна с достаточной степенью точности, то длина волны может быть вычислена по частоте, и наоборот. В действительности, скорость света (выраженная с помощью астрономической секунды) определена с ошибкой, составляющей некоторую часть в 10^4 (номинальные значения недавних определений, вероятная ошибка которых указана как 1 в $3 \cdot 10^5$, пока что не следует принимать во внимание, до разъяснения причин расхождения с предшествующими определениями), и подобную операцию произвести нельзя. Но может случиться, что частота атома цезия (выраженная через астрономическую секунду) будет скомбинирована с длиной волны (выраженной в метрах) с целью получения уточненного значения скорости света.

Обсуждая эту ситуацию, нужно быть предельно внимательными, чтобы не оказаться в замкнутом круге рассуждений. Допустим, что мы приняли атомную единицу времени наряду с атомной единицей длины; спросим себя, в каком смысле (если вообще есть какой-то смысл) произведение длины волны и частоты, выраженное в этих единицах, может рассматриваться как скорость света. Ответ состоит в том, что такое произведение указанных чисел не дает значения скорости света и фактически не имеет никакого физического смысла; оно является просто неким числом, которое уже предопределено, как только приняты атомные единицы длины и времени. Следовательно, говоря, что скорость света составляет столько-то метров в секунду, мы выражаем определенный экспериментальный результат, но сказать, что скорость света составляет столько-то ангстрем в эссен (используя эти слова в указанном мною смысле) просто тавтология.

Хорошо известно, что постоянство скорости света является фундаментальным постулатом общей теории относительности. Но что станет с общей теорией относительности, если обнаружится, что атомное время ускоряется относительно астрономического времени? Без сомнения, мы услы-

шали бы мнение о том, что тем самым общая теория относительности опровергнута; но такое заключение делать вовсе не обязательно. Есть три правомерных способа выражения скорости света: в метрах в секунду, в метрах в эссен и в ангстремах в секунду. Все эти три способа выражения отражают экспериментальные факты. Вопросы, которые здесь возникают, состоят в следующем: а) в каком из трех способов выражения скорости света скорость света переменна, б) к которому из трех способов относится фундаментальный постулат общей теории относительности?

Второе следствие принятия атомной единицы времени вытекает из того факта, что атом, будучи естественным эталоном частоты, и в этом отношении значительно превосходя произвольные эталоны (такие, например, как кристаллы кварца, которые нужно непрерывно сравнивать с естественными эталонами), все же не может быть подвергнут контролю естественных часов. Другими словами, у атомных колебаний нет никакого свойства, которое позволило бы использовать их для определения эпохи, так как это устанавливается прохождением звезды через Гринвичский меридиан. Совершенно справедливо утверждение, что можно построить атомные часы, справедливо то, что они могут быть использованы в качестве вторичных эталонов времени, но выбрать их в качестве основных эталонов не представляется возможным. Они не будут идти неограниченно долго, а будут останавливаться по случайным электродинамическим причинам. Когда они пойдут вновь, то для установления времени, в течение которого они стояли, нет иного способа, кроме сравнения с другими часами, которые тем временем шли без остановки. Единственным способом проверки часов, удаленных на некоторое расстояние друг от друга, является проверка с помощью радиосигналов времени; скорость же распространения этих сигналов переменна. Следовательно, после принятия атомного эталона частоты в обращении будут две единицы времени — одна для частот и вторая для измерения самого времени.

ДОБРОТНОСТЬ Q

Существует величина Q , которую я упоминаю здесь только потому, что ее обычно употребляют (и по большей части неправильно) как меру совершенства часов. Среди наиболее важных правильных применений величины Q находится ее применение в качестве меры добротности резонансного электрического контура. В этом приложении Q есть мера остроты настройки — чем острее настройка, тем выше Q . В этом случае Q равно отношению резонансной частоты к ширине резонансной кривой, взятой в том месте, где амплитуда вынужденных колебаний в цепи отличается от амплитуды колебаний при резонансе на три децибела. В часах с кристаллом кварца использована электрическая цепь, настроенная в резонанс с частотой кристалла. Очевидно, что чем больше Q таких часов, тем более аккуратно часы будут отсчитывать колебания кристалла. В технике, применяемой при работе с атомными эталонами, изменение амплитуды вынужденных колебаний с частотой весьма сходно с картиной, наблюдаемой в резонансном контуре, и поэтому было сочтено удобным определить отношение частоты в максимуме вынужденных колебаний к ширине резонансной кривой, взятой на 3 децибела ниже, в качестве эквивалента Q . Эта величина эффективно определяет одну из характеристик атомного эталона.

Кроме величины Q , имеется еще другая величина δ , называемая логарифмическим декрементом затухания, которая весьма существенна при рассмотрении затухающих колебаний, например таких, как искровой разряд. Эта величина определяет скорость затухания и равна натураль-

ному логарифму отношения амплитуд двух последовательных колебаний. Оказывается, что для неустановившегося разряда через резонансный контур $Q = \pi/\delta$ ($\pi = 3,14159$). Это соотношение позволяет измерять затухание через Q в такой же мере, как и через δ ; большие Q соответствуют малым δ .

Прилагая величину Q к затухающим электрическим колебаниям в качестве меры затухания, мы сделали лишь первый шаг с тем, чтобы применить ее, по аналогии, в качестве меры затухания всякого затухающего колебания, какого бы характера оно ни было, например к колебаниям возбужденного камертона или маятника. Утверждается в виде доказательства превосходства атомных эталонов над маятниковыми и кварцевыми часами, что последние имеют величину Q только порядка 10^6 , тогда как у первых значения величины Q значительно большие; приводятся различные числа между 10^7 и 10^{18} . Из этих чисел 10^{18} примерно соответствует значению Q в молекулярных переходах, тогда как 10^7 представляет собой значение, на которое можно рассчитывать в практических приложениях. Эти совершенно дезориентирующие сравнения внесли значительную путаницу, так как величина Q имеет примерно такое же отношение к добротности часов, какое имеет емкость аккумуляторов к добротности автомобиля; определенная емкость аккумуляторов, очевидно, необходима, но отнюдь недостаточна для высокого качества автомобиля.

То, что величина Q не может быть использована в качестве меры добротности часов, в основном, определяется двумя причинами. Первая причина состоит в том, что в часах естественному затуханию маятника или кристалла кварца противодействует приложенная сила, причем так, чтобы поддерживать колебания с примерно постоянной амплитудой. Следовательно, Q имеет разумный смысл лишь в промежутке между последовательными приложениями внешней силы; эту внешнюю силу мы можем прилагать сколь угодно часто. И именно способ, которым прилагается эта сила, и является наиболее существенным и даже единственным фактором, определяющим добротность маятниковых часов. Второй причиной является то, что амплитуда колебаний не имеет ничего общего с точностью часов при том условии, что изменения амплитуды не влияют на частоту или влияют на частоту вполне определенным способом. Часы, основанные на вращении Земли, например, по предположению, замедляются за счет приливного трения; соответствующее значение Q имеет порядок 10^{13} , а изменение частоты 1 в $5,3 \cdot 10^9$ в год. Такое замедление при условии, что оно известно и на него сделана поправка, ни в малейшей степени не умаляет совершенства часов. Гораздо неприятнее непредвиденные изменения частоты, приводящие к переопределению секунды через величину тропического года.

Все, что уместно сказать о величине Q в связи с эталонами времени и частоты, а также в связи с емкостью аккумулятора в автомобиле, так это то, что они не должны быть слишком малыми, чтобы не создавать существенных ограничений в качествах этих конструкций.

УГЛЕРОДНЫЕ ЧАСЫ

Для полноты изложения следует упомянуть совершенно особый способ измерения времени, не похожий на все то, о чем рассказывалось до сих пор: измерение времени, основанное на радиоактивном распаде изотопов различных элементов. В последние годы с этой целью усиленно изучался изотоп углерода: содержание изотопа в некоторый момент времени, отнесенное к содержанию в начальный момент времени, является мерой времени, прошедшего с момента начала распада. Принципиальным использованием этой меры является определение возраста окамене-

лостей и геологических отложений. Не очень существенно, что изотоп углерода не является фактически часами в том определении, которое мы дали раньше. Повторяющимся явлением, которое отсчитывается, в данном случае служит распад атомов изотопа. Правильно, что распадающиеся атомы можно подсчитывать только статистически, а не по отдельности, но это в принципе не является недостатком, хотя это обстоятельство резко ограничивает точность определения. Если техника будет развита настолько, чтобы отсчитывать отдельные распады в тот момент, когда они происходят, эти часы могут стать совершенно точными. Изотоп углерода тоже является естественными часами. Эпоху, которую они устанавливают, есть эпоха начала распада (или закладки) углерода. Однако углерод не подходит в качестве основного эталона, поскольку он не дает однозначности; существует столько же эпох, сколько было закладок углерода.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭТАЛОНАМ ВРЕМЕНИ

Теперь мы можем заново сформулировать требования, предъявляемые к приемлемым эталонам времени. Мы уже убедились в том, что нет никакой необходимости требовать неизменности эталонов, потому что, как это было пояснено раньше, нет никаких способов установления того, меняется единица времени или нет. Вместо неизменности мы должны потребовать, чтобы для двух приемлемых эталонов ускорение одного из них относительно другого было постоянным (в частности, равнялось нулю). Итак, приемлемый эталон времени должен действовать непрерывно, должен быть доступен, должен иметь постоянное ускорение по отношению к другому приемлемому эталону, должен быть основан на единице, не слишком большой и не слишком маленькой, и должен устанавливать эпоху однозначно. Из двух приемлемых эталонов времени, имеющих взаимное ускорение, в качестве основного принимается тот, который не приводит к противоречию между наблюдениями и физическими теориями. Если бы оказалось, например, что атомная мера времени согласуется с квантовой механикой, тогда как астрономическая мера согласуется с общей теорией относительности, причем эти меры ускоряются одна относительно другой, это было бы весьма грустно, по крайней мере для одной из этих теорий; тогда пришлось бы устранять противоречия в этих теориях, прежде чем можно было бы решить, которая из этих двух мер, если вообще какая-нибудь из них, является основной.

Требования, предъявляемые к приемлемому эталону частоты и к фундаментальному эталону частоты, те же, что и для эталона времени, за тем лишь исключением, что эталон частоты не обязан устанавливать однозначно эпоху. Требование непрерывности действия тоже может быть несколько смягчено; эталон частоты должен непрерывно действовать только в течение промежутка времени, который необходимо измерять.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. J. Eckert, D. Brower, G. M. Clemens, *Astron. Papers Amer. Ephemeris*, т. 12 (Government Printing Office, Washington, D. C., 1951).
2. D. Brower, *Astron. J.* **57**, 125 (1952).
3. *Trans. Intern. Astron. Union* (в печати).
4. W. Markowitz, *Astron. J.* **59**, 69 (1954).
5. G. M. Clemence, *Am. Scientist* **40**, 260 (1952).
6. A. Danjon, *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* **227**, 320 (1948).
7. L. Essen and J. V. L. Perry, *Nature* **176**, 280 (1955).
8. E. A. Milne, *Kinematic Relativity; a Sequel to Relativity, Gravitation and World Structure* (Clarendon Press, Oxford, 1948).