

Ф.С.Завельский ВРЕМЯ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

Ф.С.Завельский

ВРЕМЯ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ



Ф. С. Завельский

ВРЕМЯ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

*от биллионных долей секунды
до миллиардов лет*

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1987



ББК 22.3
3-13
УДК 53(023)

Рецензент
доктор физико-математических наук *В. С. Летохов*

Завельский Ф. С.

3-13 **Время и его измерение.** — 5-е изд., испр. — М.:
Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 256 с., ил.

Дано описание процессов, происходящих в обыденном мире, а также в атомах, атомных ядрах, планетах, звездах и галактиках. Рассказано о длительности этих процессов. Показано, как видоизменялись и совершенствовались понятия о времени и методы его измерения и к каким фундаментальным достижениям это привело. В новом издании исправлены опечатки и погрешности предыдущего.

Для учащихся и преподавателей средней школы и всех интересующихся современным естествознанием.

3 $\frac{1704000000-125}{053(02)-87}$ 112-87

ББК 22.3

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической литературы,
1977, с изменениями, 1987

Предисловие к четвертому изданию

В этой книге описаны некоторые процессы, происходящие в обыденном мире, а также в атомах, атомных ядрах, планетах, звездах и галактиках, рассказано о длительности этих процессов, в одних случаях равной лишь миллионным долям миллиардной доли секунды, а в других — сотням миллионов и миллиардам лет. Таким образом, сделан «разрез» Мира по одной из основных его координат, а именно по времени. Такой подход позволил показать, как постепенно видоизменялось и совершенствовалось понятие о времени и методы его измерения и к каким фундаментальным достижениям это привело.

В книге рассказано об углублении и смене научных идей, о переплетении прогресса научного и технического и их взаимном стимулировании. В ней сообщается о ряде научных фактов, рассказывается о том, на какой основе, какими методами и как они были добыты, а это, хотя бы в некоторой мере, позволяет понять дух науки и ее развитие.

Поскольку изложение ведется в последовательности: эксперимент — результат — вывод — оценка вывода, то читателям предоставляется возможность не только ознакомиться с некоторой картиной мира, но и составить свое собственное мнение о ее величии и достоверности. Со времени выхода третьего издания книги в этой бурно развивающейся области знания появилось несколько глубоких, интересных

и важных работ. Некоторые научные разработки, относительно кратко описанные нами ранее, за протекшие пять лет получили дальнейшее плодотворное развитие. Были углублены и усовершенствованы методы абсолютной ядерной геохронологии, расширены их возможности и области применения. Достигнуты новые успехи в определении возраста Вселенной, при этом усовершенствованы известные методы и разработаны новые, а сопоставление их между собой значительно повысило достоверность соответствующих выводов и т. д. Все это нашло отражение в настоящем издании книги.

Автор приносит благодарность читателям, написавшим отзывы на предыдущие издания этой книги, и будет признателен тем, кто выскажет свои критические замечания об этом новом ее издании.

Каждый интеллигентный человек, даже неспециалист, может глубоко проникнуть в современные физические проблемы.

Альберт Эйнштейн

Если вы можете измерять и выражать в числах то, о чем говорите, то об этом предмете вы кое-что знаете; если же вы не можете сделать этого, то ваши познания скудны и неудовлетворительны. Быть может, они и представляют первый шаг исследования, но едва ли позволительно думать, что ваша мысль продвинулась до степени настоящего знания.

Лорд Кельвин

Из предисловия к третьему изданию

Для того чтобы понять, как добываются научные знания, и оценить степень их достоверности, нужно знать, как велись измерения. Ведь все наши научные знания проистекают из правильно понятых опытов и наблюдений, и, таким образом, в основе научных обобщений лежат измерения.

От глубокой древности до наших дней в борьбе за овладение природой человек решает разные задачи, в том числе находит способы измерения времени: сначала очень грубые, потом все более тонкие.

Проходят века. Все шире становится кругозор человека. Изучая Землю, ее движение и окружающие ее звезды, человек изобретает столь тонкие методы и приборы для измерения времени, что удается подметить движение материков и измерить неравномерность вращения Земли, составляющую лишь тысячные доли секунды в столетие.

Постепенно проникая в область микромира — молекул, атомов, элементарных частиц, сталкиваясь здесь с особыми масштабами времени в тысячные, миллионные, миллиардные и даже биллионные доли секунды, человек находит способы их измерить.

Обратившись к изучению прошлого органической жизни, человек находит в земле остатки древней жизни и восстанавливает историю событий, происходивших многие тысячелетия назад. При этом датировка событий играет важную роль и человек находит способы ее определения.

Исследуя недра Земли, разрабатывая способы поисков полезных ископаемых, человек убеждается в том, что важно знать возраст горных пород. Для этого требуется измерение промежутков времени в миллионы и сотни миллионов лет,

и ни один из старых методов не оказывается пригодным для определения столь больших интервалов времени. Тогда человек изобретает новые методы, которые позволяют определять возраст горных пород, равный сотням миллионов и даже миллиардам лет.

Изучая небесные тела — Солнце, звезды, звездные скопления, человек обнаруживает, что они меняются. Изучая историю их развития, человек сталкивается с грандиозными отрезками времени в миллионы и миллиарды лет и разрабатывает способы, позволяющие их измерить.

В научных лабораториях, производственных цехах, сельскохозяйственных предприятиях и медицинских клиниках, сталкиваясь с процессами, которые в естественных условиях протекают чересчур медленно или слишком быстро, что затрудняет их изучение, человек придумывает способ «управления временем», изменяя скорость наблюдения явлений.

В книге рассказывается, для чего создавались различные способы измерения времени и в чем они состоят, а также о некоторых фундаментальных результатах, которые были получены с их помощью.

Время и календарь

Римские полководцы всегда побеждали, но они никогда не знали, в какой день это случилось.

Вольтер

Счет дней в году

Система отсчета длительных промежутков времени, в которой установлен определенный порядок для отсчета дней в году и указана эпоха, от которой ведется счет лет, называется *календарем*.

Если бы между длительностью суток и длительностью года, т. е. временем обращения Земли вокруг своей оси и временем ее обращения вокруг Солнца, существовало какое-либо простое отношение, то счет дней в году не представлял бы большого труда. То же самое справедливо и в отношении счета дней в лунном месяце. Однако наша солнечная система сформировалась так, что в настоящее время с погрешностью до 0,1 секунды длительность года составляет 365 суток 5 часов 48 минут 46,1 секунды, или 365,2422 дня, а длительность лунного месяца — 29,5306 дня. Сопоставляя эти числа, нетрудно увидеть, что отношения длительности года и лунного месяца к длительности суток не выражаются никакими точными числами, ни целыми, ни дробными. Именно поэтому разработать простую и удобную системы счета дней в месяце и году оказалось совсем не легко. Это видно хотя бы из того, что от древних времен до наших дней были придуманы сотни таких систем и ни одна из них (в том числе и та, которой мы пользуемся в настоящее время) не считается достаточно хорошей.

В дело разработки и установления хорошего календаря внесли свой вклад различные народы. На увлекательном поприще составления и введения хорошего календаря пробовали свои силы ученые и философы, поэты и правители. При этом нередко перемешивались соображения научные, политические и религиозные, что можно увидеть по названиям месяцев и дней и в том календаре, которым мы пользу-

емся. В наше время вопрос о хорошем календаре поднят на высоту международного форума и ... пока еще не решен.

История календарей началась давно. Если обратиться к глубокой древности, то можно установить, что у дикарей никакого календаря не существовало. Это, между прочим, подтверждается наблюдениями над некоторыми современными племенами, еще не вышедшими из состояния дикости. Так, в кустарниковых зарослях Центральной Австралии, в тропических лесах Индонезии и Южной Америки и в настоящее время живут люди, не знающие ни земледелия, ни глиняной посуды и не имеющие понятия о регулярном счете времени.

Только при усложнении общественной жизни, в связи с развитием земледелия, скотоводства, мореплавания, появляется более или менее регулярный счет времени. Сначала требования к счету времени и методы его измерения были довольно грубыми. Славяне и другие земледельческие народы устанавливали продолжительность года как промежуток от одной жатвы до другой. Индейцы Америки отмеряли год по появлению снега, австралийцы — по наступлению периода дождей и т. д.

Развитие оросительного земледелия, возникновение государств, рост городов и расширение торговых связей потребовали улучшения и уточнения счета времени. На этом этапе развития цивилизации у некоторых народов появляются лунные календари.

По-видимому, впервые лунный календарь был введен около 4000 лет назад в Древнем Вавилоне. В этом календаре продолжительность месяцев исчислялась от одного новолуния до другого, и считалось, что они содержат попеременно то 29, то 30 дней. Таким образом, средняя продолжительность вавилонского календарного месяца равняется 29,5 дня, между тем как более точный лунный месяц составляет 29,5306 дня. Вавилонский календарный год состоит из 12 месяцев, т. е. 354 дней, в то время как на самом деле год содержит 365,2422 дня.

Для устранения этого расхождения жрецы Древнего Вавилона, ведавшие календарем, в каждые три года из восьми добавляли по одному месяцу. Эта поправка значительно улучшает совпадение календарных дат с временем наступления новолуния, периодом разлива рек и пр., но все же является недостаточно точной, так как остается неисправленным расхождение более чем на $\frac{1}{8}$ суток в год.

У древних евреев первоначально был лунный календарь. В IV веке до н. э. они перешли на лунно-солнечный кален-

дарь, в котором обычный или простой год разделен на 12 месяцев. При этом четные месяцы состоят из 29 дней, а нечетные — из 30. Таким образом, простой год содержит 354 дня. Семь раз в каждые 19 лет в год вставляется дополнительный тринадцатый месяц, содержащий 30 дней, и такой год называется удлиненным. Удлиненными считаются каждый 3, 6, 8, 11, 14, 17 и 19-й годы.

Однако 19 солнечных лет содержат $6939\frac{3}{4}$ суток, а 19 лунно-солнечных еврейских календарных лет составляют лишь 6936 суток. Поэтому каждые 19 лет накапливается расхождение календаря с астрономическим годом в $3\frac{3}{4}$ суток. Это обстоятельство древним евреям было известно. Поэтому в этом календаре в те годы, начало которых приходится на воскресенье, среду и пятницу, вставлено по одному добавочному дню. Легко видеть, что такая поправка оказывается избыточной. Поэтому для дальнейшего уточнения календаря в определенные годы вводится еще одна поправка, сдвигающая начало года на один день назад.

Таким образом, еврейский лунно-солнечный календарь имеет несколько сложную систему поправок, но зато довольно хорошо согласуется с солнечным циклом.

В Древнем Египте уже в пятом тысячелетии до нашего летосчисления отказались от лунного календаря. Для всей хозяйственной жизни Египта огромное значение имеют разливы реки Нила. Знание времени начала разлива Нила очень важно, так как позволяет вовремя подготовиться к сельскохозяйственным работам. В течение двух месяцев звезда Сириус (по-египетски Сотис), восходя одновременно с Солнцем, остается невидимой, так как ее свет теряется в солнечных лучах. В начале июля Сириус восходит немного раньше Солнца и ее можно в течение нескольких минут наблюдать на востоке, пока не появится Солнце. Эта дата совпадает с началом разлива Нила.

Совпадение во времени начала разлива Нила и первого появления на востоке звезды Сириус-Сотис египетские жрецы окружили всевозможными легендами («Сотис великая блистает на небе, и Нил выходит из источников своих»). Календарь, которым они ведали, был согласован с видимым движением звезды Сириус-Сотис.

В этом календаре год состоял из 12 месяцев, по 30 дней в каждом. В конце года добавлялось еще пять дней. Таким образом, год состоял из 365 дней. Такой счет времени давал ошибку приблизительно в 0,25 дня в год или 1 день в 4 года, или $(4 \cdot 365 = 1460)$ 1 год за 1460 лет, так что все календарные праздники, постепенно сдвигаясь, полностью обо-

дили год за 1460 лет. Это расхождение было известно древним египтянам, но жрецы, ведавшие календарем, из соображений культа сохраняли такой «блуждающий» год и препятствовали его исправлению.

Впрочем, по крайней мере дважды в Древнем Египте делались попытки исправить календарь. В XVII веке до н. э. Египет был завоеван азиатским племенем гиксосов. У гиксосов был календарь, в котором год состоял из 12 лунных месяцев и имел продолжительность в 354 или 355 дней. Таким образом, в общем он был хуже египетского. Однако в одном отношении календарь гиксосов имел важное преимущество перед египетским: в нем имелась система периодических исправлений, позволявшая поддерживать его соответствие с солнечным циклом. Преобразование обоих календарей, которое объединило бы достоинства каждого из них: 365-дневный год египтян с добавкой одного дня раз в четыре года, казалось, напрашивалось само собой.

Гиксосский царь Салитис, как это упоминается у Платона, предпринял реформу календаря. С помощью соответствующей добавки 365-дневный год древних египтян был приведен в более точное соответствие с солнечным циклом. Однако реформа календаря не удержалась. После победы национального египетского восстания, свергнувшего власть гиксосов, исправленный календарь был отменен.

Вторая попытка реформы календаря в Древнем Египте была сделана спустя много веков царем Эвергетом. Сохранилась надпись на плите, найденной в одном из храмов, датированная 7 марта 238 г. до н. э., в которой написано:

«Так как звезда (Сотис) за каждые четыре года уходит на один день вперед, то, чтобы праздники, празднуемые летом, не пришлись бы на будущее время на зиму, как это бывает и как будет, если год будет и впредь состоять из 360 и пяти добавочных дней, отныне предписывается через каждые четыре года праздновать праздник богов Эвергета после пяти добавочных дней перед новым годом, чтобы каждый знал, что прежние недостатки в исчислении времен года отныне верно исправлены царем Эвергетом».

После смерти царя Эвергета и эта реформа календаря не удержалась.

В древнем Китае сначала пользовались лунным календарем, а затем перешли на лунно-солнечный. В VI веке до н. э. древние китайские астрономы установили, что через каждые 19 солнечных лет новолуние совпадает с летним солнцестоянием и при этом в 19 солнечных годах содержится 235 лунных месяцев. В соответствии с этим в лунно-солнеч-

ном древнекитайском календаре в течение каждого 19-летнего периода 5 лет имеют по 12, а 7 лет — по 13 месяцев.

В Древней Греции сначала тоже был лунный календарь, в котором год попеременно состоял то из 12, то из 13 месяцев. При этом чередование обычных и удлиненных лет производилось всякий раз по специальному решению правителей каждого города. Естественно, что это приводило к большому разнобою, так как нередко оказывалось, что в соседних городах на один и тот же день приходятся разные календарные даты. В 593 г. до н. э. правитель Афин Солон ввел календарь вавилонского типа с восьмилетним периодом, в котором было 5 обычных лет по 12 месяцев и 3 удлиненных года по 13 месяцев.

В 432 г. до н. э. греческий астроном Метон еще раз, независимо от китайцев, открыл, что в 19 солнечных годах содержится 235 лунных месяцев и, таким образом, через этот период времени различные фазы Луны снова приходятся на те же дни солнечного года. Это открытие древние греки сочли столь важным, что цикл Метона был записан золотыми буквами на мраморных досках, выставленных на городских площадях. С введением в счет дней поправок в соответствии с 19-летним циклом Метона лунно-солнечный календарь древних греков стал значительно лучше соответствовать времени наступления различных периодически повторяющихся событий: смен фаз Луны, сезонов года и т. д.

Мусульманский календарь построен только на изменениях фаз Луны и, таким образом, является чисто лунным. Этот календарь был введен в VII веке н. э. в ряде мусульманских стран. Во многих странах Ближнего и Среднего Востока, в которых господствующей религией является ислам, этот календарь применяется и в настоящее время.

Мусульманский календарный год состоит из 12 лунных месяцев, шесть из которых содержат 29 и шесть — 30 дней. Кроме того, в мусульманские високосные годы к последнему месяцу года добавляется еще 1 день. Таким образом, мусульманский календарный год содержит 354 или 355 дней и оказывается короче солнечного года на $11\frac{1}{4}$ или $10\frac{1}{4}$ дней. За 32 мусульманских календарных года расхождение этого календаря с солнечным достигает почти одного мусульманского календарного года.

В одних мусульманских странах для введения високосных лет принят 8-летний, так называемый турецкий цикл, в других — 30-летний, или арабский, цикл. Так, например, по арабскому циклу високосными годами считаются: 2, 5,

7, 10, 13, 16, 18, 21, 24, 26 и 29-й годы каждого тридцатилетия.

Легко видеть, что при такой системе счета дней в течение 32 лет все календарные даты и дни праздников приходятся на различные месяцы солнечного календаря и блуждают по разным сезонам года.

В Древнем Риме сначала тоже пользовались лунным календарем, в котором год состоял из 10 месяцев по 29 и 30 дней каждый и содержал 304 дня. Затем был введен лунный календарь, в котором год состоял из 12 месяцев и содержал 355 дней. Столкнувшись с тем, что один и те же календарные даты приходятся то на одно, то на другое время года, римляне в начале VI века до н. э. ввели в свой календарь исправления, превратив его в лунно-солнечный. При этом на протяжении периода, состоящего из 4 лет, два календарных года остались обычными, а два были сделаны удлиненными, содержащими добавочный месяц в 22 или 23 дня. По сравнению с солнечным годом эта поправка оказалась избыточной и календарный год стал длиннее солнечного на одни сутки. Поэтому потребовались дальнейшие поправки, которые было поручено делать жрецам по мере надобности.

Однако жрецы, отчасти по небрежности, отчасти из корыстных соображений, делали это плохо. Ведь с различными календарными датами были связаны такие события, как окончание и начало срока правления должностных лиц. Удлиняя или укорачивая месяц, жрецы могли эти события приблизить или отдалить. В Древнем Риме проценты по долгам полагалось платить первого числа каждого месяца. Владея календарем, жрецы и это, тяжкое для многих, событие могли при желании отодвинуть. Кстати, само слово «календарь» происходит от латинских слов *calendarium* (долговая книга) и *calendae* (первый день месяца).

Постепенно жрецы так основательно запутали счет дней в году, что это стало мешать нормальной жизни. В I веке до н. э. император Юлий Цезарь приказал упорядочить календарь. По предложению египетского астронома Созигена в 46 г. до н. э. в Древнем Риме был принят новый солнечный календарь. Этот календарь получил название юлианского; счет дней по юлианскому календарю называют *старым стилем*.

В солнечном календаре за основу отсчета времени берется длительность одного оборота Земли вокруг Солнца. При этом для определенности отсчет времени ведется от одного до другого последовательного прохождения центра Солнца

через точку весеннего равноденствия. Отсчитываемый таким образом промежуток времени называется *тропическим годом*. Как мы уже указывали ранее, с погрешностью до 0,1 секунды его длительность равняется 365,2422 дня.

Между тем в календаре, узаконенном Юлием Цезарем в I веке до н. э., или так называемом *юлианском календаре*, длительность года округленно была принята равной 365,25 суток. При этом для ровного счета три года считались содержащими по 365 дней, а каждый четвертый — 366 дней. С этой поправкой длина года по юлианскому календарю в среднем оказывается на 11 минут 14 секунд больше длины тропического года, что составляет сутки за 128 лет и три дня за 384 года, или, грубо, три дня за 400 лет. В 325 г. нашей эры на Никейском церковном соборе система счета юлианского календаря была сохранена и утверждена в качестве христианского календаря.

В тот год весеннее равноденствие наступило 21 марта, и Никейский собор постановил, что праздник пасхи должен праздноваться в первое воскресенье после первого весеннего полнолуния.

В первые десятилетия и даже в первое столетие после этого постановления с днем празднования пасхи все обстояло благополучно. Однако в дальнейшем начались неприятности. С течением столетий неучтенное расхождение длительности календарного и реального года (1 сутки за 128 лет) постепенно накапливалось и действительное начало весны (равенство дня с ночью) стало все больше расходиться с календарным. В XIV веке это расхождение уже превысило 7 дней, и ученые того времени неоднократно поднимали вопрос об исправлении календаря. Однако решение этого вопроса все откладывалось, ведь все календарные даты среди прочего указывают и дни религиозных праздников, а у различных церквей (католической, православной) по этому поводу были различные мнения.

В XIV веке за исправление календаря высказался папа римский Климент VI. В конце XV века папа Сикст VI начал подготовку реформы календаря и, что для церкви было самым важным, исправление пасхальной, т. е. уточнение дат празднования пасхи. В XVI веке реформу календаря обсуждали два «вселенских» собора: Латеранский и Тридентский. Наконец, в 1582 г. папа Григорий XIII утвердил проект реформы календаря, предложенный Луиджи Лиллио, и издал буллу, согласно которой предписывалось день, следующий после четверга 4 октября 1582 г., считать пятницей 15 октября того же года. Таким образом, счет дней был

передвинут на 10 дней вперед и исправлено уже накопившееся расхождение. Кроме того, предписывалось считать високосными не 100 из 400 лет, как это было принято в юлианском календаре, а лишь 97 из 400. При этом расхождение календаря с временами года и моментами равноденствий соответственно снижается. В юлианском календаре оно составляет 0,00780 суток в год или 1 сутки за 128 лет, а в григорианском — лишь 0,00030 суток в год или сутки за 3280 лет. Невисокосными, простыми, в григорианском календаре считаются все годы столетий (например, 1700, 1800, 1900), за исключением тех, у которых число по отнятии двух нулей делится на четыре без остатка (например, 1600, 2000). Счет дней по григорианскому календарю часто называют *новым стилем*.

Есть еще целый ряд других систем счета времени. Одна из них, несомненно, представляет большой интерес. Между тем современным ученым удалось узнать о ней сравнительно недавно. Произошло это так: в середине прошлого века в Центральной Америке были обнаружены какие-то руины, камни с надписями, странные постройки. В 30-е годы нашего века археологи подробно их изучили и извлекли из трясины забвения остатки некогда трагически погибшей культуры древних майя. Древние индейцы племени майя жили в Центральной Америке на полуострове Юкатан. По данным археологов самые ранние сведения о них относятся к тысячиому году до н. э. В середине XV века н. э. майя потерпели сокрушительное поражение в войне со своими соседями и были покорены. Некогда сильный народ распался на отдельные слабые племена, а развалины их когда-то великолепных городов и храмов скрыли джунгли.

Когда археологи разобрались в своих находках, то стало ясно, что этот удивительный народ *обожествлял время*. Каждая возводимая ими постройка связывалась с определенной датой или каким-то астрономическим явлением. Здания строились лишь через определенные промежутки времени, например, в 5, 10, 20 лет. В прикладном искусстве древних майя все изображения, в том числе людей и животных, тоже были связаны с вполне определенными датами. Все, что они строили, исполняло не только свое непосредственное назначение жилья или храма, но одновременно было еще календарем из камня.

Астрономы древних майя определили продолжительность солнечного года в 365,2420 дня, что лишь на 0,0002 дня меньше принятого в настоящее время значения тропического года и соответствует расхождению в 1 сутки за 5000 лет.

Таким образом, их календарь был в 1200 раз (!) точнее древнеегипетского, в 40 раз точнее юлианского и в 1,5 раза точнее григорианского календаря, которым мы пользуемся в настоящее время.

Отсчет лет при исчислении больших промежутков времени древние майя производили в двадцатеричной системе, т. е. периодами в 20 лет, например: $20^1=20$; $20^2=400$; $20^3=8000$ лет и т. д.

Древние майя одновременно применяли несколько календарей с разной продолжительностью года: длинный, в 365 дней, использовался в быту; короткий, в 360 дней, применялся для культовых целей. Кроме того, для некоторых ритуалов служил календарь с 260-дневным годом. Пересчеты от одного календаря к другому они умели делать с хорошей точностью. Связь между лунными и солнечными циклами (т. е. то, что в 19 солнечных годах содержится 235 лунных месяцев) древним майя также была известна. Таким образом, это открытие различными народами делалось по крайней мере трижды и совершенно независимо: в VI веке до н. э. — древними китайскими астрономами, в V веке до н. э. — Метоном в Греции, а несколько столетий спустя — древними майя.

Эта культура угасла в середине XV века н. э., а их завоеватели постарались, чтобы потомки древних майя забыли о своем прошлом. В XVI веке Юкатан завоевали испанцы. Они искали и уничтожали памятники древней культуры, сжигали древние рукописи. Ведь угнетатели всегда боятся угнетаемых и поэтому стараются украсть у них прошлое, чтобы лишить надежды на будущее. Однако под покровом джунглей часть памятников древних майя уцелела и рассказала кое-что о жизни своих создателей.

Большой интерес представляет история календаря в России. Древние славяне пользовались лунным календарем. В конце X века н. э. Древняя Русь приняла христианство и в ней в обиход вошел применявшийся в Риме и Византии юлианский календарь, основанный на солнечном годе, с делением на 12 месяцев и семидневные недели.

В конце XVI века во многих христианских странах был введен григорианский календарь. Однако Россия от этого уклонилась. В царской России введение нового стиля задержалось в связи с тем, что православная церковь опасалась могущего при этом произойти «повреждения пасхалий» — совпадения дня празднования христианской пасхи с еврейской, и новый стиль был введен только после Октябрьской революции. В декрете от 25 января 1918 г., под-

писанном В. И. Лениным, говорилось: «В целях установления в России одинакового почти со всеми культурными народами исчисления времени Совет народных комиссаров постановляет ввести по истечении января месяца сего года в гражданский обиход новый календарь». Согласно этому декрету предписывалось день, следующий после 31 января 1918 г., считать днем 14 февраля того же года. Таким образом, накопившееся к этому времени расхождение в 13 дней было исправлено.

Между 1929 и 1940 годами в Советском Союзе календарная реформа проводилась трижды. В 1930 г. декретом правительства СССР в стране был осуществлен переход на непрерывную производственную неделю, состоящую из четырех рабочих дней и одного дня отдыха. Предприятия работали непрерывно, а рабочие и служащие, распределенные по пяти группам, попеременно отдыхали. С 1 декабря 1931 г. в СССР пятидневная неделя была заменена шестидневной так, что все рабочие и служащие отдыхали в одни и те же дни. 26 июня 1940 г. указом Президиума Верховного Совета СССР в Советском Союзе семидневная неделя была восстановлена *).

Ныне в Советском Союзе, как и в большинстве стран, применяется григорианский календарь. Из сказанного ранее можно заключить, что это календарь более или менее удовлетворительный, однако не единственный и не лучший.

Каким должен быть всемирный календарь

Наш современный мир заслуженно хвалят за усовершенствование информации. Телефонные провода опоясали весь земной шар. Радиосвязь охватывает все страны мира. Телевидение, благодаря спутникам связи, образовало всемирную сеть, так что парад на Красной площади Москвы, матч по боксу на первенство мира в Нью-Йорке или первые шаги человека на Луне можно слышать и видеть в любой стране мира. Усовершенствование средств связи дает возможность легко и быстро узнавать о всех событиях, происходящих не только в своей стране, но и в любой другой. Экономические и культурные связи между народами стали тесными, как никогда. Между тем до сих пор разные страны пользуются различными календарями, и это немало затрудняет их об-

*) Селешников С. И. История календаря и хронология.— М.: Наука, 1970.— С. 163.

щенные. Таким образом, введение всемирного календаря вполне назрело. Разумеется, при этом календарь целесообразно улучшить, а его введение нужно произвести с согласия всех заинтересованных стран.

Вопрос об улучшении календаря поднимался неоднократно и достаточно давно. В 1834 г. Марко Мastroфинни предложил календарь, в котором год состоит из 364 дней, составляющих 52 семидневные недели, а в конце декабря имеется еще один «пустой», или «вненедельный», день. В високосный год еще один такой «пустой» день вставляется в конце июня. Легко видеть, что такая система времени обеспечивает «вечность» календаря, т. е. его неизменность для всех лет.

В 1849 г. Огюст Коит предложил 13-месячный вечный календарь. В этом календаре каждый месяц содержит 28 дней, или четыре полные семидневные недели. Таким образом, всем числам месяцев всегда соответствуют одни и те же дни недели. Так как такой календарный год содержит 364 дня, то периодически вводятся добавочные вненедельные праздничные дни. Преимущества такого календаря заключаются в том, что в нем месяцы имеют одинаковую продолжительность, а недели оказываются нерасщепленными по месяцам. Существенным его недостатком является отсутствие возможности деления года на равные полугодия и кварталы.

В 1888 г. Гюстав Армелин опубликовал «Реформу календаря», в которой предложил разделить год на 12 месяцев с четырьмя равными кварталами по 91 дню в каждом. При этом в каждом квартале оказывается 13 полных семидневных недель и, следовательно, первый день года, каждый квартал и первые числа месяцев всегда начинаются с одного и того же дня недели. Для согласования этого календаря с тропическим годом вводятся «пустые», «вненедельные» дни. Этот проект был удостоен первой премии Французского астрономического общества, однако принят не был.

Один из вариантов вечного календаря был придуман около 2000 лет назад, однако современным ученым об этом стало известно совсем недавно.

Произошло это так. В 1945 г. мальчишка пастух гнал стадо коз вблизи от Кумран. Это место расположено в двух километрах западнее Мертвого моря и в тринадцати километрах южнее города Иерихона. Пастух потерял одну из коз. Пошел разыскивать ее. Набрел на пещеру. Стал бросать в нее камни и при этом услышал глухой звук разбиваемого

глиняного сосуда. Тогда он спустился в пещеру и увидел ряд сосудов. Он стал разбивать их палкой, ища сокровища. В одном из сосудов оказались кожаные свитки.

Так было разбужено далекое прошлое.

«Для рассматриваемого периода истории Иудеи (II век до н. э.— I век н. э.) характерно интенсивное духовное творчество и развитие религиозной литературы. К началу II века до н. э. в основном завершилась литературная история подавляющего большинства ветхозаветных книг» *).

В середине I века до н. э. Римская империя завоевала Иудею и затем с чрезвычайной жестокостью подавила несколько национальных восстаний. Именно в это время жители Кумранской общины и прилегающих мест, ожидая гибели или изгнания, спешно прятали рукописи своих книг в потаенные пещеры. В этих пещерах они и пролежали около 2000 лет, вплоть до случайной находки пастуха.

В 1947 г. бедуины привезли эти свитки в Вифлеем, и их купил настоятель монастыря св. Марка митрополит Афанасий. Не зная древнееврейского языка, на котором они были написаны, митрополит обратился к специалистам.

Их мнения разошлись: одни утверждали, что эти рукописи подлинные и написаны за несколько сот лет до начала нашей эры, другие сочли их фальсификацией. За то, что это фальсификация, было несколько вполне веских соображений. Например, считалось, что Библия сложилась намного позже тех событий, которые в ней описаны; что Библия насчитывает только 10—15 веков и отражает не столько факты и вероучения библейского времени, сколько всяческие позднейшие суждения и дополнения.

Как будто все это подтверждалось тем, что древнейшая еврейская рукописная Библия — кодекс Петрополитанус, хранящаяся в Ленинграде (СССР), датируется 916 г. *после рождения Христа*, а полная рукопись Ветхого завета синагоги в Алеппо (Сирия) датируется *X веком нашей эры*. Таким образом, все эти списки много моложе тех событий, которые в них описаны.

Можно ли было поверить в то, что все это совсем не так и что этим, неизвестно откуда появившимся свиткам, этим обрывкам полусгнившей кожи более 2000 лет? Ведь до сих пор древних рукописей в Иудее еще не паходили. Считалось, что в жирной почве Иудеи и в жарком ее климате предметы древности не могут сохраняться так долго. К тому же

*) *Амусин И. Д.* Рукописи Мертвого моря.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.

подозрительным было и то, что содержание тех кумранских списков, которые удалось купить и прочесть, уж слишком хорошо сошлось с тем, что уже было давно известно по имеющимся спискам Библии.

Однако сомнительной была и возможность подделки: слишком уж большими знаниями и умением нужно было для этого обладать. Ведь даже *палеографический анализ*, т. е. сравнение способа написания букв в найденных списках со способом написания их в древнейших еврейских текстах из Египта, подтверждал, что Кумранским рукописям около двадцати веков.

Решающие аргументы за или против древности этих списков могло бы дать изучение мест и способа их хранения, но продавцы эти места скрывали. Между тем сами продавцы рукописей доверия не внушали.

Когда удалось приобрести и прочесть еще несколько свитков, то многим стала ясной их важность и сенсационность. В самом деле, если только эти свитки не подделка, то Библия написана за сотни лет до рождения Христа в небольшой еврейской секте, отколовшейся от Иерусалимского храма. Причем до рождения Христа написан не только Ветхий завет, содержащий описание военных столкновений, хозяйственных дел и религиозных взглядов нескольких еврейских племен, но также и Новый завет, в котором говорится о поступках, взглядах и высказываниях Христа и апостолов.

«Ужас охватил христианских теологов. На протяжении девятнадцати веков сначала апостолы, в частности Павел, а затем и отцы и учителя церкви проповедовали единственность и исключительность Христианства, а теперь это может оказаться благочестивым, но совершенно несостоятельным заблуждением. Неужели из-за этих свитков все учение, вся догма Христианства будет обесценена и окажется всего лишь выросшим до гигантских размеров наследием анонимной еврейской секты?» *).

Так представлялись события писателю и журналисту Г. А. Штолю. Как это свойственно человеку его профессии, он чутко уловил и ярко выразил мнение довольно многих людей, просто и искренне исповедующих Христианство, а также опекающих их религиозных деятелей.

Ученые, как известно, имеют свое мнение и заботятся о выяснении не приоритета, а истины. Поэтому в данном случае им важно было узнать, какова связь и последователь-

*) Штоль Г. А. Пещера у Мертвого моря.— М.: Наука, 1965.

ность развития разных идей, в том числе научных и религиозных.

А может быть, все эти находки не что иное, как ловкая и смелая фальсификация? Ведь древности подделывались уже не раз и иногда очень искусно. Между тем места, где были найдены эти свитки, а также способы хранения свитков все еще оставались неизвестными...

Страсти ученых, а также деятелей религиозных, общественных и прочих были накалены. Научные поиски осложнялись тем, что в этих местах шла война. Однако энтузиазм и смелость, проявленные несколькими учеными, а также изрядная доза денег, перешедшая в руки митрополита, бедуинов и спекулянтов, решили успех дела: места находок были, наконец, выяснены и указанные продавцами пещеры тщательно обследованы учеными. Сомнений больше не осталось: рукописи были подлинными, и им было больше 2000 лет.

Когда это удалось установить, то митрополит с купленными им у бедуинов свитками бежал в Америку. Ведь по закону такие археологические находки являются собственностью государства, на территории которого они найдены. В Америке митрополит потребовал за эти рукописи миллион долларов и в конце концов продал Иерусалимскому университету за четверть миллиона.

Вскоре цена этих свитков дошла до фунта стерлингов за один квадратный сантиметр рукописного текста, и в поисках древних рукописей пошло безудержное соревнование в быстроте и ловкости между бедуинами и археологами. Их «совместными усилиями» было сделано еще много ценных находок, а после этого ученые установили, что эти рукописи содержат около 600 книг, в том числе религиозные, юридические, экономические, а также астрономические. В этих свитках и было обнаружено описание вечною Кумранского календаря.

В Кумранском календарном году 12 месяцев. Первые два месяца каждого квартала имеют по 30 дней, а третий — 31 день. Каждый год содержит 52 семидневные недели. Новый год всегда начинается со среды, каждый праздник всегда приходится на одно и то же число месяца и один и тот же день недели. Расхождение с длиной солнечного года в этом 364-дневном календаре периодически исправляется введением добавочных дней.

Легко увидеть, что сходство Кумранского календаря с календарем, предложенным в конце XIX века Гюставом Армелином, поразительное.

В нашем веке введение всемирного календаря стало еще более актуальным и соответственно вопрос об этом поднят на высокнй международный уровень. В 1923 г. в Женеве при Лиге наций был создан Международный комитет по реформе календаря. За время своего существования этот комитет рассмотрел и опубликовал несколько сот проектов, поступивших от разных стран. В 1954 и 1956 гг. проекты нового календаря обсуждались на сессиях Экономического и Социального Совета ООН, однако окончательное решение было отложено.

В настоящее время одним из наиболее подходящих считается календарь, в котором год состоит из 12 месяцев и делится на 4 квартала, содержащих по 91 дню, или 13 недель. В каждом квартале первый месяц имеет 31 день, а два последующих по 30 дней. Первое число нового года всегда соответствует одному и тому же дню недели — воскресенью; каждый квартал начинается с воскресенья и кончается субботой. Наконец, в каждом месяце по 26 рабочих дней. Разумеется, определенные даты считаются праздничными днями. Они устанавливаются особо в каждой стране. Так как этот календарный год содержит 364 дня, то пернодически вставляются вне недельные праздничные дни, например после 30 декабря, а раз в четыре года еще и после 30 июня. Этот календарь является не только вечным, но и во многих отношениях удобным. В 1937 г. проект этого календаря получил одобрение в Совете Лиги наций, а в недавнее время был одобрен в Экономическом и Социальном Совете ООН.

Между тем были предложены проекты календарей, по-видимому, еще более удобных, в том числе так называемый «стабильный календарь». В нем календарный год делится на 12 месяцев по 30 дней, а в каждом месяце по 5 шестидневных нерасщепленных недель. Таким образом, получается, что каждый квартал состоит из 90 дней, все дни недели всегда приходятся на одни и те же числа месяцев, следовательно, все годы начинаются с одних и тех же дней недели и точно так же заканчиваются. Для согласования этого 360-дневного календаря с солнечным годом вводятся «внекалендарные» праздничные дни, которые вставляются в конце кварталов. В обычном году таких дней вставляется пять, а в високосном — шесть. Эти вставные дни красиво названы: День весны, День лета, День осени, День зимы, День мира и дружбы народов и День високосного года.

Когда же будет введен тот или иной новый вечный календарь? Очевидно, тогда, когда по этому вопросу между представителями разных стран будет достигнуто согласие.

Эры и эпохи

В одной из древнеримских хроник сказано: «В 622 году от основания Рима Публий Лициний Красс, консул и верховный жрец, был послан с прекрасно обученным войском против Аристоника».

Вычисление промежутка времени, отделяющего нас от этого исторического события, оказывается далеко не простым. Счет месяцев и дней в римском календаре отличается от того, которым мы пользуемся в настоящее время. Однако, ознакомившись с ним, сделать соответствующий пересчет уже нетрудно. Гораздо сложнее обстоит дело с определением начала отсчета.

Автор этой исторической хроники ведет счет времени не в нашем летосчислении, а в другом, в котором *эпохой*, т. е. началом отсчета, является момент основания города Рима. Только ряд более или менее сложных сопоставлений различных исторических событий позволил установить, что «основание города Рима» римляне относили к тому моменту, который мы обозначаем 753 годом до нашего летосчисления. Следовательно, выступление римского консула Красса с войском против рабов, восставших под предводительством Аристоника, имело место в 131 г. до начала нашего летосчисления.

Установление промежутка времени, отделяющего нас от определенного исторического события, указанного в одной из древнеассирийских хроник, связано с еще большими трудностями, так как в ней использован совсем особый счет времени. В этой хронике указано: «В эпонимате Пур-ан-сагал-а произошло восстание... В месяце сиване Солнце потерпело затмение». В данном случае счет времени ведется по эпонимам, т. е. по времени правления высших правительственных должностных лиц, именем которых обозначается год.

Сложные и кропотливые исторические изыскания путем сопоставления различных событий позволили установить, что упомянутый эпонимат относится к 763 г. до н. э. К счастью, в этой же хронике упоминается о солнечном затмении. Точные астрономические вычисления позволили установить, что в 763 г. до н. э. 15 июня (по ассирийскому счету — в сиване месяце) действительно было затмение Солнца.

Выбор начала отсчета в различных календарях делался из различных соображений, но всегда условно и произвольно. У домусульманских арабов существовал счет времени от «года слона». В этой «эре» эпохой (началом отсчета) явля-

ется событие сугубо местного значения — нападение на Мекку войска из Йемена, в составе которого были боевые слоны.

Такие «эры» местного значения в древности были весьма распространены. Древнегреческий историк Фукидид применял счет времени по Пелопонесской войне, падению Трон, изгнанию Пизистрата. Существовало немало эр, связанных с правлением того или иного царя или с их военными победами. Такова, например, употреблявшаяся в Древней Александрии эра Августа. В этой эре за начало отсчета была принята решительная победа Августа над Антонием. Такова эра, установленная в 1550 г. нашего летосчисления в Индии «великим Моголом» Акбаром, приказавшим согласовать летосчисление с годом вступления его на трон.

Богословы неоднократно создавали претендовавшие на универсальность «мировые эры», в которых за начало отсчета принималось мифическое «сотворение мира».

В александрийской эре, которая некоторое время была в ходу в Греции, а абиссинцами и коптами применялась вплоть до XX века, «сотворение мира» относилось к 5501 г. до н. э. В антиохийской эре «сотворение мира» было отнесено к 5969 г. до н. э., а в византийской эре «сотворение мира» соответствовало 5508 г. до н. э. Всего таких эр было придумано около 200.

В самой длинной из них «сотворение мира» относилось к 6984 г. до нашего летосчисления, в самой короткой — к 3483 г. до нашего летосчисления. Эти сроки до смешного малы с точки зрения современных научных знаний, согласно которым возраст планеты Земля исчисляется миллиардами лет, а возраст многих звезд оказывается еще большим.

Совершенно особняком от всех упомянутых выше эр стоит древнеиндийское летосчисление, описанное в старинных индийских религиозных книгах. В его основе лежит год, состоящий из 360 дней. Эра построена из гигантских периодов, по истечении которых, как сказано в этих книгах, все живое умирает. Каждый такой период, называемый эоном или кальпой, длится 4 320 000 000 лет, но это, по словам древнеиндийских религиозных авторов, лишь один день в жизни Брахмы. Каждый эон делится на 1000 периодов, махаюг, по 4 320 000 лет. Последняя махаюга состоит из четырех периодов: деваюги — царства богов или золотого века, третаюги — серебряного века, дванаюги — медного века и калюги — железного века, века греха, в котором живем мы. Таково это удивительное летосчисление, очень поэтичное и совершенно не обоснованное.

В настоящее время повсеместно получила распространение христианская эра, в которой эпохой является «рождество Христово». Эта эра была введена на основании расчетов, сделанных римским монахом Дионисием Малым в 241 г. эры Диоклетиана, согласно которым «воскресение» Иисуса произошло за 253, а рождество — за 283 года до начала эры Диоклетиана. Поэтому следующий год Дионисий назвал 525 годом от рождества Христова.

Вместе с распространением христианской религии предложенная Дионисием христианская эра начала распространяться повсеместно. В 532 г. нашего летосчисления она была принята в Риме, в VIII веке — во Франции.

В России вплоть до XVIII века была в ходу византийская эра от «сотворения мира». Указом Петра I от 20 декабря 1699 г. в России была введена эра от «рождества Христова» и 1 января 7208 г. византийской эры было приказано считать 1 января 1700 г. от «рождества Христова». К XIX веку счет от «рождества Христова» был введен во всех «христианских» странах.

В тех странах, где господствует ислам, существует своя мусульманская эра, в которой эпохой считается «хиджра» — год бегства пророка Мохаммеда из Мекки в Медину. Эта эра была введена халифом Омаром в 634—644 гг. нашего летосчисления; «хиджра» была отнесена Омаром к 622 г. нашей эры.

Самой поздней была введенная во Франции «эра республики», эпохой которой был объявлен день провозглашения республики 22 сентября 1792 г. Этот календарь был отменен Наполеоном, восстановлен во время Парижской коммуны и перестал действовать после ее гибели.

Календарь, которым мы пользуемся в настоящее время, не является вполне совершенным: выбор эпохи (начала отсчета) в нем произволен, деление на месяцы разной длины не вполне удобно.

Впрочем, для отсчета промежутка времени, отделяющего нас от того или иного исторического события, выбор начала отсчета является второстепенным. Для правильного счета лет существенно не то, какое событие (пусть даже мифическое) принято за эпоху, а то, что за начало отсчета всеми принята одна и та же определенная дата.

Как измеряли время в древности

История развития методов измерения времени — это путь от первых грубых часов древнего мира, позволявших измерять время с точностью до нескольких минут в сутки, к современным астрономическим часам, позволяющим измерять время с точностью до тысячных и миллионных долей секунды. Это также путь постепенного расширения доступных измерению промежутков времени вплоть до миллиардов лет и биллионных долей секунды.

На протяжении веков и тысячелетий расширение масштабов измеряемых промежутков времени и увеличение точности их определения было всегда связано с решением той или иной научной или технической задачи. Поэтому история часов и является одной из увлекательнейших страниц борьбы человеческого гения за понимание сил природы и овладение ими.

Солнечные часы

Первыми приборами, с помощью которых люди стали измерять время, были солнечные, песочные, огненные и водяные часы. Солнечные часы были известны очень давно, более чем за 500 лет до нашего летосчисления. Живший в I веке до н. э. архитектор Марк Витрувий Поллион оставил нам следующие сведения о конструкции солнечных часов древнего мира и их изобретателях: «Солнечные часы в виде выдолбленного полукруга из тесаного (квадратного) камня, вырезанного сообразно местному наклону мировой оси, говорят, изобрел халдеец Бероз. Часы в форме чашек или полушария — Аристарх Самосский, он же изобрел часы в виде горизонтальной плиты (диска); паутинообразные (с паутинообразной сеткой) часы сконструировал астроном Евдокс, а некоторые говорят, что их изобрел Аполлоний».

Солнечные часы состоят из предмета, дающего резкую и длинную тень, и циферблата, на котором нанесены

деления, соответствующие часам и долям часа. Полученные отсчеты времени с помощью солнечных часов основано на том, что в течение дня тень, отбрасываемая предметом, освещенным Солнцем, все время изменяется. Она перемещается, одновременно меняя свою длину: рано утром тени длинные, затем они укорачиваются, а после полудня снова удлиняются. Утром тени обращены к западу, в полдень в нашем северном полушарии — к северу, а вечером — к востоку. В соответствии с этим отсчитывать время можно двумя способами по длине тени или по ее направлению. Второй способ более удобен и точен.

Первоначально указатель солнечных часов представлял собой палку, вертикально воткнутую в землю, а циферблат состоял из вбитых в землю колышков. Это, пожалуй, самая простая, но далеко не самая удобная форма солнечных часов, так как при вертикальном расположении указателя и горизонтальном расположении циферблата конец тени описывает не окружность, а другую, более сложную кривую, причем изо дня в день, из месяца в месяц расположение этой кривой меняется.

Многие ученые и изобретатели древнего мира занимались улучшением солнечных часов. Для того чтобы сделать их пригодными для любого дня и месяца, циферблат солнечных часов делался в виде многих линий с делениями, из которых каждая предназначалась для определенного месяца. Таким, например, были солнечные часы древнегреческого астронома Аристарха из Самоса. В этих часах циферблат имел форму чаши с прочерченной на ее внутренней поверхности сложной сетью линий. Часы другого древнегреческого астронома, Эвдокса, были названы «арахна» — паук, вследствие того, что сложная сеть линий их циферблата напоминала паутину. К этому же типу принадлежат сохранившиеся до наших дней солнечные часы Андроника из Кирра (рис. 1) с сеткой делений, рассчитанной на разные месяцы года.

Повышение точности путем создания сложных циферблатов, естественно, затрудняло и изготовление солнечных часов и пользование ими. Решительный шаг в улучшении солнечных часов был сделан тогда, когда астрономы поняли, какие выгоды представляет расположение указателя солнечных часов параллельно земной оси. Когда указатель солнечных часов расположен параллельно земной оси, то его конец оказывается обращенным к полюсу мира, т. е. той точке небесного свода, которая при вращении Земли кажется неподвижной. Если при этом доска с ци-



Рис. 1. Циферблат солнечных часов Андроника

ферблатом расположена перпендикулярно к указателю, то конец тени описывает на ней дугу окружности, а скорость движения тени оказывается постоянной. Вследствие равномерного движения тени часовые деления получаются равными.

В этих — экваториальных — солнечных часах (рис. 2) доска с циферблатом устанавливается наклонно к горизонту под углом $90^\circ - \varphi$, где φ — географическая широта данной местности. Например, при изготовлении экваториальных солнечных часов для Москвы, расположенной на географической широте $55^\circ 48'$, угол наклона доски к горизонту нужно выбрать равным $90^\circ - 55^\circ 48' = 34^\circ 12'$.

Указатель экваториальных солнечных часов выпол-

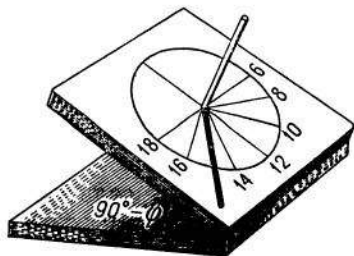


Рис. 2. Экваториальные солнечные часы

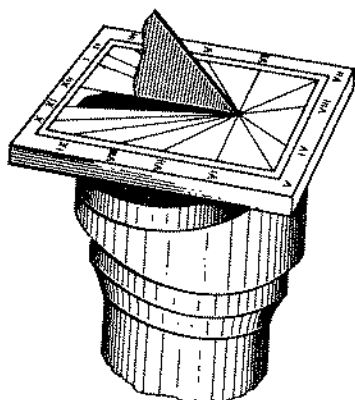


Рис. 3. Горизонтальные солнечные часы

няется в виде стержня, продетого насквозь через среднюю наклонной доски так, что часть его торчит сверху, а часть снизу. Это делается потому, что в экваториальных солнечных часах в течение одной части года тень от стержня падает на циферблат сверху, а в течение другой — снизу.

Достоинством экваториальных солнечных часов является то, что их циферблат годен для всех дней года, причем часовые деления расположены на равных расстояниях

друг от друга. Недостатком этих часов является то, что в течение части года тень от указателя падает на их циферблат снизу, что затрудняет наблюдения.

Горизонтальные солнечные часы (рис. 3) состоят из горизонтально расположенной доски с нанесенным на нее циферблатом и указателя в виде треугольника. Острый угол этого треугольника делается равным географической широте данной местности, так что наклонная сторона треугольника получается параллельной земной осн. Треугольник-указатель устанавливается так, чтобы его плоскость была перпендикулярна к циферблату, а линия продолжения основания треугольника шла по направлению север — юг. В полдень тень от указателя обращена (в нашем северном полушарии) к северу. Таким образом, отметка времени, соответствующая 12 часам, находится на линии продолжения основания треугольника. В горизонтальных солнечных часах в течение дня скорость перемещения тени меняется. Поэтому на их циферблате часовые отметки расположены под разными, неравными углами. В горизонтальных солнечных часах, так же как и в экваториальных, циферблат годен для всех дней года, причем в течение всего года тень от указателя падает на их циферблат сверху.

В древности солнечные часы имели весьма большое распространение. Высокие и стройные обелиски Древнего Египта были указателями солнечных часов. В Индии у паломников были посохи с вделанными в них миниатюрными солнечными часами. Большие солнечные часы были уста-

повлены на «Башне ветров» в древних Афинах. В Древнем Риме императором Августом на Марсовом поле в качестве указателя солнечных часов был установлен обелиск Сезостриса высотой в 34 м, вывезенный им в числе других военных трофеев из Египта.

Китайский император Кошу-Кинг возвел в 1278 г. указатель солнечных часов в 40 ступней высотой. Значительно превзошел его внук Тимура — знаменитый самаркандский астроном Улугбек, который, стремясь увеличить точность отсчета, в 1430 г. в Самарканде воздвиг солнечные часы высотой 175 ступней (около 50 м).

Вниманье, уделяемое солнечным часам королями и вельможами, нередко заставляло строителей часов стремиться не только к тому, чтобы сделать их более точными, но и эффектными или забавными. Механик Ренье сделал солнечные часы, которые с помощью стекол, пороха и колокольчиков в полдень сами поднимали трезвон. Мастер Руссо сделал еще более оригинальный указатель времени: с помощью соответствующим образом установленного и направленного зажигательного стекла он добился того, что солнечный луч управлял пушкой, заставляя ее стрелять в определенное время.

Солнечные часы продолжали строить вплоть до XVI и даже XVII века. Впрочем, иногда их строили и в более поздние времена, но уже только для украшения.

Несмотря на то, что ученые научились делать очень большие и совершенные солнечные часы, пользование ими было далеко не всегда удобным; они не действовали ночью и в пасмурную погоду, их трудно было брать с собой в путешествие или сражение. В этом отношении значительно более удобными были песочные часы.

Песочные, огненные и водяные часы

Песочные часы обычно делались в виде двух воронкообразных стеклянных сосудов, поставленных друг на друга. Верхний сосуд до определенного уровня заполнялся песком, высыпание которого служило мерой времени. После того как из верхнего сосуда весь песок высыпался, часы нужно было перевернуть (рис. 4).

Для удобства отсчета времени иногда пользовались целой системой сосудов, первый из которых опустошался за $\frac{1}{4}$ часа, второй — за $\frac{1}{2}$ часа, третий — за $\frac{3}{4}$ часа, четвертый — за 1 час. После того как становился пустым

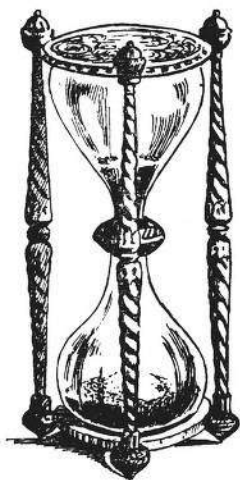


Рис. 4. Песочные часы

Для этой цели часовые мастера XIII века смесь из песка и мраморной пыли кипятили с вином и лимонным соком, снимали накипь, затем сушили, повторяя эту операцию девять раз. Несмотря на все эти мероприятия, песочные часы отмеряли время довольно неточно.

Для отсчета более или менее длительных промежутков времени песочные часы неудобны как вследствие небольшой точности, так и потому, что за этими часами требуется постоянный надзор. В этом отношении значительно удобнее были огненные и водяные часы, имевшие в древности большое распространение.

Рудокобы древнего мира, добывая в шахтах серебро и железо, пользовались своеобразным способом измерения времени: в глиняную лампу, которую брал с собой под землю рудокоп, наливалось такое количество масла, что его хватало на 10 часов горения светильника. Когда масло было на исходе, шахтер знал, что рабочий день кончается, и поднимался наверх.

В Китае употреблялись огненные часы несколько иной конструкции: из специальных сортов дерева, растертого в порошок вместе с благовониями, приготавлилось тесто, из которого раскатывали палочки, придавая им разнообразную форму, например форму спирали (рис. 5). Некоторые образцы огненных часов достигали нескольких метров длины; слегка потрескивая и источая аромат, они могли гореть месяцами. Иногда на определенных местах подвешивались металлические шарики, которые при сто-

четвертый сосуд, специально при- ставленный для этого человек пере- ворачивал все склянки так, что счет песочных часов начинался вновь, и одновременно с этим отмечал про- шествие часа.

Песочные часы широко исполь- зовались на кораблях; так называе- мые «корабельные склянки» служи- ли морякам для установления распо- рядка их жизни — смены вахт и отдыха.

Точность песочных часов зависит от равномерности высыпания песка. Чтобы сделать песочные часы более точными, нужно пользоваться по воз- можности однородным песком, мягким и сухим, не образующим комков у гор- ла сосуда.



Рис. 5. Китайские огненные часы

рании палочки падали в фарфоровую вазу, производя громкий звон, — получался огненный будильник.

В средние века множество открытий древних было забыто или утеряно. Во многих монастырях монахи определяли ночью время по числу прочитанных молитв — способ далеко не точный. Затем в монастырях, да и в гражданском быту стали пользоваться для счета времени свечами, нанося на них метки, соответствующие определенным промежуткам времени. Это был европейский вариант огненных часов.

Точность огненных часов тоже была невысокой. Не говоря уже о трудности приготовления совершенно однородных палочек или свечей, нужно отметить, что скорость их сгорания всегда зависела от условий, в которых оно происходило: от доступа свежего воздуха, наличия ветра и т. д.

Недостатком огненных часов являлось также то, что их нужно было периодически возобновлять. Водяные часы в этом отношении были удобнее, так как возобновление запаса воды не представляло затруднений.

Водяные часы были известны в Древнем Египте, Иудее, Вавилоне, Греции, Китае. Греки называли водяные часы *клепсидрой*, что буквально означает «воровка воды». Время с помощью этих часов определялось по скорости вытекания воды из одного сосуда в другой, снабженный метками, уровень воды в котором и показывал время. Для



Рис. 6. Водяные часы

удлинения измеряемого интервала времени иногда таких сосудов делали несколько: три, четыре (рис. 6).

Клепсидрами пользовались в быту для счета времени, ими пользовались для регламентации времени выступления ораторов в общественных собраниях и в суде. В войсках клепсидры применялись при разводе караулов. В древности клепсидра была весьма распространенным прибором, хотя ее точность была совсем невысокой.

Для повышения точности отсчета времени конструкторы клепсидр должны были учесть, что вода из отверстия сосуда вытекает не равномерно, а тем быстрее, чем больше давление, т. е. чем выше уровень ее в сосуде. Ценой некоторого усложнения конструкторы водяных часов добились того, чтобы они не отставали по мере опустошения верхнего сосуда.

Многие конструкторы водяных часов стремились к тому, чтобы их приборы показывали не только время суток, но и наступление различных астрономических событий или управляли движением разных фигурок. Это заставляло изобретателей клепсидр создавать хитроумнейшие и громоздкие сооружения, повергавшие в изумление современников.

История сохранила для нас рассказы о многих замечательных клепсидрах. Философ Платон изобрел водяной

будильник, созывавший учеников его Академии на занятия. В начале IX века халиф Гарун-аль-Рашид подарил Карлу Великому клепсидру из дамасской позолоченной бронзы с хитрым механизмом, который отбивал часы и управлял движущимися фигурками. Халифу аль-Мамуну принадлежала клепсида, в которой механические птицы щебетали на серебряных ветвях. В VIII веке в Китае астроном И-Ганг построил клепсидру, которая не только отбивала часы, но еще и показывала движение Солнца, Луны, планет, лунные затмения и положение звезд. Знаменитый датский астроном Тихо Браге (1546—1601) пользовался клепсидрой при наблюдении небесных тел.

Да, во многих отношениях клепсидры достигли совершенства, а значит, и конца развития. В отличие от солнечных часов они показывали время и ночью, в отличие от песочных — показывали его непрерывно. Однако клепсидры отсчитывали время с погрешностью около 10—20 минут в сутки, и даже лучшие ученые того времени не могли придумать, как существенно повысить их точность.

Между тем в XIII—XIV веках наряду с водяными часами разрабатывали и строили измерители времени, основанные совсем на других принципах, иного устройства — *механические часы*. Каково же их устройство? Какие научные открытия были сделаны с их помощью? Что и как положило предел увеличению их точности? Обо всем этом рассказано далее.

Механические колесные и маятниковые часы

Колесо вместо песка, огня и воды

Идея использования для отсчета времени качающегося груза и вращающихся зубчатых колес — одна из самых плодотворных в богатой глубокими мыслями истории развития часов. После того как люди начали делать различные часы, понадобилось более 2000 лет для того, чтобы появилась эта идея, а затем еще более 500 лет для того, чтобы в этой области удалось высказать нечто принципиально новое и лучшее.

Механические колесные часы появились в XIII веке. Это были сооружения большие и тяжелые. Принцип их действия следующий: если на горизонтальный вал намотать веревку, на конце ее укрепить гирию и дать ей свободно падать, то она будет тянуть веревку и вращать вал. Если этот вал через промежуточные колеса соединить с основным храповым колесом, связанным со стрелками-указателями, то вся эта система будет как-то указывать время. Однако при этом вал будет вращаться не равномерно, а ускоренно. Для получения медленного и по возможности равномерного вращения храпового колеса служит специальный регулятор — билянец.

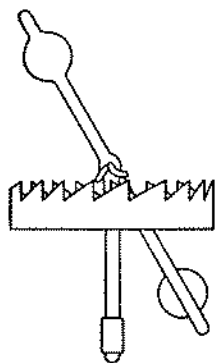


Рис. 7. Билянец

Билянец (рис. 7) представляет собой металлический стержень, расположенный параллельно поверхности храпового колеса. К оси билянца под прямым углом друг к другу прикреплены две лопатки. При повороте колеса зубец толкает лопатку до тех пор, пока она не соскользнет с него и не отпустит колесо. В это время другая лопатка с противоположной стороны колеса входит в углубление между зубцами и сдерживает его движение. Вследствие

такого устройства билинец раскачивается. При каждом полном его качании храповое колесо передвигается на один зубец. Чем медленнее совершается качание билинца, тем медленнее движется храповое колесо.

На стержень билинца навешивают грузы, обычно в форме шаров. Регулируя массу этих грузов и расстояние их от оси, можно заставить храповое колесо двигаться с различной скоростью.

Колесные часы обычно выполнялись в виде весьма громоздких сооружений: башенных, дворцовых или соборных часов. Их детали имели значительные размеры и большой вес. Например, в колесных часах астронома Тихо Браге храповое колесо имело диаметр 91 см и 1200 зубьев. В некоторых часах колеса весили сотни килограммов. Вследствие большого веса деталей и значительного трения колесные часы пуждались в смазке и постоянном уходе. Погрешность показаний колесных часов составляла несколько минут в сутки.

Одним из интересных образцов механических часов являются московские кремлевские часы. Это — огромное сооружение. Механизм часов занимает несколько этажей башни, а размеры циферблата таковы, что каждая цифра имеет длину почти с человеческий рост. Эти часы были сооружены в 1404 г. монахом Лазарем.

С тех пор они несколько раз исправлялись и переделывались. Коренная переделка этих часов была произведена в 1709 г. По приказу Петра I, большого любителя часов, на Спасской башне были установлены часы с музыкой. По приказу Николая I часы были вновь переделаны таким образом, что в полдень, в три, шесть и девять часов они стали вызывать «Коль славен...» и Преображенский марш. Это были грандиозные часы с огромными стрелками, имевшие несколько заводных валов с семипудовыми гири. Один из валов управлял стрелками, другой — боем, третий служил для отзванивания четвертей, а четвертый был приспособлен для того, чтобы часы исполняли мелодию. Циферблат этих часов расположен на восьмом этаже башни, часовой механизм — на девятом, а 35 колоколов, вызывающих мелодию, — на десятом этаже башни. После Октябрьской революции кремлевские часы по распоряжению В. И. Ленина были отремонтированы слесарем Н. В. Беренсом и переделаны так, что стали вызывать мелодию «Интернационала».

В XV веке различные виды механических часов получают все большее распространение, а в их конструкцию

вводится важное усовершенствование: часовая пружина. Появляются настольные пружинные часы сравнительно небольших размеров, масса которых не превышает нескольких килограммов.

На первых часах имелась только часовая стрелка. Около 1550 г. появляются часы с двумя стрелками: часовой и минутной, а с 1760 г. появляется и секундная стрелка.

Маятник — сердце современных часов

Ход пружинных часов зависит от многих причин и в первую очередь от натяжения пружины и трения колес.

Погрешность показаний времени колесных часов значительно меньше, чем погрешность песочных, огненных и водяных часов, однако довольно скоро точность отсчета времени, даваемая ими, оказалась недостаточной. Ряд наук, и в первую очередь астрономия, требовал умения отсчитывать время все точнее и точнее. Необходимо было отыскать способ сделать ход часов значительно более равномерным.

Принципиально новое решение этой задачи было найдено Галилео Галилеем путем использования для отсчета времени качаний маятника.

Согласно преданию в 1584 г. двадцатилетний Галилей, находясь в соборе, под высокими сводами которого метался ветер, обратил внимание на то, как качаются огромные бронзовые лампы, подвешенные к потолку. Эти лампы были разной величины и имели различный вес, но были подвешены на цепях одинаковой длины и качались с одинаковым периодом. Рассказывают, что это и навело Галилея на мысль использовать качания маятника для регулирования хода часов.

Позднее, независимо от Галилея, Христиан Гюйгенс разработал конструкцию маятниковых часов и дал их расчет.

Принцип действия маятниковых часов следующий: пружина создает силу, движущую всю систему колес, а маятник обеспечивает равномерность их хода (рис. 8). Устройство этих часов такое: от вала через ряд промежуточных колес приводятся в движение минутное и секундное колеса. Секундное колесо охватывается якорем, или анкером, состоящим из дуги с двумя скошенными выступами (рис. 9). Анкер скреплен с маятником. При качании маятника и движении секундного колеса выступы анкера попеременно



Рис. 8. Маятниковые часы XVII века

входят в прорези секундного колеса, регулируя скорость его движения. В свою очередь анкер связан с маятником с помощью вала, подталкивающего маятник. Это — система так называемого «несвободного» маятника.

Пружина и маятник открыли перед конструкторами часов богатые возможности, а желание превзойти своих современников и покровительство вельмож, любивших похвалиться затейливой игрушкой, влекло часовых мастеров к разработке все более сложных и хитроумных механизмов.

Изготовление таких часов в России связано с именами двух замечательных изобретателей: Кулибина и Волоскова.

Иван Петрович Кулибин (1735—1818) сконструировал часы в форме яйца, вызывавшие заслуженное удивление современников (рис. 10). Их механизм, состоящий почти из 500 деталей, устроен так, что они отбивали часы и четверти часов, исполняя при этом разные мелодии, в них двигались фигурки и т. д. Устройство этих часов, над которыми он работал пять лет, а затем преподнес их Екатерине II, Кулибин описывал так: «В доходе каждого часа внутри корпуса открываются створные двери, внутри оногo яйца представляется в подобие зала, в котором противу

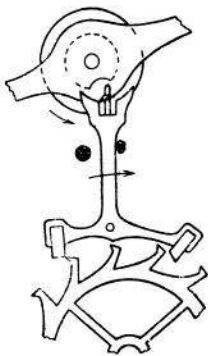


Рис. 9. Анкерный спуск

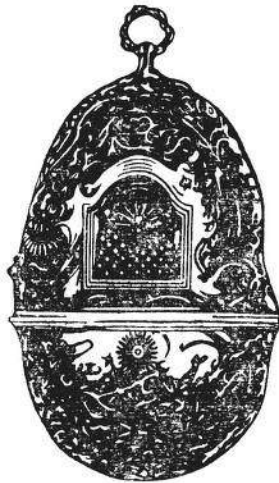


Рис. 10. Часы Кулибина

дверей поставлена, на пример палатки, подобие гроба господня, гроб и в него затворенная малая дверь. И в двери прибавлен камень. По сторонам этого гроба стоят с копьями два стража. По отворению реченных дверей через полминуты вдруг появляется в подобие ангел. От того явления камень отваливается, и дверь гроба разрушается, а стоящие стражи вдруг ниц падают. Через полминуты приходят к ангелу две жены в подобие мироносиц и с их явлением надпеваает звоном голос... потом в корпусе вдруг двери затворяются, и сие действие бывает перед каждым часом. И оный стих выходит перед пробитием 8 часов пополуночи за каждым часом и действием, а переменяется по пробитии 4 часов пополудни и выходит голос другого стиха. Величиной эти часы противу средства гусиного и утиного яйца. Бьют часы и четверти, каждую четверть, и имеют лицевую доску со стрелками, как у карманных».

Терентий Иванович Волосков (1729—1806) в результате многолетнего труда сделал часы, показывавшие минуты, часы, месяцы, положение Солнца, Луны и звезд. Это был сложный и остроумный механизм.

Маятниковые часы даже в своем первоначальном виде имели точность, значительно превосходящую ту, которой обладали все предыдущие типы часов. Это позволило решать ряд важных астрономических задач: производить определение положения небесных тел и их движений и т. д. Например, отмечая по звездному времени моменты

кульминации Солнца и моменты кульминации звезды, по разности этих моментов можно определить их взаимное расположение (разность прямых восхождений). Делая такие измерения ежедневно в течение длительного времени, определяют путь Солнца относительно звезд.

Однако вскоре для астрономии и навигации понадобились еще более точные измерители времени. Поэтому в течение последних столетий устройство маятниковых часов непрерывно совершенствовалось, а погрешность их хода снижалась.

Важное усовершенствование часов заключалось в улучшении конструкции маятника. Даже небольшое изменение длины маятника сильно сказывается на работе часов. Между тем при изменении температуры размеры тел изменяются. Стальной стержень длиной 1 м при нагревании на 1°C удлиняется на 0,012 мм, медный — на 0,016 мм, цинковый — на 0,028 мм. Если длина стального маятника отрегулирована при 0°C , то при температуре 20°C часы накапливают за сутки отставание в 10,4 секунды. Для уменьшения погрешности хода часов необходимо добиться температурной компенсации, т. е. сделать маятник так, чтобы при изменении температуры его длина не менялась.

В 1725 г. английский часовой мастер Джон Гаррисон для получения температурной компенсации сделал маятник составным. Этот маятник был собран из нескольких цинковых и стальных стержней, соединенных так, что при повышении температуры удлинение одних приводило к увеличению, а удлинение других — к уменьшению его общей длины (рис. 11). При надлежащем выборе длины цинковых и стальных стержней размеры маятника оставались неизменными как при повышении, так и при понижении температуры. Таким образом Д. Гаррисон добился изумительной по тем временам точности работы часов, порядка нескольких сотых долей секунды в сутки.

Настоящее завершение пружинные часы получили с изобретенным балансом, заменившего в них обычный маятник. Баланс — это маленькое маховое колесо, которое со-

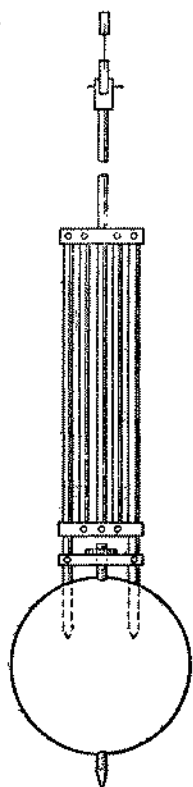


Рис. 11. Маятник с температурной компенсацией

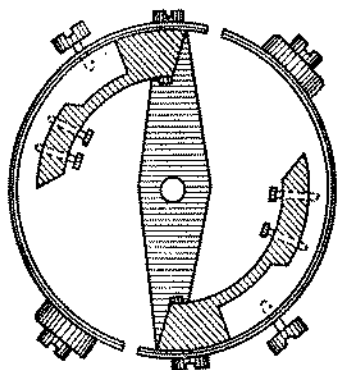


Рис. 12. Баланс с температурной компенсацией

вершает колебательные движения около положения равновесия, попеременно вращаясь то вправо, то влево.

Пружинные часы с балансом работают следующим образом. Прежде всего заводят пружину. Для этого от руки вращают заводную головку часов. При этом через ряд промежуточных колес вращение передается валу барабана, который закручивает пружину так, что она навивается на него. Пружина не может раскрутиться, вращая вал. Этому

мешает храповая собачка, которая стопорит барабанное колесо. Поэтому при работе часов пружина раскручивается, вращая не вал, а барабан.

Вращение барабана через несколько колес — центральное, промежуточное, секундное — передается анкерному колесу. Анкерное колесо через вилку с рожекми сообщает движение балансу, периодически подталкивая его. При этом спиральная пружина баланса (волосок) сворачивается и разворачивается, заставляя баланс вращаться то в одну, то в другую сторону. Таким образом, вращательное движение анкерного колеса преобразуется в колебательное движение баланса.

Каждое колебание баланса имеет (или по крайней мере должно иметь!) определенную и одинаковую длительность. Измерение времени с помощью пружинных часов сводится к подсчету числа колебаний, совершаемых балансом за измеряемый промежуток времени. Эту работу выполняет состоящий из нескольких колес счетный механизм, а связанные с ним стрелки указывают на циферблате протекшее время.

Для получения температурной компенсации баланса его колесо делается не сплошным, а состоящим из двух дуг (рис. 12). Каждая дуга состоит из двух различных металлических полосок, спаянных между собой. Внешняя полоска делается из латуни, внутренняя — из стали. При увеличении температуры длина волоска увеличивается, а его упругость уменьшается; обе эти причины вызывают замедление качаний баланса. Состоящие из двух металлов дуги баланса при нагревании загибаются внутрь вследствие того, что снаружи расположена полоска из ма-

териала с большим коэффициентом расширения. Это уменьшает радиус баланса и соответственно увеличивает частоту его качаний. При этом вся система регулируется так, чтобы период ее качаний не зависел от температуры.

Эти усовершенствования дали возможность изготавливать пружинные часы, имеющие точность, вполне достаточную не только для бытовых целей, но и для целого ряда научных и технических задач.

Как регулируют часы. Весы времени. ППЧ и микроскоп времени

В настоящее время карманные, настольные и в особенности наручные часы стали столь распространенными приборами, а их выпуск столь массовым, что возникла особая проблема: достаточно точной, быстрой, годной для заводского производства регулировки хода часов.

Казалось бы, что отрегулировать часы можно достаточно просто по радиосигналам точного времени. Для этого нужно поставить их точно по сигналу времени, затем через некоторое время, например через сутки, снова сверить их с сигналом, и если часы несколько спешат или отстают, то немного передвинуть регулятор. Далее нужно повторять эту операцию до тех пор, пока регулятор не будет установлен в такое положение, когда погрешность хода часов не превышает допустимого для данного типа часов предела. Легко видеть, что такой метод регулировки хода часов требует много времени, большого штата сотрудников и для массового производства крайне неудобен.

Значительно более удобным в этом отношении оказывается акустический метод контроля и регулировки хода часов, получивший название *весов времени*. При взвешивании на обычных весах масса тела сравнивается с массой некоторого числа гирь. При контроле хода часов на весах времени по звуку на слух производится сравнение частоты ударов контролируемых часов с частотой ударов эталонных часов высокой точности.

Установка для регулирования часов состоит из контрольного станочка, в который зажимаются испытуемые часы, а также из усилителя и громкоговорителя. Часы устанавливаются в станке таким образом, что задняя часть их корпуса оказывается вблизи неподвижной металлической пластинки, имеющей такие же размеры, как и корпус часов. Металлическая пластинка и корпус часов образуют обкладки электрического конденсатора и включаются на

вход усилителя. Небольшие перемещения корпуса часов, вызванные ударами часового механизма, приводят к изменению емкости этого конденсатора и преобразуются усилителем в громкий и четкий звук. Далее на слух сравнивают это усиленное «тикание» регулируемых часов с аналогичными звуковыми сигналами эталонных часов и добиваются приблизительного их согласования.

Еще более удобным оказался прибор для проверки часов — ППЧ, в котором контроль хода часов ведется не только на слух, но и в виде записи (рис. 13 а).

Это делается следующим образом. Проверяемые часы устанавливаются в держателе микрофона (рис. 13 б). Колебания баланса часов создают механические вибрации, а микрофон преобразует их в электрические сигналы. Величина этих электрических сигналов небольшая, а форма напоминает вершину горы. Между тем для управления пишущим устройством желательно иметь электрические сигналы большой амплитуды и П-образной формы. Это достигается в два этапа. После микрофона электрические сигналы поступают на усилитель. Затем уже усиленные

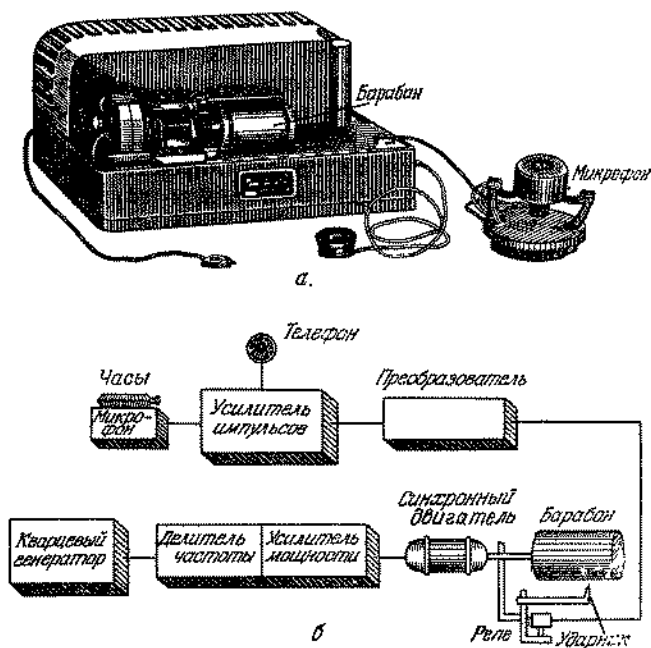


Рис. 13. Прибор для проверки хода часов (ППЧ-4): а — общий вид, б — схема прибора

электрические сигналы поступают на вход преобразователя. Преобразователь работает как клапан. Срабатывая от небольшого тока, он управляет большим током. В результате на выходе преобразователя получаются импульсы тока большой величины и почти П-образной формы, а их частота равна частоте колебаний баланса.

Эти импульсы управляют электромагнитным реле, которое состоит из электромагнита и якорька с ударником, на конце которого укреплено перо. При протекании электрического тока через катушку электромагнита якорек притягивается. Таким образом, при каждом импульсе тока якорек реле перемещается и своим концом ударяет по барабану, ставя на нем точку. Барабан вращается со строго определенной скоростью. Это достигается с помощью радиотехнического генератора, частота колебаний которого понижается в каскадах деления частоты. Ток низкой частоты через усилитель мощности питает синхронный электродвигатель, от которого вращение передается барабану.

Для проверки обычных наручных и карманных часов барабану придается вращение с частотой 5 оборотов в 1 секунду, или 1 оборот за 0,2 секунды. Между тем проверяемые часы делают (или по крайней мере должны делать!) каждый удар (тиканье) через 0,2 секунды. Следовательно, за каждый оборот барабана на диаграммной бумаге ставится одна точка. В приборе имеется также специальное механическое устройство для создания поступательного движения реле относительно барабана, которое при вращении барабана смещает реле вдоль его оси. Если частота тиканья часов и число оборотов барабана совпадают, т. е. ход часов правильный, то на барабане получается ряд точек, расположенных на горизонтальной прямой. Если испытываемые часы спешат или отстают, то получаются прямые, расположенные под разными углами к горизонтальной оси. По их наклону определяется погрешность, или ошибка, хода часов. При этом вся операция контроля и регулировки занимает лишь несколько минут.

Для регулировки хода часов используют также стробоскопический эффект. Соответствующий прибор называют *микроскопом времени*. Принцип действия микроскопа времени основан на том, что зрительное впечатление человеческого глаза обладает некоторой инерцией. Изображение, мелькающее больше 16 раз в секунду, кажется человеческому глазу слитным. На этом, кстати говоря, основано слитное восприятие глазом изображений в кино, где кадры сменяются 24 раза в секунду.

Если вращающийся диск, представляющий собой белый круг с одним зачерненным сектором, осветить мелькающим светом, частота вспышек которого равна числу оборотов диска, то человеческому глазу диск кажется неподвижным. Это происходит потому, что глаз, который видит диск только во время вспышки света, каждый раз застает черный сектор на одном и том же месте. Если число оборотов диска и частота вспышек света несколько различаются, то изображение кажется движущимся вперед или назад. Наконец, если частота вспышек света оказывается вдвое больше числа оборотов диска, то глаз видит на круге два черных сектора вместо одного. Описанные явления используются для определения частоты вращения. Как и большинство оптических методов, этот стробоскопический метод оказывается весьма точным.

Микроскоп времени работает согласно этому же принципу. Устройство микроскопа времени следующее: синхронный моторчик, питаемый током эталонной частоты, вращает зеркальце, отбрасывающее блик света на балансир испытываемых часов. Частота попаданий света на балансир часов соответствует нормальной частоте его качаний. Если испытываемые часы идут совершенно правильно, то вследствие стробоскопического эффекта их балансир кажется неподвижным. Путем поворота статора моторчика фаза вспышек света подбирается так, чтобы балансир был виден в середине его пути, когда частота его качаний наибольшая. Этим достигается максимальная чувствительность устройства. Если частота качаний балансира испытываемых часов не совпадает с эталонной частотой освещения, то при малых расхождениях изображение балансира медленно передвигается, а при больших — перескакивает и размазывается. При очень большом различии этих частот изображение удваивается или утраивается.

Наименьшее смещение балансира часов, дающее такое дрожание изображения, которое еще можно заметить, составляет угол в $\frac{1}{4}$ градуса, что соответствует отклонению хода часов на $\frac{1}{8}$ секунды в сутки. Таким образом, передвигая регулятор часов и одновременно наблюдая с помощью микроскопа времени, можно достаточно быстро и точно отрегулировать часы.

Для решения несколько более широких задач — контроля хода часов в течение длительного времени, наблюдения колебаний хода, определения зависимости хода часов от натяжения пружины и т. д. — применяются различного рода записывающие устройства.

Местное время. Часовые пояса и лик Земли

Время и место. Как можно найти или потерять день

Истинный полдень — тот момент, когда палка, воткнутая в землю, дает самую короткую тень, — в различных пунктах земного шара наступает в разное время. Как же установить часы? В каждом месте по-разному? Не станет ли при этом расписание поездов путанным, а их движение опасным? Может быть установить единое время для всего земного шара? Однако вряд ли на это согласятся жители тех стран, в которых расхождение истинного времени с единым окажется большим.

Все эти задачи уже разрешены, но для того, чтобы лучше оценить связанные с их решением трудности, находки, открытия, мысленно перенесемся на несколько сот лет назад...

20 сентября 1519 г. после торжественного богослужения, под гром пушек и приветственные крики из Севильи вышла флотилия. В ее составе — пять каравелл. Командир флотилии — Франциско Магеллан. Цель — открытие западного пути к Молуккским островам, или «островам пряностей», как их тогда называли. Португальцы уже захватили восточный путь вокруг Африки через Индийский океан и понастроили вдоль него крепости. Испанцы запоздали и пытаются наверстать упущенное. Но у Магеллана есть и другая, более далекая и заветная цель: отыскать указанный в старинных картах пролив, пройти им Америку, выйти в океан, пересечь его и, таким образом, достигнуть сулящих богатство «островов пряностей», а затем продолжать плыть на запад для того, чтобы вернуться домой, объехав вокруг света.

Скоро Магеллану становится ясным, что географическая карта, на которой он основывал свои планы, неверна. Тем не менее он с холодным и жестоким упорством продол-

жает поиски пролива. Вспыхивает мятеж команды, недовольной самовластным правлением Магеллана. Магеллан жестоко подавляет его. Флотилия зимует в пустынной и холодной бухте. Снова поиски пролива. Один из кораблей разбился, другой дезертировал, но пролив найден. С тремя кораблями Магеллан пускается в плавание через Тихий океан. Сто дней продолжается это плавание. Кончатся все запасы продовольствия. Уже в пищу идет воловья кожа, которой во избежание перетирания были обернуты снасти. Цинга валит людей с ног одного за другим. Наконец, показывается земля. Это спасение для обессиленного экипажа. Невольник, некогда взятый с Молуккских островов, понимает язык туземцев. Итак, круг замкнулся. Еще несколько дней плавания и будут достигнуты заветные «острова пряностей».

Но во время вооруженной стычки с туземцами погибает Магеллан, и экспедиция лишается направляющей воли своего железного командира. Дисциплина среди испанцев быстро падает, над туземцами учиняются всяческие насилия, а те решают отомстить. Часть экипажа гибнет в западне, устроенной туземцами, которые приглашают испанцев на пир, а затем убивают. Так как людей уже не хватает на все три корабля, то один из кораблей сжигают.

Два судна, наконец, достигают Молуккских островов, этих вожделенных «островов пряностей». Трюмы кораблей до отказа набиваются корицей, мускатом и перцем, но один из кораблей дал течь, и его оставляют.

И вот уже только один, самый маленький из пяти кораблей, некогда вышедших из Испании, продолжает дальний путь. Пугливо обходят испанцы португальские гавани-крепости. Снова бури. Снова голод. Маленькое парусное суденышко огибает Африку и, едва избежав опасности быть захваченным португальцами, наконец достигает Севильи. Через три года, двигаясь все время на запад, оно вернулось обратно. А раз это так, то теперь уже нет никакого сомнения в том, что Земля — шар.

Но маленькое суденышко привезло еще одну истину. В течение всего плавания один из его участников, Пигафетта, вел записи. Изо дня в день, не пропуская ни одного дня, он записывал все, что видел. И вот оказывается, что на земле прошло на один день больше, чем на корабле. На корабле среда, а на земле четверг. Набожные испанцы — в ужасе: сами того не ведая, они передвинули дни праздников и постов. Спустя три года, ступив, наконец, на родную землю, участники плавания прежде всего спе-

шат замолить свой грех. Босиком, в белых саванах, с зажженными свечами идут моряки в церковь...

Но почему же получилось расхождение дат?

Один из спутников нашей юности — Жюль Верн — такое изменение дат обыгрывает увлекательно и изящно. Герой его романа «Вокруг света в восемьдесят дней» заключил пари, что за 80 дней сумеет объехать вокруг света. На пароходе, поезде, пешком, на слоне, через горы, пустыни и леса, не теряя даром и минуты, он пробивается на восток. Преодолены тысячи препятствий, и все же он возвращается в родной город, затратив сверх обусловленных 80 дней еще несколько часов. Ему кажется, что все труды пропали напрасно и пари проиграно. Но нет! Его преданный верный слуга узнает, что в городе еще «вчерашний день». В последнюю минуту путешественник является в назначенное место и выигрывает пари.

Каким образом он нашел один день? Почему это произошло? — Потому, что он объехал вокруг света, двигаясь все время *на восток*. За 80 суток своей бешеной гонки путешественник, двигаясь все время навстречу Солнцу, видел 81 восход Солнца. В его родном городе все жители *за то же время* видели только 80 восходов Солнца, и это помогло путешественнику выиграть пари.

Другой писатель рассказывает о том, что к некоему хозяину в один вечер пришли в гости два капитана, только что завершившие кругосветное плавание. Один из капитанов объехал вокруг света в западном, а другой — в восточном направлении. Оба капитана выехали из родного города в один день и оба вернулись в один и тот же день. Один из капитанов, — тот, который двигался на запад, — утверждает, что воскресенье будет завтра. Другой капитан, плывший на восток, утверждает, что воскресенье было вчера. А хозяин утверждает, что воскресенье сегодня.

Кто прав?

Эта история основана на ошибке. Был прав только хозяин дома. А почему был прав только он, это будет разъяснено через несколько страниц.

Где начинается новый год

Еще в конце I и начале II века нашей эры римский географ Марин Тирский для удобства ориентации на поверхности нашей планеты предложил на рисунках, изображающих Землю, нанести сетку из параллельных кру-

гов — «параллелей» и исходящих от полюсов дуг — «меридианов».

Самый большой из параллельных кругов назван экватором, ему приписан нулевой номер. Девяносто параллельных кругов, проведенных к северу от экватора, и девяносто, проведенных к югу от него, образуют градусы северной и южной *широты*.

Точно так же нужно было посчитать нулевым и какой-то из меридианов. В 1844 г. на Международном конгрессе в Вашингтоне было решено за нулевой меридиан принять тот, который проходит через обсерваторию г. Гринвича, расположенного в Англии, вблизи Лондона. При этом среднее солнечное время нулевого пояса выделяется и называется *Всемирным временем*, среднее время первого часового пояса называется *среднеевропейским* и т. д. Так, например, 180 меридианов, расположенных к востоку от гринвичского, и 180, расположенных к западу от него, называются градусами восточной и западной *долготы*. Длина дуги в один градус равна $1/360$ части длины окружности. Каждый градус делится на 60 частей, называемых угловыми минутами (или просто минутами), каждая минута — на 60 частей, которые называются угловыми секундами (или просто секундами).

Указание долготы (номера меридиана) и широты (номера параллели) какого-нибудь пункта точно определяет его положение на поверхности Земли. Так, например, координаты Москвы: $55^{\circ}48'$ северной широты и $37^{\circ}34'$ восточной долготы. Земля совершает полный оборот вокруг своей оси за сутки; таким образом, за один час она поворачивается на 15° . Когда в Москве полдень, то в месте, лежащем на 15° к востоку от нее, уже один час дня, а в пункте, расположенном на 15° западней, еще только 11 часов утра. Поэтому, если выверить часы в полдень по Солнцу в Москве, а затем определить, какое время эти же часы будут показывать в полдень в Ленинграде, то окажется, что в тот момент, когда Солнце над Ленинградом стоит в верхней точке и тень от предметов наиболее короткая, «московские» часы показывают 12 часов 35 минут. Отсюда следует, что Ленинград расположен на $8^{\circ}45'$ западнее Москвы.

Если бы мы жили по солнечному времени, то по мере передвижения на восток или запад приходилось бы непрерывно передвигать стрелки часов. Такое положение представляет большие неудобства для гражданской жизни и в особенности для железнодорожного транспорта. Вряд ли

нужно доказывать, что для нормальной работы железной дороги движение поездов должно быть точно согласовано во времени.

В 80-х годах прошлого века в Соединенных Штатах Америки, пытаясь преодолеть указанное затруднение, каждая железная дорога вводила свое «единое» время, действующее на данной дороге или на большом ее участке. В качестве «единого» выбиралось среднее время для данной территории. В результате этого образовалось около 75 различных систем счета времени и на некоторых узловых станциях стояло трое часов, указывающих время станции и время поездов, идущих на запад и на восток.

Такое положение становилось все более нетерпимым. В 1870 г. инженер канадских железных дорог Сандфорд Флеминг предложил ввести часовые пояса, проведя их через каждые 15° по долготе, начиная от гринвичского меридиана.

В 1883 г. этот проект был принят в США и Канаде, а затем и в других государствах. В нашей стране поясное время было введено 8 февраля 1919 г. декретом Совнаркома.

Поясное время установлено следующим образом: весь земной шар разбит на 24 часовых пояса по 15° в каждом (рис. 14). Внутри каждого пояса время считается одинаковым — среднепоясным. При переезде из одного пояса в другой стрелки часов передвигаются сразу на один час.

Поскольку для железных дорог даже такой скачкообразный перевод стрелок неудобен, все железные дороги Советского Союза пользуются единым московским временем («красная стрелка»). В самом деле, если этого не сделать, то на узловую станцию каждый поезд привозил бы свое время.

Таким же образом обстоит дело и с телеграфом. Если пользоваться местным временем, то телеграмма, посланная из Владивостока 1 июня рано утром, придет в Москву и будет доставлена адресату 31 мая поздно вечером, т. е. «на день раньше, чем вышла!» Действительно, когда во Владивостоке по местному («владивостокскому») времени 4 часа утра 1 июня, то в Москве по местному («московскому») времени еще 9 часов вечера 31 мая.

На часах всех стран, живущих по поясному времени, в один и тот же момент положение минутных стрелок совпадает, а часовых — различается на нуль или целое число часов. При этом разница времени поясов определяется достаточно просто, а внутри каждого из них отличие поясного

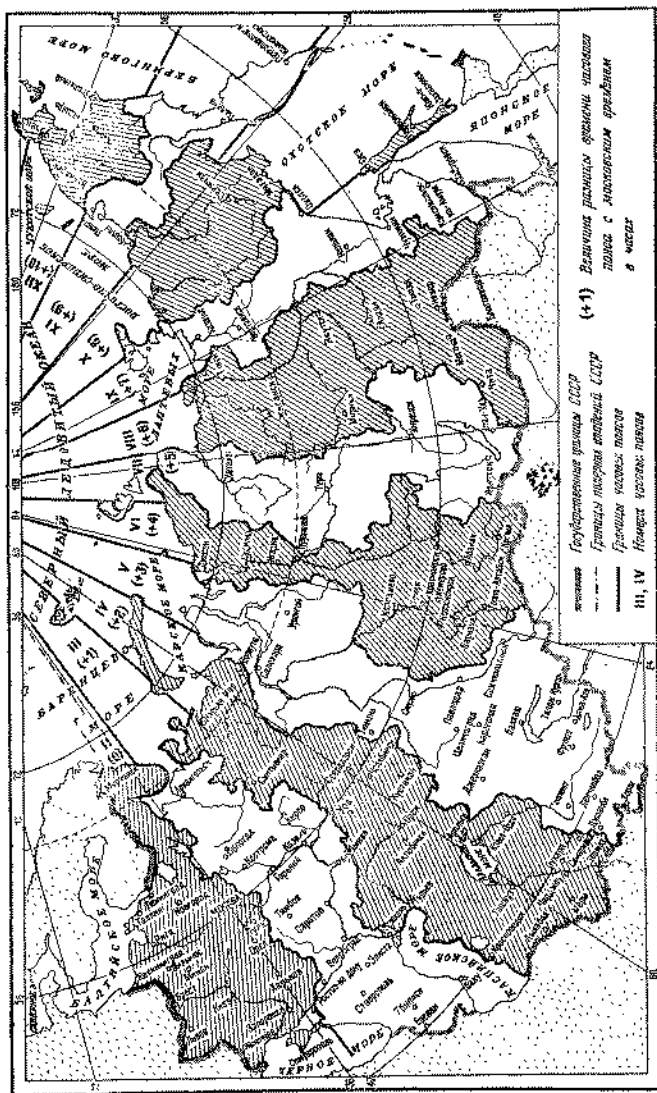


Рис. 14. Карта часовых поясов СССР

времени от солнечного меньше часа. Так, например, у жителей Варшавы, живущих по средневропейскому поясиному времени, часы «отстают» от московских. Напротив, в Тбилиси местное поясное время на один час впереди московского, а в дальневосточных областях Советского Союза Солнце встает на семь, восемь и девять часов раньше, чем в Москве. Когда в Москве по поясиному времени 12 часов дня, в Петропавловске-Камчатском — 9 часов вечера.

Границы часовых поясов не везде проведены точно по меридианам, так как иначе граничной линией иногда пересекались бы города и в разных концах одного и того же города было бы разное время. Границы часовых поясов большей частью проведены по рекам или иным естественным рубежам, а также с учетом административного деления территорий. Например, один из часовых поясов проходит по реке Каме, другой — по Оби и т. д.

Впрочем, мы, граждане Советского Союза, живем не по солнечному и не по поясиному, а по так называемому «декретному» времени, введенному декретом Совнаркома СССР от 16 июня 1930 г. из соображений удобства гражданской жизни и экономии электроэнергии. Согласно этому декрету часовые стрелки всех часов в СССР были передвинуты на один час вперед. Таким образом, декретное время равно поясиному плюс один час. Это обстоятельство необходимо учитывать, например, заказывая телефонный разговор с человеком, живущим в другой стране. Когда в Варшаве по местному поясиному времени 21 час, то в Москве по ее местному поясиному времени 22 часа, а по декретному, которым мы пользуемся, — 23 часа.

Среди граничных часовых линий есть такая, при переходе через которую наряду с изменением времени на один час производится и *изменение даты*. По условию эта линия проходит вблизи меридиана 180° между Азией и Америкой. Таким образом, день, а значит и новый год, начинается на Камчатке, потом в Сибири, затем в Европе и позже в Америке и на Аляске.

На корабле, пересекающем линию изменения даты в восточном направлении, одно и то же число месяца приписывается двум последовательным дням. Наоборот, при пересечении линии даты в западном направлении один день из счета выбрасывается.

Теперь легко получить ответы на все поставленные ранее вопросы. Спутники Магеллана, завершившие кругосветное путешествие, двигаясь все время на запад, «поте-

ряли» один день потому, что при пересечении 180-го меридиана они не выбросили из счета один день; например, после 14-го числа они должны были считать сразу 16-е, после среды — назвать следующий день пятницей.

Путешественник из романа Жюль Верна сделал аналогичную ошибку, но в другую сторону. Пересекая линию даты в восточном направлении, он должен был два дня подряд называть одинаково.

Наконец, теперь вполне ясна ошибка, содержащаяся в истории с тремя воскресеньями. Если бы каждый из капитанов при пересечении линии даты поступил правильно, т. е. один выбросил бы из счета день, а другой прибавил, то, встретясь в родном городе, все одинаково назвали бы день воскресным.

На полюсах, где сходятся все меридианы, поясное время теряет смысл. Поэтому арктические исследователи пользуются временем нулевого меридиана.

Разумеется, выбор нулевого меридиана и линии изменения даты *совершенно условны*, но, коль скоро такой выбор сделан, только строгое его соблюдение может обеспечить отсутствие путаницы и ошибок в обозначении часов и дней.

Точное время и ориентация в открытом море

Как научились моряки определять положение судна в открытом море? Какую роль играет при этом умение точно измерять время? В каких трудах и смелых путешествиях они завоевали нужные для этого знания?

Уже 200—250 лет назад закончилась эпоха великих географических открытий, кругозор человечества необычайно расширился, но далекое морское путешествие было по-прежнему трудным и рискованным. Когда корабль отправлялся в далекое плавание, то нередко на недели и месяцы земля скрывалась от глаз моряков. Кругом волны, над головой то Солнце, то звезды, тонкая дрожащая магнитная игла указывает, где север и юг...

Для того чтобы правильно проложить курс корабля, нужно точно знать, в каком месте он находится. А как это узнать в открытом море?

Определение широты местности не вызывает больших затруднений. Для этого достаточно в полдень, т. е. в момент, когда Солнце стоит выше всего, определить угол, под которым оно видно над горизонтом. Зная месяц и число,

с помощью соответствующих таблиц можно легко вычислить широту пункта, в котором производится определение. Аналогичные измерения возможно производить также по звездам.

Значительно труднее обстоит дело с определением географической долготы. В XVII—XVIII веках правительства стран, особенно заинтересованных в морской торговле, установили громадные премии для ученых и изобретателей, которые смогут найти удобный и достаточно точный способ определения географической долготы данной точки, например корабля в открытом море.

Испанский король Филипп III назначил за решение этой задачи вознаграждение в тысячу экю, а Генеральные Штаты Голландии установили премию в тридцать тысяч флоринов. В Англии в 1714 г. парламент единогласно утвердил билль об установлении крупных премий в 20, 15 и 10 тысяч фунтов стерлингов ученым, которые сумеют дать решение этой задачи. При английском парламенте была создана специальная комиссия по определению долгот, в которую вошли крупнейшие ученые: Исаак Ньютон, Самуил Кларк и др. Ньютон в докладе парламентской комиссии изложил суть проблемы и трудности, связанные с ее решением.

В чем же они заключаются?

Определить долготу данного пункта — значит узнать, на сколько угловых градусов, минут и секунд отстоит меридиан, проходящий через данную точку, от нулевого меридиана.

Будем с часами продвигаться от нулевого меридиана на восток. Остановимся в пункте, расположенном на 15-м градусе восточной долготы, и дождемся полудня. Полдень в этом пункте наступит в 12 часов по местному времени. В этом же пункте в этот же момент взятые нами с собой часы, идущие по времени нулевого меридиана, будут показывать только 11 часов утра. Это и понятно, так как мы передвинулись на $1/24$ часть земной окружности навстречу Солнцу. Если бы мы передвинулись на 30° к востоку, то разность местного времени и времени нулевого меридиана составила бы два часа, и т. д. То же самое справедливо для любых двух пунктов наблюдения, так что за начало отсчета не обязательно выбирать нулевой меридиан, можно выбрать меридиан Москвы или иной.

Таким образом, по разности местных времен двух пунктов наблюдения можно определить разность их долгот. Если к тому же известна долгота одного из пунктов

от нулевого меридиана, то можно определить долготу второго.

Итак, для определения долготы данного пункта наблюдения нужно знать местное время данного пункта и местное время другого пункта, долгота которого заранее точно известна.

Местное время данного пункта определяют с помощью несложных астрономических приборов. На кораблях для этого пользуются секстаном. Секстан — это прибор, предназначенный для измерения углов, под которыми Солнце или звезды видны над горизонтом. Он состоит из сектора окружности с градусными делениями, горизонтальной зрительной трубы и системы зеркал.

Во время наблюдений штурман одной рукой по возможности вертикально держит секстан и, смотря в зрительную трубу, другой рукой вращает линейку с зеркалом. Когда луч от наблюдаемого светила, отразившись от пары зеркал, попадает в глаз наблюдателя, то светило видно как бы находящимся на линии горизонта. При этом отсчет угла на приборе дает высоту светила над горизонтом. Штурман начинает наблюдения незадолго до полудня и, отсчитывая углы, под которыми видно Солнце, улавливает момент, когда оно видно под наибольшим углом. Этот момент является истинным полднем для данного места. Угол, под которым в этот момент видно Солнце, позволяет вычислить географическую широту пункта наблюдения. Для определения географической долготы нужно знать еще и местное время нулевого меридиана или какого-либо определенного пункта, например Москвы, Лондона и т. д.

Решение этой задачи представляет значительно больше трудности. Для того чтобы в данном пункте наблюдения узнать местное время нулевого меридиана, учеными предлагались различные способы. Один из этих способов заключается в наблюдении затмений Луны или Солнца. Лунные и солнечные затмения могут быть вычислены на много лет вперед. Моменты начала и окончания этих затмений достаточно точно известны для различных пунктов на Земле. Таким образом, в принципе этот метод позволяет решить поставленную задачу. Беда заключается в том, что лунные и солнечные затмения происходят сравнительно редко, а определения долготы нужно делать каждый день, каждую ночь. Поэтому практически этот метод непригоден.

Для определения времени в любом пункте предлагалось также воспользоваться наблюдением затмений спутников Юпитера. Спутников у Юпитера несколько, затмения их

происходят достаточно часто, наблюдать их можно с помощью простой зрительной трубы. Моменты затмений спутников Юпитера могут быть вычислены на много лет вперед. Благодаря большому расстоянию от Земли до Юпитера для всех точек земной поверхности моменты начала и окончания этих затмений наблюдаются практически одновременно. Но условия наблюдения этих затмений таковы, что трудно точно установить моменты начала и окончания затмений. Поэтому этот метод также не получил практического применения.

Для определения в данном пункте местного времени другого пункта, долгота которого известна, можно воспользоваться методом перевозки часов. В самом деле, если перед выходом в плавание установить часы по местному времени Москвы, Лондона или другого пункта, то в дальнейшем они могут служить для решения второй части задачи: показывать местное время пункта, долгота которого известна.

Впервые способ перевозки часов был предложен испанцем Санта-Крусом еще в 1510 г. Однако тогда еще и в помине не было подходящих для этой цели измерителей времени. Колесные часы были громоздкими и имели слишком низкую точность. Маятниковые — были изобретены лишь полстолетия спустя. К тому же после этого понадобилось еще около 150 лет для того, чтобы сделать их достаточно точными.

На сколько же лет или столетий мысль ученого должна опережать свое время для того, чтобы для науки польза от нее была наибольшей?

Итак, основная трудность метода перевозки часов заключается в том, что обычные часы для этого не годятся, так как погрешность их показаний слишком велика. Между тем ошибка в отсчете времени только на одну минуту в наших широтах соответствует просчету в расстоянии на 15 километров, а вблизи экватора — на 27,6 километра. При использовании обычных часов за много дней и недель плавания может накопиться столь большая ошибка в показаниях времени, что определение долготы с их помощью станет бесполезным.

Метод перевозки часов в принципиальном и практическом отношении не вызывает возражений, нужно лишь располагать достаточно точными часами.

Такие часы, как уже говорилось, были созданы английским часовым мастером Гаррисоном на основе изобретенной им температурной компенсации маятника.

В 1736 г. эти часы были установлены на военном корабле, шедшем в Лиссабон. По возвращении в Англию капитан корабля, внимательно наблюдавший в течение всего плавания за работой часов, письменно подтвердил, что они работали безукоризненно. Второй экземпляр часов, сделанных изобретателем, также с успехом выдержал испытания. За третий, еще более совершенный экземпляр часов Гаррисон в 1741 г. получил золотую медаль Лондонского Королевского общества.

Наконец, в 1761 г. английская парламентская комиссия долгот решила произвести еще одни испытания часов Гаррисона в тяжелых практических условиях на корабле в дальнем рейсе. «Пусть,— рассуждала комиссия,— эти часы выдержат бури и штормы океана, смену температуры и влажности от холодной, туманной Англии до горячих тропиков, и если после этого они все же будут показывать точное время и тем самым позволят правильно определить долготу, то метод и прибор могут считаться ценными...»

Для этих испытаний Гаррисон изготовил четвертый экземпляр часов. 18 ноября 1761 г. корабль «Депт форд» отплыл из Портсмута (Англия), взяв курс на Порт-Рояль (Ямайка). Во время испытаний, за 81 день плавания от Портсмута до Порт-Рояля, часы накопили ошибку всего в 5 секунд. Через 161 день корабль вернулся в Европу и прибыл в Портсмут. Ошибка часов не превышала нескольких секунд. Задача определения географической долготы в открытом море была решена.

С тех пор хронометр является обязательной принадлежностью каждого корабля. Один из корабельных хронометров всегда хранится в каюте капитана. При крушении прежде всего спасают хронометр и секстан, и это не мудрено, так как эти приборы позволяют морякам определить, в каком месте океана они находятся.

В настоящее время на кораблях метод отдельного определения широты и долготы места уже не применяется. Местонахождение корабля штурман определяет путем наблюдения группы звезд и построения двух или трех линий положения. Знание мирового времени при этом также необходимо. Для его определения применяются морские хронометры, погрешность которых в настоящее время составляет несколько сотых долей секунды.

Впрочем, теперь благодаря развитию радиосвязи хранение точного времени значительно упростилось. Каждый час по радио передаются сигналы точного времени, по которым каждый может выверить свои часы.

В 1937 г. И. Д. Папанин (руководитель экспедиции), гидролог П. П. Ширшов, геофизик Е. К. Федоров и радист Э. Т. Кренкель высадились у Северного полюса из самолета на льдину и в течение 274 дней дрейфовали на ней по Северному полярному бассейну. За это время льдина с четырьмя смелыми исследователями была вынесена дрейфом через пролив между Гренландией и Шпицбергенем в Гренландское море, где посланный навстречу ледокол поднял членов экспедиции на борт.

Во время этого дрейфа проводилась большая научно-исследовательская работа и, в частности, отбирались пробы океанской воды. При этом каждое измерение обязательно связывалось с определенным пунктом, географические координаты которого точно определялись. Таким образом, для проведения научной работы на льдине, для определения пути ее дрейфа, наконец, для отыскания льдины, когда пришло время взять смелых путешественников на борт ледокола, совершенно необходимым было знание непрерывно менявшихся географических координат дрейфующей станции. Основой для определения географических координат служило знание точного времени.

Формирование поверхности Земли. Плавающие материки

В чем заключается польза такого крайнего усовершенствования искусства измерения? Для большей части... законов существуют кажущиеся исключения, и это относится в особенности к тем случаям, когда наблюдения доходят до какого-либо крайнего предела... Почти наверное можно сказать, что подобные исследования приводят не к опровержению закона, а скорее к открытию новых фактов и законов, под влиянием которых и возникали кажущиеся исключения.

Мы должны искать наши будущие открытия в шестом десятичном знаке... Каждое средство, способствующее точности наблюдений, может явиться средством будущего открытия.

А. А. Майкельсон

В науке довольно часто бывает так, что для получения ответа на самые интересные и важные вопросы оказывается необходимым производить измерения с такой чувствительностью и точностью, которые лежат на пределе или даже за пределом, доступным известным методам и существующим измерительным приборам. Поэтому столь важным оказывается их усовершенствование.

Таких примеров можно привести много, в том числе и в области измерения времени. Рассмотрим среди них наиболее важные и интересные: проблему формирования поверхности Земли и задачу о неравномерности вращения Земли. В первую очередь обсудим вопрос о движении материков.

Проблема формирования поверхности Земли обсуждалась учеными уже давно. В конце XIX века по этому поводу установились определенные взгляды. Между тем в начале нашего века А. Вегенер выступил по этому вопросу с существенно новыми идеями, и возникла острая научная полемика, которая не вполне утихла и в наши дни. При этом обсуждались следующие вопросы: как в прошлом складывался лик Земли? Как получилось то расположение материков и та их форма, которые наблюдаются сейчас? Двигутся ли материки в настоящее время?

Оказывается, что для ответа на эти вопросы нужны *прецизионные измерения долгот* ряда пунктов поверхности Земли, а для этого как раз и необходимо уметь определять *моменты времени* с чрезвычайной точностью.

В данном случае большой интерес представляет и сама задача, и методы ее решения. Поэтому рассмотрим их несколько подробнее.

В 1915 г. А. Вегенер предложил новую гипотезу происхождения материков и океанов.

В то время уже существовало несколько теорий формирования лика Земли. Согласно одной из них считалось, что рельеф Земли в основном сформирован морем. Сторонники этой теории получили название нептунистов. Другая группа ученых, так называемых плутонистов, считала, что современный рельеф Земли сформировался в результате действия внутреннего жара нашей планеты и ее вулканической деятельности. Третьи основную роль в формировании рельефа Земли приписывали ее сжатию, происходящему в результате остывания. Теория сжатия (контракции) была подкреплена рядом существенных доказательств и в начале XX века получила решительный перевес над другими теориями. Несмотря на все различия этих теорий у них есть и общая черта: согласно им суша может вспучиваться и проваливаться, береговые линии могут разрушаться и нарастать, но при этом сами материки остаются *неподвижными*.

«Мне впервые пришла в голову мысль о перемещении материков, когда, изучая карту мира, я поразился сходством очертания берегов по обе стороны Атлантического

океана... В 1911 г. я познакомился с палеонтологическими данными о прошлой сухопутной связи между Бразилией и Африкой. Это побудило меня проанализировать результаты геологических и палеонтологических исследований, которые имеют отношение к этому вопросу. Изучив эти данные, я убедился в принципиальной правильности своей идеи...» *).

По Вегенеру современный рельеф Земли сформировался в результате перемещения, *плавания материков*. Вегенер утверждал, что некогда существовал праматерик — пангеа (это название образовано из греческих слов: пан — общий, Геос — Земля). Затем этот праматерик раскололся на части, которые, пlying по раскаленной вязкой магме, подстилающей их, постепенно отошли друг от друга и образовали отдельные материки.

Эта теория подкреплена рядом доказательств. Упомянем некоторые из них.

Геологические доказательства: сходство береговых линий Южной Америки и Африки; Северной Америки и Европы; Антарктиды, Австралии, Индостана и Южной Африки и т. д. Если глобус прикрыть кусочками кальки, вырезать очертания материков, а затем на глобусе же материки из кальки сдвинуть, то совпадение их выступов, выемок и изгибов оказывается поразительно хорошим.

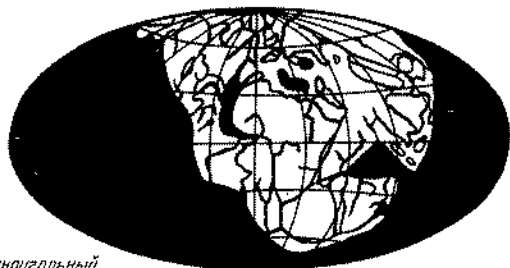
На рис. 15 приведена схема распада первичной суши на современные материки, взятая из книги В. А. Обручева «Основы геологии». Эта схема демонстрирует не только совпадение береговых линий, но и динамику распада.

Сопоставление типа и состава горных пород по обе стороны предполагаемого разрыва праматерика тоже дает ряд совпадений. Например, американские залежи каменного угля, как бы совершив скачок через океан, располагаются на непосредственном продолжении европейских.

Палеонтологические и биологические доказательства движения материков заключаются в найденном сходстве растительных и животных форм по обе стороны Атлантического океана. Аналогичное сходство биологи находят и в других частях света.

Сторонники теории неподвижных материков высказывают против теории Вегенера ряд возражений, тоже под-

*) Вегенер А. Возникновение материков и океанов.— М.: Госиздат, 1925.— С. 80.



*Каменноугольный
период*



*Третичный
период*



*Плейстоценовый
период*

Рис. 15. Схема распада первичной суши на современные материи

крепленными доказательствами. В первую очередь они указывают на то, что неоткуда взяться силам, достаточно мощным для того, чтобы вызвать столь значительные перемещения материков.

Современные сторонники теории Вегенера уточняют ее во многих пунктах, но безусловно поддерживают в основном — в том, что материи двигались миллионы лет назад и продолжают двигаться и сейчас. Таким образом, экспериментальная проверка современного перемещения материков, естественно, представляет большой научный интерес.

А. Вегенер пишет: «Если перемещения материков действительно происходили в течение продолжительного времени, то необходимо без дальнейших доказательств при-

нать, что они продолжают и в настоящее время; является только вопрос, достаточно ли быстро совершается движение, чтобы при помощи наших астрономических измерений в сравнительно небольшой промежуток времени оно могло обнаружиться». Далее: «Наибольших изменений во взаимном положении следует ожидать между Гренландией и Европой... Менее благоприятны условия определения разницы долгот между Европой и Северной Америкой... Здесь можно ожидать ежегодный прирост расстояния примерно в 1 м».

В начале нашего века такая проверка, т. е. повторное определение долгот ряда пунктов, производилась несколько раз. При этом соответствующие расчеты показали, что с течением времени долгота одного и того же пункта наблюдения изменяется. Однако некоторые ученые критиковали эти результаты, указывая на несовершенство методов определения долгот и, в частности, на недостаточную точность определения меток времени.

В самом деле, при определении долготы на широте экватора ошибке в отсчете времени на 1 мин соответствует искажение расстояния на 27,6 км, ошибке в 1 с — искажение на 460 м и ошибке в 0,001 с — на 0,46 м. В средних широтах ошибке в определении времени на 0,001 с соответствует погрешность в определении расстояния, равная 0,25 м.

Если, как предполагал Вегенер, Северная Америка отходит от Европы на 1 м в год, то для того, чтобы обнаружить этот эффект, нужно, производя измерения долготы некоторого пункта с интервалом в несколько лет, в то же время обеспечить погрешность определения моментов времени порядка тысячных долей секунды. Такой точности в наше время достигнуть уже удалось, однако это оказалось совсем не просто и потребовало немало научной выдумки и труда.

Точное определение долгот требует решения трех вспомогательных задач. Во-первых, *получения* моментов (или отметок) точного времени с помощью специальных астрономических наблюдений. Этим в обсерваториях занимаются работники служб времени. Второй вспомогательной задачей является определение точного времени в промежутках между астрономическими его определениями. Эта задача, которую можно назвать *хранением* времени, решается с помощью соответствующих приборов: астрономических часов высокой точности, а в последние годы также с помощью молекулярных и атомных часов.

Получение отметок точного времени и хранение точного времени производится в ряде обсерваторий и научных учреждений. Число таких служб времени относительно невелико. Между тем точное время необходимо знать не только в этих обсерваториях, но и в ряде других мест: в научных учреждениях, на кораблях, самолетах, в местах работы экспедиций и т. д. Поэтому третьей задачей является *передача* точного времени из тех мест, где его получают и хранят, в те места, где оно необходимо. При этом очень важно, чтобы высокая точность, достигнутая при получении точного времени, не была утрачена при его хранении и передаче.

Рассмотрим решения каждой из этих задач.

Получение, хранение и передача точного времени

Получение моментов точного времени

Моменты точного времени получают путем наблюдения определенных положений Солнца и звезд. Однако визирирование звезд дает более точные результаты. Поэтому при определении моментов обычно им и пользуются. Указанные измерения включают также и отсчет времени.

Ведя наблюдения звездного неба несколько ночей подряд, можно легко заметить, что звезды, сохраняя неизменным свое взаимное расположение, каждую следующую ночь восходят немного раньше, чем в предыдущую. Это происходит потому, что Земля наряду с суточным вращением вокруг своей оси совершает еще и годичное обращение вокруг Солнца. Поэтому видимое движение Солнца таково, что промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми, например верхними, кульминациями Солнца удлиняется на 3 минуты 56 секунд за сутки, что составляет 2 часа в месяц или сутки в год. Таким образом, звездные сутки короче солнечных. Впрочем, поскольку соотношение между солнечным и звездным временем известно, то переход от одного к другому не вызывает затруднений.

Наблюдение звезд для получения отметок точного времени производится с помощью «пассажного инструмента» (рис. 16), представляющего собой телескоп, в окуляре которого имеется крест нитей. Прибор состоит из трубы, которую можно поворачивать и устанавливать в нужном направлении, и круга с градусными делениями. При этом для удобства наблюдения оптическая система сделана так, что независимо от наклона вращающейся трубы наблюдатель всегда смотрит в горизонтальную трубу.

Пассажный инструмент устанавливается точно вдоль меридиана. Определение моментов времени производится путем наблюдения прохождения изображений звезд через нить окуляра.

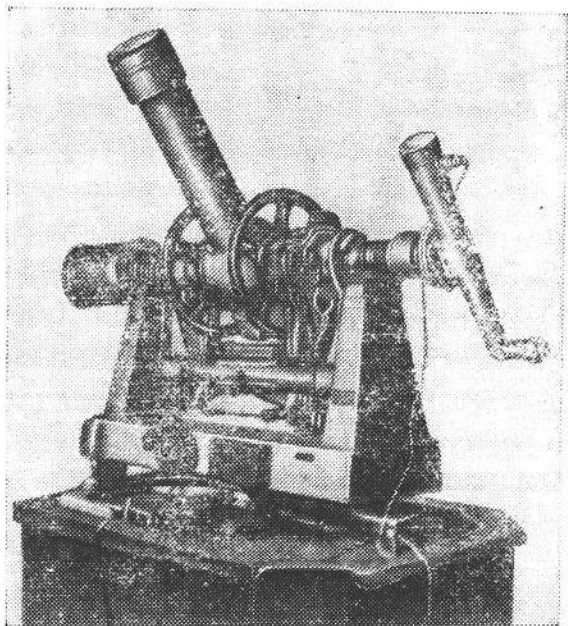


Рис. 16. Фотоэлектрический пассажный инструмент Московской службы времени

Вот эта, казалось бы, простая операция долгое время являлась основным источником снижения точности результатов измерений. Дело в том, что различные наблюдатели в зависимости от своего характера и темперамента ошибаются по-разному: один всегда немного запаздывает, другой всегда несколько торопится. По этому поводу Дж. Уитроу приводит следующий поучительный пример: «В 1796 г. астроном Ройал Маскелин уволил своего ассистента Киннебрука из-за того, что последний, казалось, был неточен в своих наблюдениях звездных смещений. Приблизительно двадцатью годами позднее Бесселю пришло в голову, что разница между наблюдениями двух астрономов могла быть обусловлена личными особенностями. В настоящее время общепризнано, что даже лучшие наблюдатели обычно отмечают прохождение звезды через фиксированное перекрестие астрономического инструмента немного раньше или немного позже на величину, которая варьирует от одного наблюдателя к другому и называется личным уравнением» *).

*) Уитроу Дж. Естественная философия времени.— М.: Прогресс, 1964.

Указанная выше ошибка может доходить до 0,1 с и составляет *личное уравнение наблюдателя*, учитываемое при точных измерениях.

Для снижения погрешности этих измерений был придуман целый ряд методов и приборов. Наиболее удобной оказалась комбинация из фотоэлектрического устройства и печатающего хронографа, которая позволила указать измерения автоматизировать. Фотоэлектрическое устройство состоит из визирной решетки, вставленной в окуляр пассажного инструмента и расположенного позади нее фотоумножителя. При перемещении изображения звезды в поле зрения прибора это устройство дает ряд коротких электрических сигналов.

Печатающий хронограф состоит из синхронного мотора, редуктора и вращающихся дисков с выпуклыми цифрами. Высокое постоянство частоты вращения синхронного мотора обеспечивается тем, что частота переменного тока, которым он питается, стабилизируется кварцевым генератором. В моменты прихода рабочих сигналов специальный молоточек резко ударяет по бумажной ленте и через машинописную ленту на очень короткое время прижимает ее к оцифрованным дискам. Таким образом, на ленте отпечатываются метки, соответствующие наблюдаемым сигналам, а также цифры, обозначающие минуты, секунды и доли секунд.

В последние годы астрономы для определения моментов времени все чаще применяют *фотографическую зенитную трубу* (рис. 17 и 18). Этот астрономический прибор состоит из двухлинзового объектива 1, установленного с помощью подшипников 2 на трубе 3. Труба расположена строго вертикально и закреплена на массивном каменном основании. Внизу расположено зеркало 4, представляющее собой слой ртути — так называемый ртутный горизонт. Вверху, под объективом, установлена небольшая фотографическая пластинка 5. Фотопластинка закреплена в кассете и обращена эмulsionей вниз.

Лучи света от наблюдаемой звезды, пройдя объектив, попадают на ртутный горизонт и, отразившись от него, собираются на фотопластинке. Экспозиция длится 10—30 с. При этом фотопластинке придается такое движение, что на ней изображение звезды получается точечным. Для того чтобы определить момент прохождения звезды через меридиан, ее фотографируют четыре раза. Первый раз — несколько ранее прохождения ее через меридиан, второй раз — тоже до прохождения через меридиан, но предвари-

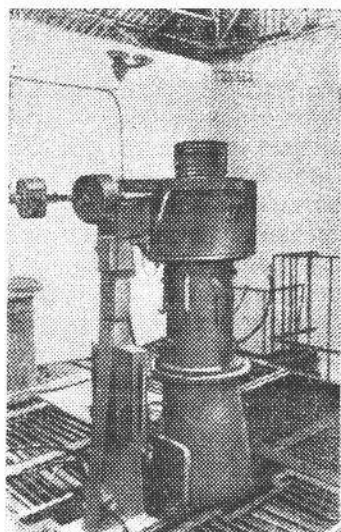


Рис. 17. Фотографическая зенитная труба

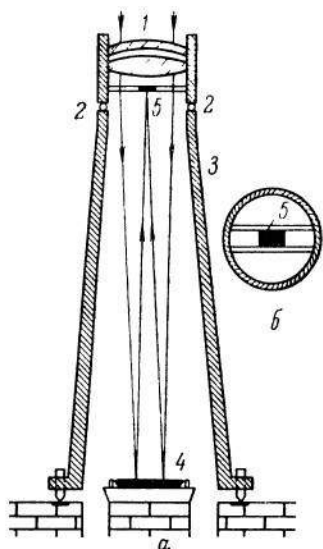


Рис. 18. Схема устройства фотографической зенитной трубы: а — ход лучей, б — кассета с фотопластинкой

тельно повернув объектив вместе с фотопластинкой на 180° относительно вертикальной оси. Перед третьей экспозицией объектив с фотопластинкой еще раз поворачивается на 180° и съемка производится уже после прохождения звезды через меридиан. Затем объектив снова поворачивается на 180° и производится четвертая экспозиция. Таким образом получаются четыре точечных изображения звезды, и несложное геометрическое построение позволяет определить на фотопластинке точку, в которой находилось бы изображение звезды, если бы съемка была произведена в момент прохождения звезды через меридиан.

При проведении всех этих измерений положение фотопластинки связывается с показаниями астрономических часов. Для этого обычно пользуются вспомогательным устройством, которое с помощью неоновой лампочки и диафрагмы с щелью позволяет впечатывать на ту же фотопластинку метки времени в виде черточек.

Как и всякое экспериментальное устройство, фотографическая зенитная труба не лишена недостатков, например: ей доступна лишь очень узкая зона обзора (меньше 1°); обработка фотографических изображений, получаемых в результате измерений, является довольно трудоемкой. Од-

нако она имеет и ряд существенных преимуществ по сравнению с пассажным инструментом, например отсутствие ошибок за счет неточного определения наклона прибора, исключение личной ошибки наблюдателя. Так как в фотографической зенитной трубе съемка полностью автоматизирована, то во время измерений наблюдателю нет необходимости находиться рядом, а это позволяет исключить еще и такой источник погрешности, как влияние тепла наблюдателя на измерительный прибор. Таким образом, по сравнению с пассажным инструментом, погрешность измерения моментов точного времени удалось снизить еще в несколько раз.

Напомним, что определение точного времени состоит из двух основных частей: наблюдения некоторых положений звезд с помощью телескопов (пассажного инструмента, зенитной трубы и т. п.) и фиксации этих положений во времени с помощью точных часов. В настоящее время погрешность определения положения одной звезды при одном наблюдении составляет около 0,2 угловой секунды и именно это, а не качество измерителей времени кладет предел дальнейшему снижению погрешности указанных измерений.

Точность определения положения звезды зависит от неоднородностей атмосферы и нестабильности оптико-механических систем телескопов. Между тем, хотя в последние годы были сделаны различные улучшения аппаратуры, существенного снижения суммарной погрешности этих измерений это не дало. По-видимому, это связано со значительной ролью атмосферных искажений.

Казалось, что таким образом положен предел дальнейшему увеличению точности определения моментов времени. Разумеется, это было бы весьма прискорбно, так как означало бы, что закрыт или затруднен прогресс изучения неравномерностей вращения Земли, а также ряда областей небесной механики, космической навигации и т. д. К счастью, это оказалось не так. В течение последних десятилетий был разработан и реализован новый очень мощный метод исследования небесных тел: РСДБ — *радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой*.

В методе РСДБ измерительная система состоит из двух или нескольких антенн, разнесенных на несколько тысяч километров, и базового телескопа. Каждая антенна оснащена устройством для записи улавливаемых ею радиосигналов (усилителем, магнитофоном) и атомным стандартом частоты и времени (о них см. далее с. 77—84). Атомный стан-

дарт частоты служит для получения меток времени, которые записываются на той же магнитной ленте, которая служит для фиксации радиосигналов от исследуемых космических объектов.

Если бы оптический телескоп имел гигантский объектив, то он обладал бы огромной светосилой и колоссальной разрешающей способностью. Если бы этот объектив был не сплошным, а состоял из двух кусков, разнесенных на большое расстояние, то его светосила соответствовала бы лишь площади этих кусков, т. е. была бы малой, между тем как разрешение было бы большим. Однако в обоих случаях неоднородность и нестабильность земной атмосферы сделали бы эти объективы малоэффективными.

Для радиоинтерферометра неоднородности и колебания земной атмосферы играют существенно меньшую роль. Поэтому в методе радиоинтерферометра со сверхдлинной базой высокое разрешение сочетается с большой эффективностью устройства. Путем измерения запаздывания прихода одного и того же фронта электромагнитной волны от далекого космического объекта в разные его антенны и при базе длиной в 5000 км этот прибор позволяет определить угловые координаты исследуемого объекта с погрешностью около $\pm 0,005$ угловой секунды. В соответствии с этим РСДБ, путем наблюдения *нескольких звезд*, позволяет определять моменты точного времени с погрешностью около миллиардной доли секунды.

В настоящее время с помощью РСДБ уже решаются такие задачи, как изучение неравномерностей вращения Земли, измерение движения материков, определение скорости вращения Галактики, а также многие задачи космического картирования, космической навигации и пр.

Хранение времени. Маятниковые и кварцевые часы

Получением моментов времени решается только первая задача службы времени. Следующей задачей является хранение точного времени в промежутках между астрономическими его определениями. Эта задача решается с помощью астрономических часов.

Еще не так давно для этой цели применялись механические маятниковые часы. Для того чтобы обеспечить большую точность отсчета времени, при их изготовлении

учитывались различные источники погрешности, а для их работы создавались наиболее благоприятные условия.

В таких часах самой существенной частью является маятник. Пружины и колесики служат передаточным механизмом, стрелки — указывающим, а отмеряет время маятник. Поэтому для обеспечения высокой точности такие часы помещают в глубокий подвал, защищают от сотрясений. В том помещении, где они находятся, круглый год поддерживается постоянная температура. Для уменьшения сопротивления воздуха и устранения влияния изменений атмосферного давления маятник таких часов помещают в кожух, в котором давление воздуха понижено до нескольких миллиметров ртутного столба (рис. 19).

Одним из лучших приборов такого рода в свое время были часы Шорта с двумя маятниками. В этих часах один — несвободный, или «рабский», — маятник связан с передаточными и указывающими механизмами, а сам управляется другим — свободным маятником, не связанным ни с какими колесами и пружинами (рис. 20).

Свободный маятник помещается в глубоком подвале в металлическом футляре. В этом футляре создается пониженное давление. Связь свободного маятника с несвободным осуществляется через два небольших электромагнита, вблизи которых качается свободный маятник. Последний управляет «рабским» маятником, заставляя его качаться в такт с собой.

Можно добиться очень малой погрешности показаний часов, но нельзя ее устранить полностью. Впрочем, если часы идут неверно, но заранее известно, что они спешат или отстают на определенное число секунд в сутки, то не представляет большого труда по таким неправильным часам вычислить точное время. Для этого достаточно знать, каков *ход часов*, т. е. на сколько секунд в сутки они спешат или отстают. В течение месяцев и лет для данного экземпляра астрономических часов составляются поправочные таб-

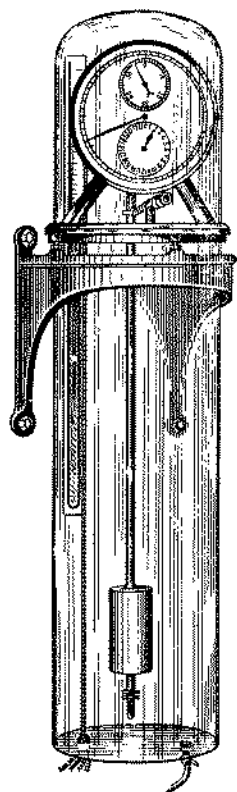


Рис. 19. Астрономические маятниковые часы

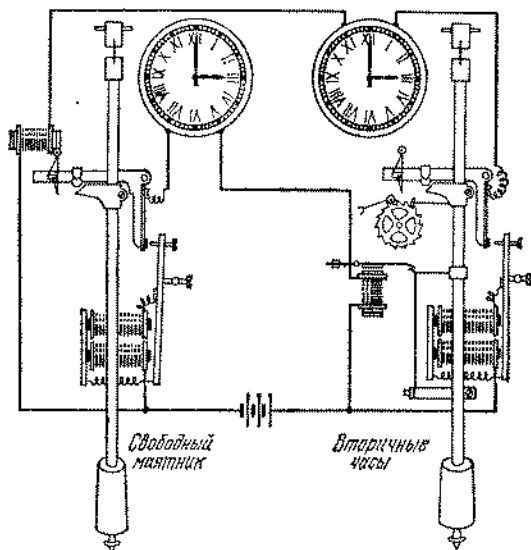


Рис. 20. Астрономические часы с двумя маятниками

лицы. Стрелки астрономических часов почти никогда не показывают время точно, но с помощью поправочных таблиц вполне удастся получать отметки времени с точностью в тысячные доли секунды.

К сожалению, ход часов не остается постоянным. При изменении внешних условий — температуры помещения и давления воздуха, — вследствие всегда имеющейся неточности изготовления деталей и срабатывания отдельных частей одни и те же часы с течением времени могут менять свой ход. Изменение, или *вариация*, хода часов является главным показателем качества их работы. Чем меньше вариация хода часов, тем часы лучше.

Таким образом, хорошие астрономические часы могут быть слишком торопливыми или чрезмерно медлительными, могут убежать вперед или отставать даже на десятые доли секунды в сутки, и все же с их помощью можно надежно хранить время и получать достаточно точные показания, если только характер их поведения постоянен, т. е. мала суточная вариация хода.

В маятниковых астрономических часах Шорта суточная вариация хода составляет 0,001—0,003 с. Долгое время столь высокая точность оставалась непревзойденной. В пятидесятых годах нашего века инженер Ф. М. Федченко усовершенствовал подвес маятника и улучшил его

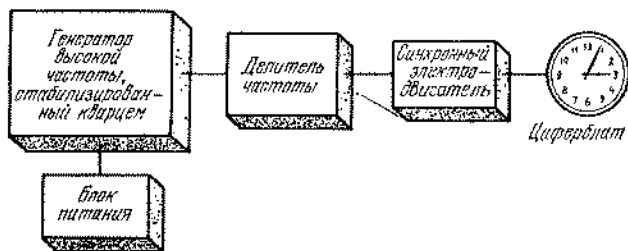


Рис. 21. Схема устройства кварцевых часов

термокомпенсацию. Это позволило ему сконструировать часы, у которых суточная вариация хода была снижена до 0,0002—0,0003 с. Однако ныне эти часы сохраняются лишь как реликвия, а для работы, т. е. хранения точного времени, используются астрономические часы других типов и основанные на других принципах.

В 1927 г. Моррисоном и Хортоном были разработаны и изготовлены часы, в которых для отсчета времени взамен колебаний маятника использовались упругие колебания кристалла кварца.

Пластинка, вырезанная соответствующим образом из кристалла кварца, обладает интересными свойствами. Если такую пластинку, называемую пьезокварцем, сжать или изогнуть, то на противоположных ее поверхностях появляются электрические заряды разного знака. Если к противоположным поверхностям пьезокварцевой пластинки подвести переменный электрический ток, то пьезокварц совершает колебания. Чем меньше затухание колебательного устройства, тем постояннее частота колебаний. Пьезокварц обладает в этом отношении исключительно хорошими свойствами, так как затухание его колебаний очень мало. Этим широко пользуются в радиотехнике для поддержания постоянства частоты радиопередатчиков. Это же свойство пьезокварца — высокое постоянство частоты колебаний — позволило построить очень точные часы. Эти часы состояли из радиотехнического генератора, стабилизированного пьезокварцем, каскадов деления частоты, синхронного электродвигателя и циферблата со стрелками-указателями (рис. 21).

Первые конструкции кварцевых часов были довольно громоздкими. Ведь собственная частота колебаний кварцевой пластинки относительно высокая, и для отсчета секунд и минут нужно снижать ее с помощью ряда каскадов деления частоты. Между тем применявшиеся для этого

ламповые радиотехнические устройства занимают много места. В современных кварцевых часах число каскадов деления частоты увеличено, а синхронный электродвигатель отсутствует.

В последние десятилетия бурно развивается полупроводниковая радиотехника и на ее основе разработана миниатюрная и микроминиатюрная радиоаппаратура. Это позволило построить малогабаритные переносные кварцевые часы для морской и воздушной навигации, а также для различных экспедиционных работ. Эти переносные кварцевые хронометры по своим размерам и весу не превышают обычные механические хронометры.

Большое постоянство частоты колебаний кварцевой пластинки обеспечивает равномерность хода и высокую точность показаний кварцевых часов. Поэтому для них нашлись и иные достаточно важные области применения. Так, например, если механический морской хронометр второго класса имеет суточную погрешность хода не более $\pm 0,4$ с, а первого класса — не более $\pm 0,2$ с, то современные кварцевые переносные хронометры имеют нестабильность суточного хода менее $\pm 0,01$ с и даже $\pm 0,001$ с. Между тем суточную нестабильность стационарных кварцевых измерителей времени удалось сделать менее $\pm 0,0001$ с, а в некоторых устройствах снизить даже вплоть до $\pm 0,000001$ с.

Однако кварцевые часы не лишены и серьезных недостатков: зависимости хода от температуры окружающей среды, а также изменений, происходящих в течение месяцев и лет в кварцевой пластинке и контактах, подводящих к ней электрический ток. С первым недостатком удалось справиться путем тщательного термостатирования той части часов, в которой расположена кварцевая пластинка. Старение кварца, приводящее к медленному дрейфу хода часов, пока устранить не удалось.

Молекулярные часы

Маятниковые и кварцевые астрономические часы позволили обнаружить, что вращение Земли происходит неравномерно. Таким образом эталон, на котором было основано измерение времени, оказался сомнительным.

Земной шар, вращающийся вокруг своей оси, можно рассматривать как гигантский маховик, вращающийся почти без трения в весьма разреженной среде. Таким об-

разом, равномерность его вращения должна быть исключительно высокой.

Откуда же берутся неравномерности вращения Земли? Соответствующие исследования показали, что их создает целый ряд процессов, например: приливное трение, перемещение больших масс внутри Земли при землетрясениях, колебания высоты и плотности атмосферы и др. Совокупное действие этих процессов приводит к тому, что относительная нестабильность вращения Земли достигает 10^{-8} , что соответствует изменению хода часов, основанных на суточном вращении Земли, на 1 с за 100 миллионов секунд, т. е. около 1 с за 3 года или около 0,001 с за сутки.

Очевидно, что измерение и изучение этих неравномерностей представляет большой интерес как для уточнения шкалы времени, так и для изучения процессов, происходящих внутри Земли и вблизи от ее поверхности. Однако для таких измерений нужно располагать достаточно точными часами, нестабильность которых должна быть существенно меньше исследуемой неравномерности вращения Земли.

Вот почему исследователи стали столь настойчиво искать пути дальнейшего увеличения точности и стабильности измерителей времени. В поисках подходящих для этого методов они обратились к системам, в которых источниками колебаний являются атомы и молекулы. Разумеется, этот выбор был не случайным. Ведь любые часы состоят из блока, в котором совершаются периодические колебания, счетного механизма для подсчета их числа и устройства, в котором запасена энергия, необходимая для их поддержания. Однако *точность показаний часов в основном зависит от стабильности работы того их элемента, который отмеряет время.*

Износ движущихся частей маятниковых часов, старение задающего элемента кварцевых часов, несмотря на всевозможные ухищрения, кладут предел дальнейшему увеличению их точности. Между тем атомы и молекулы не стареют и, по крайней мере в некоторых отношениях, их стабильность в миллиарды раз выше стабильности любых макроскопических устройств, воспринимающих или излучающих те или иные виды колебаний, например струн, камертонов, микрофонов и т. д.

Объясняется это тем, что в любых макроскопических устройствах, например машинах, измерительных приборах и т. д., силы, обеспечивающие их устойчивость, в

большинстве случаев лишь в десятки или сотни раз больше внешних сил. Поэтому с течением времени и при изменении внешних условий свойства таких приборов несколько изменяются. Музыкантам именно поэтому и приходится столь часто подстраивать свои скрипки и пианино. Напротив, в микросистемах, например атомах и молекулах, между частицами, их составляющими, действуют столь большие силы, что обычные внешние воздействия намного меньше их. Поэтому обычные изменения внешних условий — температуры, давления и т. д. — не вызывают сколько-нибудь заметных изменений внутри этих микросистем. Это и делает столь привлекательным использование их в качестве задающего элемента в астрономических часах.

Частота электромагнитных колебаний, испускаемых молекулами, очень высока. Например, в молекуле аммиака для одного из основных переходов она составляет 23 870 129 000 периодов в секунду. Частота электромагнитных колебаний, испускаемых различными атомами, бывает такого же порядка или еще выше. Ни одно механическое устройство для подсчета числа столь высокочастотных колебаний не годится. Более того, обычные электронные устройства тоже оказались для этого непригодными.

Выход из этих затруднений был найден с помощью оригинального обходного маневра. В длинную металлическую трубку (волновод) был помещен аммиачный газ. Для удобства обращения эта трубка была свернута в спираль. К одному концу этой трубки подводились от генератора высокочастотные электромагнитные колебания, а в другом ее конце был установлен прибор, измеряющий их интенсивность. Генератор позволял в некоторых пределах менять частоту возбуждаемых им электромагнитных колебаний.

До тех пор пока частота электромагнитных колебаний, вырабатываемых генератором, больше или меньше этой резонансной частоты, молекулы аммиака энергии не поглощают. При совпадении этих частот значительное число молекул аммиака поглощает электромагнитную энергию и переходит в возбужденное состояние. Разумеется, при этом (в силу закона сохранения энергии) у того конца волновода, где установлен измерительный прибор, интенсивность электромагнитных колебаний оказывается меньше. Если плавно изменять частоту генератора и записывать показания измерительного прибора, то *при резонансной частоте обнаруживается провал интенсивности электромагнитных колебаний.*

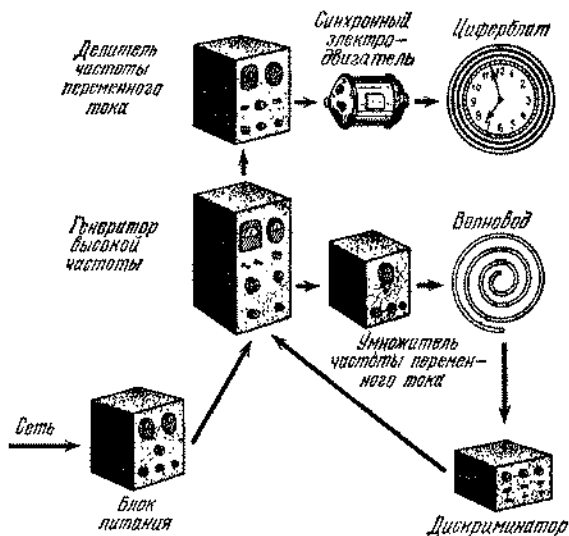


Рис. 22. Схема устройства молекулярных часов

Следующий шаг в конструировании молекулярных часов как раз и заключается в использовании этого эффекта. Для этого было собрано специальное устройство (рис. 22). В нем генератор высокой частоты, снабженный блоком питания, вырабатывает высокочастотные электромагнитные колебания. Для увеличения постоянства частоты этих колебаний генератор стабилизирован с помощью пьезокварца. В существующих приборах такого типа частота колебаний генератора высокой частоты выбирается равной нескольким сотням тысяч периодов в секунду в соответствии с собственной частотой колебаний используемых в них кварцевых пластинок. Так как эта частота слишком высока для того, чтобы непосредственно управлять каким-либо механическим устройством, то с помощью блока деления частоты она понижается до нескольких сот колебаний в секунду и лишь после этого подается на сигнальные реле и синхронный электродвигатель, вращающий стрелки-указатели, расположенные на циферблате часов. Таким образом, эта часть молекулярных часов повторяет схему описанных ранее кварцевых часов.

Для того чтобы возбудить молекулы аммиака, часть электромагнитных колебаний, вырабатываемых генератором высокой частоты, подается на умножитель частоты переменного тока (см. рис. 22). Коэффициент умножения частоты

ты в нем выбран так, чтобы довести ее до резонансной. С выхода умножителя частоты электромагнитные колебания поступают на волновод с аммиачным газом. Прибор, стоящий на выходе волновода, — дискриминатор — отмечает интенсивность прошедших через волновод электромагнитных колебаний и воздействует на генератор высокой частоты, изменяя частоту возбуждаемых им колебаний. Дискриминатор устроен так, что когда на вход волновода поступают колебания с частотой ниже резонансной, то он подстраивает генератор, увеличивая частоту его колебаний. Если же на вход волновода поступают колебания с частотой выше резонансной, то он снижает частоту генератора. При этом настройка в резонанс получается тем более точной, чем круче идет кривая поглощения. Таким образом, желательнее, чтобы провал интенсивности электромагнитных колебаний, обремененный резонансному поглощению их энергии молекулами, был возможно более узким и глубоким.

Все эти связанные между собой приборы — генератор, умножитель, волновод с аммиачным газом и дискриминатор — представляют собой цепь *обратной связи*, в которой молекулы аммиака возбуждаются генератором и в то же время управляют им, заставляя его вырабатывать колебания нужной частоты. Таким образом, в конечном счете в молекулярных часах в качестве стандарта частоты и времени используются молекулы аммиака.

В первых молекулярных аммиачных часах, разработанных по этому принципу Г. Лионсом в 1953 г., нестабильность хода составляла около 10^{-7} , т. е. изменение частоты не превышало десятиллионной доли. В дальнейшем нестабильность была снижена до 10^{-8} , что соответствует ошибке в измерении интервалов времени в 1 с за несколько лет.

В общем, это, конечно, прекрасная точность. Однако оказалось, что в построении прибора кривая поглощения электромагнитной энергии получилась далеко не столь резкой, как предполагалось, а несколько «размазанной». Соответственно этому и точность всего устройства получилась значительно ниже ожидавшейся. Проведенные в последующие годы тщательные исследования этих молекулярных часов позволили выяснить, что их показания в некоторой мере зависят от конструкции волновода, а также от температуры и давления находящегося в нем газа. Было установлено, что именно эти эффекты являются источниками нестабильности работы таких часов и ограничивают их точность.

В дальнейшем эти дефекты молекулярных часов полностью устранить так и не удалось, но поиски, которые велись в этом направлении, привели к созданию нового и значительно более совершенного прибора: атомно-лучевых цезиевых часов.

Атомно-лучевые цезиевые часы

Последующего усовершенствования стандартов частоты и времени удалось достигнуть на основе ясного понимания причин недостатков аммиачных молекулярных часов. Напомним, что основными недостатками аммиачных молекулярных часов являются некоторая «размазанность» резонансной кривой поглощения и зависимость показаний этих часов от температуры и давления газа в волноводе.

Каковы же причины этих дефектов? Можно ли их устранить? Оказалось, что размазывание резонанса происходит в результате теплового движения частиц газа, заполняющих волновод. Ведь в волноводе этих часов молекулы аммиака совершают хаотические движения, в результате которых некоторые из газовых частиц движутся *навстречу* электромагнитной волне, и поэтому для них частота колебаний несколько выше той, которую дает генератор. Другие газовые частицы, напротив, движутся *от* проходящей электромагнитной волны, как бы убегают от нее; для них частота электромагнитных колебаний несколько ниже номинальной. Лишь для относительно очень небольшого числа неподвижных газовых частиц воспринимаемая ими частота электромагнитных колебаний равна номинальной, т. е. даваемой генератором.

Описанное явление представляет собой хорошо известный продольный эффект Доплера. Именно этот эффект и приводит к тому, что резонансная кривая уплощается и размазывается и обнаруживается зависимость силы тока на выходе волновода от скорости движения газовых частиц, т. е. от температуры газа.

В конце 50-х и начале 60-х годов нашего века группе ученых из Американского бюро стандартов удалось справиться с этими трудностями. Однако то, что они сделали, в общем оказалось новым и значительно более точным стандартом частоты и времени, хотя при этом были использованы некоторые уже известные вещи. В этом приборе применяются уже не молекулы, а атомы. Эти атомы не просто заполняют сосуд, а движутся пучком. Причем так, что *направление их движения перпендикулярно к направлению*

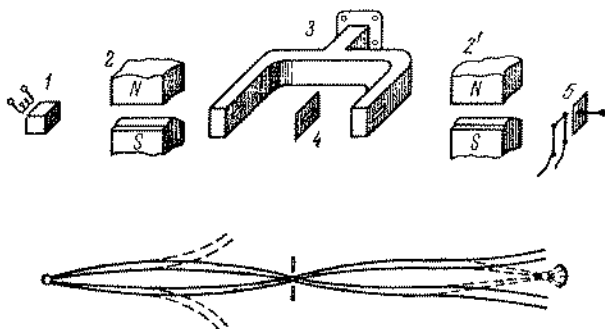


Рис. 23. Схема атомно-лучевого цезиевого генератора

распространения электромагнитной волны. Легко понять, что в этом случае продольный эффект Доплера отсутствует или, говоря более строго, почти отсутствует, так как пучок имеет конечную ширину и электромагнитные волны по отношению к нему не строго перпендикулярны. Впрочем, связанные с этим искажения очень малы и создают добавочную нестабильность не более 10^{-12} — 10^{-14} .

В приборе использованы атомы цезия, для которого резонансная частота одного из переходов равна 9 192 631 770 периодов в секунду. Соответствующее устройство смонтировано в трубке, в одном конце которой расположена электрическая печь 1, разогревающая металлический цезий вплоть до испарения, а в другом — детектор 5, сосчитывающий число долетевших до него атомов цезия (рис. 23). Между ними находятся: первый магнит 2, волновод 3, подводящий высокочастотные электромагнитные колебания, коллиматор 4 и второй магнит 2'. Когда печь включена, то пары металла через щель врываюся в трубку и узкий пучок атомов цезия летит вдоль ее оси, подвергаясь по пути воздействию магнитных полей, созданных постоянными магнитами, и высокочастотного электромагнитного поля, подведенного с помощью волновода от генератора к трубке так, что направление распространения волн перпендикулярно к направлению пролета частиц.

Такое устройство позволяет решить первую часть задачи: возбудить атомы, т. е. перевести их из одного энергетического состояния в другое, и в то же время почти полностью избежать продольного эффекта Доплера. Если бы исследователи ограничились только этим усовершенствованием, то точность прибора хотя и увеличилась бы, но незначительно. Ведь в пучке атомов, вылетающих из накаливаемого

источника, всегда есть атомы, находящиеся в различных состояниях. Поэтому добавление к атомам, уже находящимся в данном, например возбужденном, состоянии, еще некоторого количества таких же атомов не изменило бы существенно соотношение между числом атомов в том и в другом состоянии.

Итак, возникает дополнительная задача: на участке от источника до электромагнитного поля пропустить атомы, находящиеся в нормальном состоянии, и изъять возбужденные. Для ее решения ничего нового изобретать не пришлось, так как еще в 40-е годы нашего века И. И. Рабби, а затем Н. Ф. Рамзеем соответствующие методы были разработаны для спектроскопических исследований. Эти методы основаны на том, что все атомы и молекулы имеют определенные электрические и магнитные свойства и эти свойства оказываются различными у возбужденных и невозбужденных частиц. Поэтому в электрическом и магнитном полях возбужденные и невозбужденные атомы и молекулы отклоняются по-разному.

В описываемых атомных цезиевых часах на пути пучка частиц между источником и высокочастотным электромагнитным полем постоянный магнит 2 (см. рис. 23) был установлен так, что невозбужденные частицы фокусировались на щель коллиматора, а возбужденные выводились из пучка. Второй магнит 2', расположенный между высокочастотным электромагнитным полем и детектором, напротив, был установлен так, что из пучка выводились невозбужденные частицы, а на детекторе фокусировались только возбужденные. Такая двойная сепарация приводит к тому, что детектора достигают лишь те частицы, которые до вхождения в электромагнитное поле были невозбужденными, а затем в этом поле перешли в возбужденное состояние. При этом зависимость показаний детектора от частоты электромагнитных колебаний оказывается очень резкой и соответственно резонансная кривая поглощения электромагнитной энергии получается очень узкой и крутой.

В результате описанных мероприятий задающий блок атомно-лучевых цезиевых часов оказался способным реагировать даже на очень малую расстройку генератора высокой частоты, и таким образом была достигнута очень высокая точность стабилизации.

Остальная часть прибора в общем повторяет принципиальную схему молекулярных часов: генератор высокой частоты управляет электрическими часами и одновременно через цепи умножения частоты возбуждает частицы.

Дискриминатор, связанный с цезевой трубкой и высокочастотным генератором, реагирует на работу трубки и подстраивает генератор так, чтобы частота вырабатываемых им колебаний совпадала с частотой, при которой происходит возбуждение частиц.

Все это устройство в целом носит название *атомно-лучевых цезиевых часов*.

В первых моделях цезиевых часов (например, цезиевых часах Национальной физической лаборатории Англии) нестабильность составляла лишь 10^{-9} . В приборах такого типа, разработанных и построенных в последние годы, нестабильность удалось снизить до 10^{-12} — 10^{-13} .

Ранее уже говорилось о том, что даже лучшие механические астрономические часы вследствие износа их деталей с течением времени несколько меняют свой ход. Даже кварцевые часы не лишены этого недостатка, так как из-за старения кварца имеет место медленный дрейф их показаний. В атомных цезиевых часах дрейф частоты не обнаружен.

При сравнении различных экземпляров этих часов между собой наблюдалось совпадение частоты их колебаний в пределах $\pm 3 \cdot 10^{-12}$, что соответствует ошибке лишь в 1 секунду за 10 000 лет.

Однако и это устройство не лишено недостатков: искажения формы электромагнитного поля и относительная кратковременность его воздействия на атомы пучка ограничивают дальнейшее увеличение точности измерения интервалов времени с помощью таких систем.

Часы с квантовым генератором

Еще один шаг в отношении увеличения точности измерения интервалов времени был сделан с помощью приборов, в которых используется *излучение молекулами и атомами электромагнитных волн*.

Это открытие было неожиданным и закономерным. Неожиданным — потому, что казалось, что возможности старых методов исчерпаны, а других нет. Закономерным — потому, что ряд известных эффектов уже составлял почти все части нового метода и оставалось *только* должным образом эти части скомбинировать. Впрочем, новая комбинация известных вещей составляет суть многих открытий. Всегда нужна большая смелость мышления для того, чтобы ее придумать. Довольно часто после того, как это сделано, все кажется очень простым.

Приборы, в которых для получения стандарта частоты используется излучение молекул, получили название мазеров; это слово образовано из начальных букв выражения: *microwave amplification by stimulated emission of radiation*, т. е. усиление радиоволн сантиметрового диапазона с помощью индуцированного излучения. В настоящее время приборы такого типа чаще всего называют квантовыми усилителями или *квантовыми генераторами*.

Что подготовило открытие квантового генератора? Каков его принцип действия и устройство?

Для наблюдения и использования молекулярного излучения система типа волновода молекулярных часов оказалась полностью непригодной. Ведь в таком волноводе невозбужденных частиц амплитуда намного больше, чем возбужденных, и даже с учетом индуцированного излучения акты поглощения электромагнитной энергии происходят значительно чаще, чем акты испускания. К тому же неясно, как в таком волноводе выделить энергию, излученную молекулами, когда тот же объем заполнен электромагнитным излучением от генератора, причем это излучение имеет ту же частоту и значительно большую интенсивность.

Не правда ли, все процессы оказываются настолько перемешанными, что на первый взгляд выделить из них нужный представляется невозможным? Однако это не так, и в 1954—1955 гг. эта задача была блестяще решена Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР и Гордоном, Цайгером и Таунсом в США *).

Итак, нужно было суметь из смеси возбужденных и невозбужденных молекул, их спонтанного и индуцированного излучения, а также электромагнитного излучения той же частоты, подведенного извне, извлечь только электромагнитное излучение, испускаемое молекулами.

Если бы добрый джин, вылезши из бутылки и произнес традиционные: «Слушаю и повинуюсь», — убрал куда-нибудь все частицы, населяющие нижний уровень энергии, или перенес в другое место все частицы, населяющие верхний уровень энергии, то были бы созданы оптимальные условия для испускания нужного молекулярного излучения и его последующего выделения. Разумеется, если бы джин позаботился о том, чтобы оба эти процесса были реализованы одновременно, то сепарация была бы еще лучше.

*) *Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H. The Maser — A Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard and Spectrometer // Phys. Rev. — 1955. — № 99. — С. 1264.*

Именно этого и удалось добиться и вот каким образом: исследователи воспользовались тем, что электрическое состояние возбужденных и невозбужденных молекул аммиака несколько различно и вследствие этого *в неоднородном электрическом поле на возбужденные и невозбужденные молекулы аммиака действуют разные силы, направленные в различные стороны.* В неоднородном электрическом поле на возбужденную молекулу аммиака действует сила, направленная в ту сторону, где электрическое поле меньше, а на невозбужденную — в ту сторону, где электрическое поле имеет максимальную величину.

Указанные идеи были реализованы в *квантовом генераторе* на пучке молекул аммиака. Молекулярный генератор на аммиаке дает очень узкую линию излучения. Построенные на его основе «молекулярные часы», т. е. стандарт частоты и времени, обладают хорошей стабильностью и воспроизводимостью. В первых моделях таких часов нестабильность была около $\pm 10^{-10}$; в современных — она меньше $\pm 10^{-11}$.

Дальнейшее улучшение стандартов частоты и времени было достигнуто на основе этих же идей и использования в качестве рабочего тела некоторых других частиц, например таллия и водорода. При этом особенно перспективным оказался квантовый генератор, работающий на пучке атомов водорода, разработанный и построенный в начале шестидесятых годов Г. М. Гольденбергом, Д. Клепнером и Н. Ф. Рамзеем. Этот генератор также состоит из источника частиц, сепаратора и резонатора, смонтированных в трубке (рис. 24), погруженной в соответствующий хладагент. Источник испускает пучок атомов водорода. В этом пучке имеются невозбужденные и возбужденные атомы водорода, причем невозбужденных значительно больше, чем возбужденных.

Так как возбужденные атомы водорода отличаются от невозбужденных своим магнитным состоянием (магнитным моментом), то для их сепарации используется уже не электрическое, а магнитное поле, создаваемое парой магнитов.

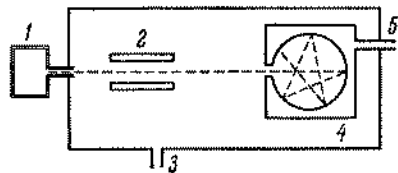


Рис. 24. Схема водородного квантового генератора: 1 — баллон с водородом, 2 — сепаратор частиц, 3 — отверстие для откачки, 4 — резонатор, 5 — волновод

Существенными особенностями обладает и резонатор водородного генератора. Он выполнен в виде колбы из плавляемого кварца, внутренние стенки которой покрыты парафином. Благодаря многократным (около 10 000) упругим отражениям атомов водорода от слоя парафина длина пролета частиц и соответственно время их пребывания в резонаторе по сравнению с молекулярным генератором увеличивается в тысячи раз. Таким образом удается получить очень узкие спектральные линии излучения атомов водорода и по сравнению с молекулярным генератором снизить нестабильность всего устройства еще в тысячи раз.

Современные конструкции астрономических часов с водородным квантовым генератором по своим показателям превзошли цезевый атомно-лучевой стандарт. *Систематический дрейф у них не обнаружен*. Их кратковременная нестабильность составляет лишь $6 \cdot 10^{-14}$ в минуту, а долгосрочная — $2 \cdot 10^{-14}$ за сутки, что в десять раз меньше, чем у цезевого стандарта. Воспроизводимость показаний часов с водородным квантовым генератором равна $\pm 5 \cdot 10^{-13}$, в то время как у цезевого стандарта воспроизводимость равняется $\pm 3 \cdot 10^{-12}$. Следовательно, и по этому показателю водородный генератор приблизительно в десять раз лучше. Таким образом, с помощью водородных астрономических часов можно обеспечить точность измерения времени порядка 1 с за интервал около сотни тысяч лет.

Между тем ряд исследований последних лет показал, что эта столь высокая точность измерения интервалов времени, достигнутая на основе атомно-лучевых генераторов, еще не является предельной и может быть повышена.

С помощью устройств такого типа в Физическом институте им. П. Н. Лебедева в Москве уже удалось создать стандарт частоты с относительной стабильностью около $\pm 10^{-14}$, и предполагается, что удастся довести относительный предел стабильности до $\pm 10^{-16}$, в то время как теоретический предел относительной стабильности, обусловленный квантовыми и тепловыми флуктуациями, для устройств такого рода составляет около $\pm 10^{-17}$. С помощью приборов такого типа в Национальном бюро стандартов (США) уже удалось получить новое значение скорости света ($c = 299\,792\,460$ м/с) с точностью до девяти значащих цифр*).

*) Басов Н. Г., Беленов Э. М. Сверхузкие спектральные линии и квантовые стандарты частоты // Природа.— 1972.— № 12.

Столь высокая точность измерения времени открывает дополнительные возможности для решения некоторых научных задач, например, об изменении мировых констант, гравитационном смещении частоты и др.

Передача точного времени

Получением и хранением точного времени задача службы времени не ограничивается. Не менее важной ее частью является такая организация передачи точного времени, при которой эта точность не была бы утрачена.

В старину передача сигналов времени производилась с помощью механических, звуковых или световых устройств. В Петербурге ровно в полдень стреляла пушка; можно было также сверить свои часы по башенным часам Института метрологии, ныне носящего имя Д. И. Менделеева. В морских портах в качестве сигнала времени употреблялся падающий шар. С кораблей, стоящих в порту, можно было видеть, как ровно в полдень шар срывался с вершины специальной мачты и падал к ее подножию.

Для нормального хода современной интенсивной жизни очень важную задачу представляет обеспечение точным временем железных дорог, почты, телеграфа и больших городов. Здесь не требуется столь высокая точность, как при астрономических и географических работах, но необходимо, чтобы с точностью до минуты во всех частях города, во всех концах нашей огромной страны все часы показывали время одинаково. Эта задача обычно решается с помощью электрических часов.

В часовом хозяйстве железных дорог и учреждений связи, в часовом хозяйстве современного города электрические часы играют большую роль. Устройство их очень простое, и тем не менее с точностью до одной минуты во всех пунктах города они показывают одинаковое время.

Электрические часы бывают первичные и вторичные. Первичные имеют маятник, колеса, слух и являются настоящими измерителями времени. Вторичные являются лишь указателями: часового механизма в них нет, а имеется лишь сравнительно простое устройство, передвигающее стрелки раз в минуту (рис. 25). При каждом размыкании тока электромагнит отпускает якорь и прикрепленная к якорю «собачка», упираясь в храповое колесо, поворачивает его на один зуб. Сигналы электрического тока подаются на вторичные часы либо от центральной установки, либо от первичных электрических часов.

В последнее время в области хранения и передачи точного времени были реализованы существенно новые идеи. Предположим, что нужно, чтобы в ряде пунктов какой-либо территории погрешность показаний стоящих там часов была не хуже ± 30 с при условии непрерывной работы всех этих часов в течение года. Такие требования предъявляются, например, к городским и железнодорожным часам. Требования не очень жесткие, однако для того, чтобы их выполнить с помощью *автономных* часов, нужно, чтобы суточный ход каждого экземпляра часов был лучше $\pm 0,1$ с, а для этого требуются прецизионные кварцевые хронометры.

Между тем, если для решения этой задачи используется *система единого времени*, состоящая из первичных часов и большого числа связанных с ними вторичных часов, то высокой точностью должны обладать лишь первичные. Следовательно, даже при повышенных затратах на первичные часы и соответственно малых на вторичные можно во всей системе обеспечить хорошую точность при относительно небольшой общей стоимости.

Конечно, при этом нужно сделать так, чтобы вторичные часы сами не вносили ошибок. Описанные ранее вторичные часы с храповым колесом и собачкой, в которых по сигналу раз в минуту передвигается стрелка, иногда дают сбоя. Причем с течением времени ошибка их показаний накапливается. В современных вторичных часах применяется различного рода проверка и коррекция показаний. Еще большую точность обеспечивают вторичные часы, в которых используется переменный ток промышленной частоты (50 Гц), которая строго стабилизирована. Основной частью этих часов является синхронный электродвигатель, приводимый в движение переменным током. Таким образом, в этих часах сам переменный ток является непрерывным сигналом времени с периодом повторения 0,02 с.

В последние годы появились говорящие часы, сконструированные по принципу звукового кино, которые не только показывают, но и сообщают время.

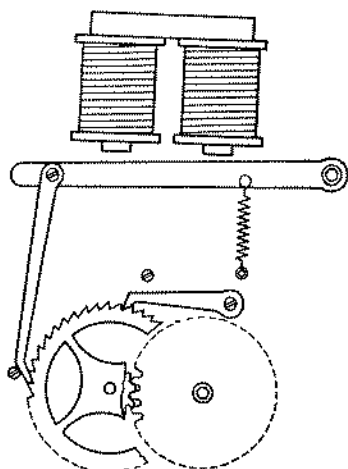


Рис. 25. Механизм вторичных электрических часов

Для передачи *точного времени* ныне служат главным образом электрические сигналы, посылаемые с помощью телефона, телеграфа и радио. В течение последних десятилетий техника их передачи совершенствовалась, а точность соответственно возрастала. В 1904 г. ритмические сигналы времени были переданы с Парижской обсерватории и приняты обсерваторией Монсури с погрешностью около 0,02—0,03 с. В 1905 г. регулярную передачу сигналов времени начала Вашингтонская морская обсерватория, с 1908 г. стали передавать ритмические сигналы времени с Эйфелевой башни, а с 1912 г.— и с Гринвичской обсерватории.

В СССР передача радиосигналов точного времени начала с 1 декабря 1920 г., когда Пулковская обсерватория организовала их ежедневную трансляцию.

В настоящее время передача сигналов точного времени ведется во многих странах. В СССР такие передачи ведут несколько специальных учреждений. При этом для передачи по радио показаний среднего солнечного времени используется целый ряд различных программ. Например, широкоэвещательная программа сигналов времени передается в конце каждого часа и состоит из шести коротких импульсов. Начало последнего из них соответствует времени того или иного часа и 00 мин 00 с. В морской и воздушной навигации применяется программа из пяти серий по 60 импульсов и трех серий по шесть коротких сигналов, разделенных более длинными сигналами. Кроме того, есть еще ряд специальных программ сигналов времени. Сведения о различных специальных программах сигналов точного времени публикуются в специальных изданиях. Погрешность передачи сигналов времени по широкоэвещательным программам составляет около $\pm 0,01$ — $0,001$ с, а по некоторым специальным $\pm 10^{-4}$ и даже $\pm 10^{-5}$ с.

В последние годы разработана и уже действует программа передачи сигналов точного времени по телевидению с погрешностью не более 1 микросекунды. Использование для этой цели искусственных спутников Земли также позволило обеспечить передачу сигналов времени с погрешностью до 10^{-6} с.

Несколько лет назад в США и многих других странах была введена система единого времени WOSAC (название составлено из первых букв слов: Worldwide Synchronisation of Atomic Clocks). Главные первичные часы этой системы расположены в г. Риме, штат Нью-Йорк, США, и состоят из трех *атомикронов* (атомных цезиевых часов), показания которых усредняются. Таким образом обеспечивает-

ся погрешность отсчета времени, равная $(1-3) \cdot 10^{-11}$. Эти первичные часы связаны с сетью вторичных часов, расположенных в ряде других стран.

Проверка показала, что при передаче сигналов точного времени от штата Нью-Йорк (США) до острова Оаху (Гавайские острова), т. е. приблизительно на 7500 км, согласование показаний времени обеспечивалось с точностью до 3 микросекунд.

Между тем в последние годы разработаны и уже введены в действие различные усовершенствования этой службы точного времени. На значительной части поверхности земного шара установлен ряд станций, связанных с ней общей программой и общим контролем. Для этого используются искусственные спутники Земли, перевозка атомных часов и пр. Все это позволило сделать указанную систему достаточно точной и надежной. Большинство стран ввело ее у себя с 1 января 1972 г.

С 1972 г. Советский Союз также живет по атомному, а не среднесолнечному времени. Однако СССР имеет свою Службу точного времени, основанную на работе своих национальных станций, оснащенных астрономическими атомными часами. При этом СССР вводит некоторые поправки несколько иначе, чем Международное бюро времени.

Сводные моменты, т. е. согласованные результаты работы ряда служб времени, в СССР получают, начиная с 1928 г. Первоначально это делалось по материалам пяти обсерваторий: Пулковской, Ленинградской, Парижской, Гринвичской и Потсдамской. В настоящее время эталонное время СССР вычисляется на основании 11 советских служб времени и 8 служб времени стран народной демократии. Международное бюро времени (Франция) получает и обрабатывает данные национальных служб времени с целью их контроля, оценки и согласования.

Высокая точность хранения и передачи меток времени, достигнутая в наши дни, позволяет решать сложные и новые вопросы дальней космической навигации, а также хотя и старые, но по-прежнему важные и интересные вопросы о движении земной коры.

Куда же плывут материки

Теперь мы можем вернуться к задаче о движении материков, описанной в предыдущей главе. Это тем более интересно, что за полвека, прошедшие со времени появления

работ А. Вегенера до нашего времени, научные споры вокруг этих идей еще не утихли. Например, У. Манк и Г. Макдональд в 1960 г. писали: «Некоторые данные А. Вегенера неоспоримы, однако большая часть его аргументов целиком основана на произвольных предположениях». И далее: «Большие сдвиги континентов имели место до изобретения телеграфа, средние сдвиги — до изобретения радио, а после этого практически никаких сдвигов не наблюдалось».

Эти язвительные замечания не лишены оснований по крайней мере в первой своей части. Действительно, долготные измерения, производившиеся в свое время Вегенером и его сотрудниками в их экспедициях по Гренландии (в одной из которых Вегенер трагически погиб), были выполнены с точностью, недостаточной для строгого решения поставленной задачи. Это отмечали еще его современники.

Одним из наиболее убежденных сторонников теории движения материков в современном ее варианте является П. Н. Кропоткин. В 1962 г. он писал: «Палеомагнитные и геологические данные свидетельствуют о том, что в течение мезозоя и кайнозоя лейтмотивом движения земной коры было раздробление двух древних материков — Лавразии и Гондваны и расхождение их частей в сторону Тихого океана и к геосинклинальному поясу Тетис» *). Напомним, что Лавразия охватывала Северную Америку, Гренландию, Европу и всю северную половину Азии, Гондвана — южные матерки и Индию. Океан Тетис протягивался из Средиземноморья через Альпы, Кавказ и Гималаи в Индонезию.

Тот же автор далее писал: «Единство Гондваны прослежено теперь с докембрия до середины мела, а ее раздробление выглядит теперь как длительный процесс, начавшийся в палеозое и достигший особенно большого размаха с середины мелового периода. С этого времени прошло 80 миллионов лет. Следовательно, расстояние между Африкой и Южной Америкой возрастало со скоростью 6 см в год. Такая же скорость получается по палеомагнитным данным для перемещения Индостана из южного полушария в северное». Прodelав по палеомагнитным данным реконструкцию расположения материков в прошлом, П. Н. Кропоткин пришел к выводу, что «...в это время континенты действительно были сбиты вместе в такую глыбу, которая на-

*) Кропоткин П. Н. Плавают ли матерки // Природа.— 1962.— № 11.

поминала очертания вегенеровской первичной материковой платформы» *).

Итак, сумма данных, полученных разными методами, показывает, что современное расположение материков и их очертания сформировались в далеком прошлом в результате ряда разломов и перемещения материковых глыб.

Вопрос о современном движении материков решается на основании результатов долготных исследований, проведенных с достаточной точностью. Что в данном случае означает *достаточная точность*, можно увидеть из того, что, например, на широте Вашингтона изменению долготы на одну тысячную секунды соответствует смещение на 3 см. Поскольку предполагаемая скорость движения составляет около 1 м в год, а современным службам времени уже доступно определение моментов времени с погрешностью до 10^{-3} с, а хранение и передача точного времени — с погрешностью до 10^{-6} с, то для получения убедительных результатов достаточно провести соответствующие измерения с интервалом в несколько десятков лет.

С этой целью в 1926 г. была создана сеть из 32 пунктов наблюдения и проведены астрономические долготные исследования. В 1933 г. были проведены повторные астрономические долготные исследования, причем в работу включилась уже 71 обсерватория. Эти измерения проводились в течение 7 лет и показали, в частности, что Америка не удаляется от Европы на 1 м в год, как думал А. Вегенер, а приближается к ней приблизительно со скоростью 60 см в год. Между тем при расчете смещения материков за большой интервал времени, например, за последние 100—200 миллионов лет, *средняя скорость* их движения оказывается равной лишь нескольким сантиметрам в год.

Техника измерений тех лет была не очень высокой и для таких исследований семилетняя длительность, конечно, мала. Таким образом, дальнейшие исследования в этой области могут внести значительные коррективы в полученные результаты. Тем не менее можно считать, что в прошлом скорость движения материков была неравномерной, а наличие современного перемещения больших материковых глыб подтверждено. Более того, удалось выяснить, что отдельные части этих материковых глыб имеют несколько различное движение.

*) Кротокин П. Н. Проблема дрейфа материков (мобилизма) Физика Земли.— 1969.— № 3.

Единица времени и эталон времени

Часы, употребляемые астрономами, суть не что иное, как совокупность всей Солнечной системы.

Э. Борель

Часы — вращающаяся вокруг своей оси Земля

Измерить какую-либо величину — значит сравнить ее с другой, однородной ей величиной, принятой за единицу, и найти числовое отношение между ними. Так, длину куска материи сравнивают с длиной метра, длительность человеческой жизни — с длительностью года, а результаты выражают именованными числами, например: 3,5 м, 21 год. Любое измерение требует существования соответствующей *единицы измерения*, т. е. той величины, с которой производится сравнение. Для проведения измерений пользуются *мерами*, содержащими определенное число выбранных единиц; например, при измерении длины — линейками; при измерении массы — гирями; при измерении времени — часами, в которых каждое качание маятника соответствует определенному промежутку времени.

Во избежание искажений результатов измерений уже давно посчитали целесообразным иметь *эталон* — образцовую меру, с которой сравниваются все остальные. Разумеется, и единица и эталон должны обладать полной определенностью, постоянством, удобными размерами и воспроизводимостью в случае утраты. Выполнить все эти требования по отношению к эталону времени оказалось чрезвычайно трудно. Мы сейчас расскажем о том, в чем заключались эти трудности и как ученые их преодолевали.

В древности у различных народов в качестве единицы измерения больших отрезков времени служили промежутки от одной жатвы до другой, от одного периода дождей до другого. Некоторые народы отмеряли свой год по первому снегу, другие по появлению над их горизонтом определенных созвездий и звезд. В ясную ночь на небосводе видно множество звезд. Многие из них образуют отдельные груп-

пы. Древние греки увидели в них изображения людей, животных, предметов... и населили небосвод Орионом и Геркулесом, Близнецами, Весами и т. д. Не только компоновка созвездий, но и их причудливые названия сохранились до нашего времени. В древности считали, что Земля неподвижна, а Солнце и звезды вращаются вокруг нее. В результате реального годовичного движения Земли вокруг Солнца видимое положение звезд каждую ночь смещается, а Солнце представляется постепенно перемещающимся по небосводу от одной группы звезд к другой. Таким образом, за год Солнце обходит двенадцать созвездий — Козерога, Водолея, Рыб, Овна, Тельца, Близнецов, Рака, Льва, Деву, Весы, Скорпиона и Стрельца. Эти знаки зодиака уже давно стали символом течения времени.

Естественной мерой промежутков времени более коротких, чем год, издавна были сутки. Напомним, что следует различать солнечные и звездные сутки (см. с. 63). Исторически получилось так, что первоначально в качестве единицы времени — *секунды* — была выбрана некоторая часть *истинных солнечных суток*.

Истинными солнечными сутками называют промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми, например верхними, кульминациями центра видимого диска Солнца. Секунда составляет $1/86\,400$ их часть.

Имеет ли эта единица определенность? Да, и совершенно достаточную. Постоянство? Увы, нет, или, во всяком случае, постоянство совершенно недостаточное, и в этом ученые убедились уже давно. Сравнение моментов времени, определенных из астрономических измерений с астрономическими часами, показало, что длительность истинных солнечных суток все время меняется. В январе — феврале «часы — вращающаяся вокруг своей оси Земля» — отстают от астрономических маятниковых часов примерно на секунду в сутки, в мае обгоняют их, в июле — августе снова отстают, а осенью, в октябре — ноябре, снова обгоняют.

Какова причина этой неравномерности? Какие сутки выбрать в качестве эталонных: весенние или осенние?

Положение, в которое попали астрономы, несколько напоминает то, в котором оказался один путешественник, когда он захотел измерить длину пойманной им змеи — анаконды. Объект измерения — живая змея — не желал оставаться неподвижным и сохранять свою длину неизменной. Напротив, великолепная анаконда то свивалась в кольца, то растягивалась и откровенно норовила удрать.

Более десятка людей прижали ее руками и коленями к земле, но она продолжала извиваться. Прикладывая к ней ленту своей рулетки, путешественник, конечно, и не думал о том, что длина ленты тоже не совсем постоянна и может меняться от натяжения, погоды и времени. В данном случае он был прав. Не потому, что длина этой ленты действительно была неизменной, а потому, что для тех измерений, которые он производил, погрешности, связанные с изменением ее длины на доли миллиметра, были пренебрежимо малы.

Теперь представим себе такую парадоксальную ситуацию: путешественник потерял свою рулетку и в качестве эталона длины применяет... живую анаконду. Когда он прикладывает ее к объектам измерения, то она извивается и меняет свои размеры. К тому же с течением времени она растёт.

Увы, эталон времени, построенный на суточном вращении Земли, немного похож на анаконду. Правда, змея меняет свои размеры на несколько процентов, а длительность суток меняется лишь на доли процента, но и требования в этих случаях различные. Путешественника вполне устраивало определение длины анаконды с точностью до нескольких сантиметров или даже дециметров. Для современной науки во многих случаях ошибка в определении времени даже на доли секунды является недопустимо большой.

Поиски лучшего эталона времени

Для того чтобы улучшить эталон времени, надлежало прежде всего разобраться в причинах его «змеиного» поведения, т. е. причинах неравномерности вращения Земли. Одна из них заключается в том, что орбита Земли представляет собой не круг, а эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Вследствие этого Земля оказывается то ближе к Солнцу, то дальше от него и соответственно движется то быстрее, то медленнее. Поэтому только солнечные часы точно показывают солнечное время. Ни одни механические часы не в состоянии точно следовать за этими неравномерными изменениями.

Трудности, связанные с использованием в качестве эталона времени длительности истинных солнечных суток, астрономам были ясны. Поэтому этот вопрос тщательно изучался. В конце концов было решено, что лучше всего пользоваться средними солнечными сутками, или «средним

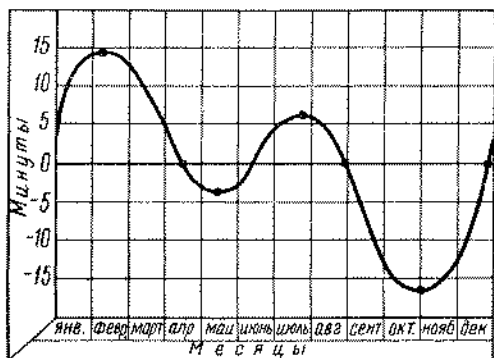


Рис. 26. График уравнения времени

Солнцем». При этом среднее Солнце условно представляется движущимся по небосводу совершенно равномерно в течение всего года.

Скорость движения Земли по ее эллиптической орбите описывается вторым законом Кеплера, и, таким образом, связь между средним и истинным солнечным временем может быть точно рассчитана.

Для того чтобы при астрономических вычислениях можно было в любой момент перейти от истинного к среднему солнечному времени, составляется уравнение времени, дающее добавку в минутах, которую нужно алгебраически сложить с истинным солнечным временем, чтобы получить среднее солнечное время.

Уравнение времени составляется в виде таблиц или графика (рис. 26), позволяющих легко производить нужный пересчет. В уравнении времени положительная поправка достигает наибольшей величины (+14,5 минуты) около середины февраля, отрицательная (—16,3 минуты) — около начала ноября. Четыре раза в год — 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря — поправка обращается в нуль, т. е. среднее солнечное время совпадает с истинным.

Переход от секунды, основанной на часах «вращающаяся вокруг своей оси Земля», к секунде, привязанной к часам «Земля, вращающаяся вокруг Солнца», был соответствующим образом узаконен. В 1956 г. Международным комитетом мер и весов была принята следующая резолюция: «В силу полномочий, полученных от десятой Генеральной конференции по мерам и весам в ее резолюции № 5, Международный комитет мер и весов... решает: секунда есть часть $1/31556925,9747$ тропического года для 1900 г. января 0 в 12 часов эфемердного времени». Напомним, что

тропическим годом называют промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Указание на эфемеридное время говорит о том, что длительность года следует определять из наблюдений Луны и планет, так как такие измерения позволяют правильнее и лучше учесть, а затем и исключить связанные с неравномерностью вращения Земли искажения длительности секунды. Ссылка на определенную дату года, принятого за основу при определении эталонной секунды, учитывает непостоянство длительности тропического года.

Таким образом, эталонная секунда приобрела достаточную определенность, точность, соответствующую уровню техники измерений того времени, и ... утратила воспроизводимость. Ведь согласно этой резолюции эталонная секунда привязана к продолжительности не любого, например текущего, года, а вполне определенного — 1900 года.

Неравномерность вращения Земли

Довольно скоро ученым стало ясно, что введением «среднего Солнца» ошибки в измерении времени были значительно уменьшены, но вовсе не устранены полностью. Между тем, если эталон, т. е. образцовая мера, с которой сравниваются все остальные, сам непостоянен, то результаты измерений вообще теряют определенность. Естественно, что исследователи деятельно занялись изучением и уточнением всех неравномерностей вращения Земли и поисками их причин. В этом отношении им многое уже удалось сделать, в особенности в последнее время, когда службы времени оснащены молекулярными и атомными астрономическими часами высокой точности.

В настоящее время известны три вида изменений угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси: 1) вековое постепенное замедление, 2) периодические (сезонные) изменения продолжительности суток и 3) непериодические (скачкообразные) изменения скорости вращения Земли.

Основной причиной векового замедления вращения Земли вокруг своей оси является приливное трение. По У. Манку и Г. Макдональду при этом имеет место следующая ситуация: «Если океан обладает конечной вязкостью или если Земля не ведет себя как абсолютно твердое тело, то лунный и солнечный приливы сдвигаются по фазе. Максимум подъема или опускания воды в данном месте запазды-

вает во времени относительно времени прохождения Луны (или Солнца) через местный меридиан. Гравитационное притяжение выпуклостей асимметрично относительно линии центров и приводит к появлению момента, тормозящего вращение Земли».

Это постепенное (вековое) уменьшение скорости вращения Земли было исследовано путем сопоставления данных о солнечных затмениях, происходивших в древности, с соответствующими значениями места и времени этих же затмений, вычисленными в наше время. Правда, таких данных осталось от древности не очень много и точность их невелика, однако с их помощью все же удалось выяснить вековое замедление вращения Земли. Спенсер Джонс показал, что в течение последних 2000 лет продолжительность суток увеличивалась на 0,0023 с за каждые 100 лет, а за последние 250 лет длительность суток также увеличивалась, но лишь на 0,0014 с за каждые 100 лет. Таким образом, само это замедление тоже непостоянно*).

Периодические (сезонные) изменения угловой скорости вращения Земли изучены путем сопоставления моментов времени, полученных из астрономических измерений, с отметками времени, даваемыми астрономическими часами. Чтобы по возможности повысить точность измерений и исключить систематические ошибки, обязанные тому или другому экземпляру часов, на каждой обсерватории, ведущей службу времени, метки времени получают от группы астрономических часов как среднее значение из их показаний. Желая еще более повысить точность и достоверность анализа сезонной нерегулярности вращения Земли, Н. Н. Парийский сопоставил данные различных служб времени и за разные периоды времени. Указанные исследования показали, что сезонная нерегулярность вращения Земли вокруг своей оси имеет годичный период и достигает около 0,001 с.

Причину сезонной нерегулярности вращения Земли различные ученые связывают с влиянием свободной нутации вследствие трехосности земного эллипсоида, сезонным перераспределением давления на поверхности Земли, приливными деформациями полугодового периода, сезонными изменениями снегового покрова Антарктиды.

Непериодические (скачкообразные) изменения скорости вращения Земли были открыты по наблюдениям нерегуляр-

*) Спенсер Джонс Г. Жизнь на других мирах.— М.: ОГИЗ, 1946.

ностей движения Луны (С. Ньюкомб и Э. Браун) и нерегулярностей движения планет и Солнца (В. де-Ситтер и Г. С. Джонсон). Довольно хорошее совпадение этих нерегулярностей между собой привело ученых к выводу о том, что находящийся на Земле наблюдатель обнаруживает такой эффект лишь потому, что на самом деле имеют место соответствующие нерегулярности вращения Земли. Отмечены скачкообразные изменения скорости вращения Земли, достигающие до 0,0034 с.

Используя данные астрономических измерений за последние несколько сот лет, астрономы провели сравнение эфемеридного времени (основанного на измерении положений Луны и планет) с временем, которое показывают часы — вращающаяся Земля. График рис. 27 представляет результаты этих исследований и составлен так, что указанные на нем значения дают добавку, которую нужно (с учетом знака) сложить с показаниями системы «часы — вращающаяся Земля» для того, чтобы получить эфемеридное время. Этот график довольно наглядно демонстрирует, сколь причудливо изменялась угловая скорость вращения Земли за последние столетия.

В 1952 г. Е. А. Холмберг предложил чрезвычайно интересную гипотезу, согласно которой нынешняя продолжительность земных суток установилась в результате совместного действия океанских и атмосферных приливов. Об океанских приливах мы уже говорили. Природа атмосферных приливов заключается в следующем: Солнце, действуя на атмосферу Земли, вызывает изменение барометрического давления. При суточном вращении Земли зона изме-

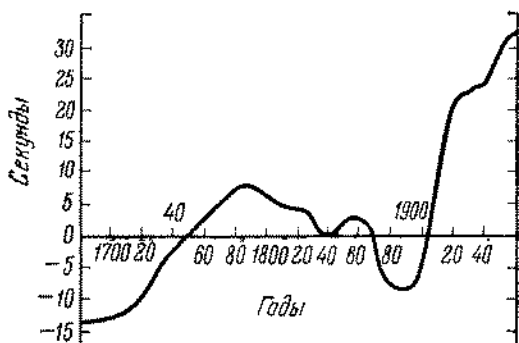


Рис. 27. Разница между эфемеридным временем и временем, которое показывает система «часы — вращающаяся Земля»

ненного давления обходит вокруг всего земного шара. При этом над каждой данной точкой Земли максимум давления атмосферы наступает на два часа раньше прохождения через меридиан Солнца или антисолнца. Поэтому эти зоны измененного давления (или атмосферные приливы) вызывают ускорение вращения Земли.

Океанские приливы замедляют вращение Земли, а атмосферные ускоряют. Между этими двумя парами сил устанавливается нежесткое динамическое равновесие, и в различные геологические эпохи имеют место отклонения от него в различные стороны. В настоящее время продолжительность суток несколько велика для равновесия и океанский замедляющий момент сил превосходит ускоряющий атмосферный момент, так что в общем вращение Земли замедляется.

Новый эталон времени — атомные часы

Проследив попытки ученых улучшить эталон времени «часы — вращающаяся Земля», можно увидеть, как, учитывая различные факторы, астрономы неоднократно его подправляли и наряду с этим вскрывали все новые и еще более тонкие его неравномерности. От истинных солнечных суток они перешли к средним солнечным суткам, затем учли сезонные неравномерности вращения Земли, ввели определение моментов по эфемеридному времени и т. д. Между тем этот эталон времени оставался по-прежнему похожим на извывающуюся анаконду.

Можно ли вообще отказаться от эталона «часы — вращающаяся Земля» и использовать для этой цели какой-нибудь другой тип часов?

При ответе на этот вопрос нужно учесть, что если для хранения времени важна стабильность работы часов, то от эталона времени наряду со стабильностью требуется еще и хорошая *воспроизводимость* в случае утраты. До тех пор пока нас удовлетворяла в качестве эталона времени вращающаяся вокруг своей оси Земля или Земля, вращающаяся вокруг Солнца, вопрос о воспроизводимости в случае утраты не был актуальным. Не потому, что эти системы вечные, а потому, что при их крушении не останется и нас.

Как только поднимается вопрос об использовании в качестве эталона времени часов, сделанных человеком (какой бы процесс ни лежал в их основе), т. е. использовании *прибора*, оказывается необходимым считаться с возможностью порчи или утраты такого устройства. Таким обра-

зом, эталон времени должен обладать не только достаточной точностью, но и достаточной воспроизводимостью.

Для наглядности рассмотрим, в какой мере этим требованиям удовлетворяют все известные нам типы часов.

Песочные, водяные, огненные часы древнего мира дают погрешность порядка десятков минут в сутки и являются слишком грубыми для того, чтобы служить эталонами времени. К тому же в случае утраты данного образца таких часов совершенно безнадежно пытаться точно его воспроизвести. Небольшого изменения ширины горла песочных часов или качества песка достаточно для существенного изменения показаний этих часов. Так же обстоит дело и с огненными и водяными часами: небольшого изменения их размеров достаточно для того, чтобы значительно изменить их показания.

Колесные часы с их громоздкими деталями дают погрешность в несколько минут в сутки. Ход этих часов зависит от размера и веса деталей, трения, смазки и т. д. Ни в отношении точности, ни в отношении воспроизводимости они не годятся для того, чтобы служить эталоном времени.

В середине нашего века погрешность показаний астрономических маятниковых и кварцевых часов была доведена до десятитысячных долей секунды в сутки. В дальнейшем погрешность кварцевых часов была снижена до 10^{-6} с в сутки. Однако к этому времени требования к точности измерений настолько возросли, что при решении некоторых научных и технических задач эти искажения, вероятно, были более неудобны и неприятны, чем ошибки в несколько минут для древних.

Кроме того, в случае утраты данного образца маятниковых или кварцевых астрономических часов совершенно безнадежно даже по самым точным чертежам пытаться сделать другие, точно сходные с первыми. Ничтожно малого различия в длине маятника или размерах кварцевой пластинки или даже небольшой неоднородности материалов, из которых они сделаны, достаточно для того, чтобы получилось различие в ходе часов. Дело при этом осложняется еще и тем, что с течением времени детали часов срабатываются, стареют.

Таким образом, ни грубые песочные часы, ни самые лучшие астрономические маятниковые и кварцевые часы вследствие недостаточной точности и невозможности их точно воспроизведения не годятся в качестве первичных эталонов времени.

Уже давно стало ясно, сколь многообещающим в отношении точности и воспроизводимости может быть применено в измерительной технике атомных процессов.

Когда огромные заводы выпускают стандартную продукцию: автомобили, часы и т. д., то по внешнему виду кажется, что все автомобили одной серии, все часы одного типа точно одинаковы между собой, но это только так кажется. Из десятков тысяч однотипных автомобилей каждый чем-то отличается от другого; среди сотен тысяч однотипных часов, сделанных из одних и тех же материалов, нет двух совершенно одинаковых, и поэтому каждые приходится регулировать отдельно. В мире больших тел (макромире) нет двух совершенно одинаковых вещей.

Напротив, в мире малых тел (микромире) царит единообразие. Не в результате грубости наших измерительных приборов, а принципиально нельзя отличить один электрон от другого электрона или один протон от другого протона. Атомы, состоящие из одинакового числа элементарных частиц: электронов, протонов, нейтронов, также оказываются точно одинаковыми. Молекулы, представляющие собой соединение нескольких атомов, оказываются совершенно одинаковыми, если только одинаковы число, комбинация и строение атомов, входящих в их состав.

Эти столь очевидные преимущества атомных систем в отношении постоянства их параметров уже давно навели ученых на мысль о создании эталонов, основанных не на размерах Земли и скорости ее вращения, а на атомных процессах.

В отношении постоянства колебаний атомных и молекулярных систем и слабой зависимости частоты этих колебаний от внешних условий преимущества микросистем над макросистемами огромны. Если маятниковые часы, ничего в них не изменяя, перенести из одного города в другой, например из Москвы в Ташкент, то вследствие одного только различия ускорения свободного падения в этих пунктах правильность хода часов нарушится, а погрешность составит несколько минут в сутки. Между тем при таком же перемещении системы, в которой совершаются микроволновые процессы, частота колебаний, испускаемых атомами цезия или молекулами аммиака, изменяется меньше чем на миллиардную долю. При этом изменение хода часов, основанных на таких колебаниях, будет меньше 1 с за десятки тысяч лет. Таким образом, было очевидно, что именно такие системы следует выбрать для хранения точного времени.

Необходимо было также решить вопрос о том, какие из астрономических часов наиболее целесообразно выбрать в качестве нового эталона времени?

В 60-х годах этот вопрос детально обсуждался учеными, а в 1964 г. Международный Комитет мер и весов принял решение о введении нового *физического эталона времени*, выбрав в качестве такового *астрономические атомно-лучевые цезиевые часы*.

В 1967 г. единица времени получила новое определение: секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Этот выбор обоснован тем, что астрономические аммиачные молекулярные часы, основанные на поглощении высокочастотного электромагнитного излучения, имеют меньшую точность и значительно худшую воспроизводимость. Отдельные экземпляры молекулярных аммиачных часов давали несколько различные показания и для согласования нуждались в специальной калибровке.

Астрономические молекулярные часы, основанные на использовании аммиачного квантового генератора, показали очень высокую стабильность. Однако обнаружилась зависимость их показаний от давления остаточных газов в трубке генератора и от электромагнитных полей. Оказалось, что каждый экземпляр таких часов может очень точно хранить время, но различные их экземпляры дают несколько разные показания. Следовательно, по критерию воспроизводимости они оказались неудовлетворительными.

Между тем цезиевый атомно-лучевой стандарт обладает не только очень высокой точностью, но и прекрасной воспроизводимостью. Отдельные экземпляры таких часов, изготовленные в разных странах, при их взаимной проверке и сличении дали хорошо совпадающие показания, а систематический дрейф этих часов (т. е. постепенный уход показаний) обнаружен не был.

Тем не менее не исключено, что в ближайшее время цезиевый атомно-лучевой стандарт будет заменен другим. Однако не потому, что в нем обнаружилось какое-либо недостатки, а потому, что параметры часов, основанных на водородном квантовом генераторе, оказались несколько лучше. В некоторых международных научных организациях уже обсуждался вопрос о целесообразности перехода на водородный стандарт частоты и времени.

Квантовые стандарты частоты и времени благодаря их высокой точности позволили на новой основе подойти к

решению ряда, так сказать, «старых» задач, например к вопросу о неравномерности вращения Земли. До недавнего времени изучение неравномерностей вращения имело первостепенное значение для уточнения эталона времени.

С тех пор как был введен новый эталон времени, основанный на атомных колебаниях, в этом необходимости отпала. Однако оказалось, что изучение этих неравномерностей по-прежнему очень интересно и важно, но уже по другой причине. Дело в том, что особенности вращения Земли зависят от ее структуры и ряда процессов, происходящих внутри нее, а также вблизи от ее поверхности. Таким образом, изучение неравномерностей вращения Земли может служить для выяснения структуры самой Земли. Работы Н. Н. Парийского показали плодотворность такого направления исследований.

Новый эталон времени не имеет ни суточных, ни сезонных, ни вековых колебаний. Он не стареет. К тому же он обладает достаточной определенностью, точностью и воспроизводимостью. Таким образом, преимущества нового эталона времени, основанного на атомных колебаниях, по сравнению со старым, привязанным к вращению Земли, огромны.

Однако применение атомного эталона времени выдвигает новую проблему: что делать в случае остановки таких часов? Ведь отсчитать время столь же точно могут лишь другие такие же часы. Для преодоления этой трудности в центрах службы времени установлены группы атомных часов. Это дает возможность взаимной проверки отдельных экземпляров часов, а в случае остановки каких-либо из них другие обеспечивают непрерывность отсчета точного времени. Таким образом достигается не только высокая точность, но и достаточная надежность непрерывного отсчета времени атомными часами.

С 1972 г. Советский Союз, как и ряд других стран, расстался с эталонной секундой, основанной на движении Земли вокруг Солнца, и перешел на новую систему всемирного координированного времени, опирающуюся на работу группы атомных часов.

Так появился, введен и узаконен эталон времени, который уже не извивается, как анаконда, или, по крайней мере, извивается столь мало, что заметить это не удастся, а это почти одно и то же. При этом придумана и реализована такая система передачи точного времени на большие расстояния, при которой существенных его искажений не происходит.

Изучение очень быстрых процессов

Электронные секундомеры

Казалось бы, стоит ли заниматься секундами, а тем более тысячными, миллионными, миллиардными или биллионными долями секунды? Много ли может произойти за столь короткое время?

Когда на спортивных соревнованиях бегуны, вырвавшись со старта, энергично рассекая воздух, несутся к финишу, — доли секунды решают успех. Поэтому для бегуна секунда — это уже совсем не маленький отрезок времени. В течение секунды он продвигается на 5—10 метров и совершает много довольно сложных движений, из которых каждое отнимает всего лишь сотые доли секунды. От правильности построения этих движений зависят его успех и победа. Нередко месяцы и даже годы тренировки тратятся спортсменами на то, чтобы суметь пробежать некоторое расстояние на несколько секунд или даже всего на несколько десятых долей секунды быстрее.

В автомобильном, тракторном и самолетном моторах, называемых двигателями внутреннего сгорания, вал делает несколько тысяч оборотов в минуту. В течение каждого оборота вала происходят довольно сложные процессы, знание которых весьма существенно для улучшения работы двигателя и повышения его коэффициента полезного действия. Так, например, в течение каждого оборота четырехтактного двигателя происходят: всасывание, сжатие, затем сгорание рабочей смеси и рабочий ход и, наконец, выхлоп. При этом в течение сотых долей секунды резко меняются давление и механическое напряжение, испытываемое отдельными деталями двигателя.

Кроме упомянутых, еще ряд процессов, имеющих важное значение в науке и технике, протекает за тысячные доли секунды или в еще меньшие промежутки времени. Таковы, например, колебательные и ударные нагрузки различных

механических конструкций, вибрации крыла самолета или лопаток турбины.

Своеобразным «двигателем внутреннего сгорания», цикл которого не замкнут, является артиллерийское орудие. Во время его действия каждый раз совершается только один рабочий ход. Для увеличения дальности артиллерийского орудия большой интерес представляет изучение движения снаряда внутри и вне ствола орудия. В этом случае исследованию подлежат процессы, происходящие за *тысячные* доли секунды.

Артиллерийская задача по *внешней баллистике* аналогична определению скорости бегуна на дистанции. Для ее решения нужно получить сигналы о прохождении снарядом начала и конца *мерного участка* и измерить промежуток времени между этими сигналами. Так как скорость пуль и снарядов бывает порядка 500—2000 м/с, а длина мерного участка обычно выбирается около 1—2 м, то при решении артиллерийской задачи нужно уметь измерять промежутки времени в тысячные доли секунды. Если при этом требуется погрешность измерений в один-два процента, то соответствующий прибор должен обеспечить измерение сотых долей секунды.

Между тем обычный стрелочный секундомер с часовой пружиной позволяет измерять различные промежутки времени между двумя моментами с погрешностью до 0,1 с. Электрический стрелочный секундомер с вращающимися механическими частями, приводимыми в движение двигателем, позволяет производить отсчет промежутков времени с погрешностью до 0,01 с.

Изучение более быстро протекающих процессов с помощью механических устройств встречает большие трудности, так как тяжелые детали обладают большой инерцией. Чтобы сообщить им некоторую скорость или изменить направление их движения, требуется приложение больших сил. Нужно заметить, что при изучении процессов, длящихся тысячные и миллионные доли секунды, слишком «тяжелыми», т. е. обладающими большой инерцией, оказываются детали, масса которых не превышает долей грамма. Поэтому механические измерительные устройства с движущимися частями — колесиками, стрелками, пусть даже очень тонкими и легкими, — применяются при измерении промежутков времени только до десятых или сотых долей секунды.

Поскольку артиллерийская задача, увы, по-прежнему остается очень актуальной, то для ее решения разработаны

и реализованы иные методы, например различные виды специальной киносъемки, а также оптические устройства и электронные измерительные схемы.

При изучении ядерных процессов и радиоактивных излучений понадобились приемники явлений, способные реагировать на тот или иной вид излучения и давать при этом чрезвычайно короткие сигналы. Последнее условие существенно потому, что чем меньше изучаемый промежуток времени, тем короче должны быть сигналы о его начале и окончании, — между тем имеется целый ряд чрезвычайно быстрых ядерных процессов. Для их исследования применяются различного типа счетчики, например типа Гейгера — Мюллера, сцинтилляционный и др.

Для измерения очень коротких промежутков времени между двумя событиями в настоящее время широко применяются различного типа электронные устройства. Обычно они состоят из управляющего блока, стандарт-генератора и пересчетной схемы. Стандарт-генератор вырабатывает периодические сигналы заданной частоты. Управляющий блок осуществляет связь между исследуемыми событиями и прибором; например, получив от 1-го счетчика сигнал о начале исследуемого процесса, он соединяет стандарт-генератор с пересчетной схемой, а получив от 2-го счетчика сигнал об окончании этого процесса, — разъединяет их. Между тем пересчетная схема сосчитывает число попавших в нее периодических сигналов. По существу это секундомер, в котором вместо баланса сигналы определенной частоты выдает стандарт-генератор; вместо часового механизма их сосчитывает пересчетная схема, а вместо человека и пусковой кнопки прибором управляют счетчики и электронный выключатель.

В настоящее время промышленностью ряда стран (в том числе и Советского Союза) выпускаются различного типа электронные секундомеры, позволяющие измерять промежутки времени от стомиллионных долей секунды до нескольких часов с погрешностью до долей процента от измеряемого интервала времени. Это, конечно, хорошие чувствительность и точность, однако для решения целого ряда научных задач понадобились еще лучшие. Кроме того, в ряде случаев потребовалось не только измерять интервалы времени между двумя событиями, а еще и получать непрерывную запись течения очень быстрых процессов. Далее будет показано, как это удалось сделать.

Запись очень быстрых процессов осциллографами

При решении целого ряда научных и технических задач важно знать не только промежутки времени между началом и окончанием того или иного явления, но и характер протекания изучаемых процессов. Для этого нужны уже не секундомеры, а записывающие устройства. Для записи не очень быстрых процессов применяются различного типа самописцы, состоящие из двух основных частей: пишущего устройства и лентопротяжного механизма.

Пишущее устройство самописца делается, подобно подвижной части электроизмерительных приборов, в виде легкой рамки, помещенной между полюсами сильного магнита. При протекании электрического тока через эту рамку она поворачивается. Угол поворота рамки тем больше, чем больше сила протекающего через нее тока. Вместо стрелки-указателя в самописце обычно с подвижной рамкой скрепляется тонкое перо, пишущее чернилами на бумаге.

Передвижение ленты осуществляется с помощью специального часового механизма или электродвигателя, обеспечивающих равномерное ее движение. Лентопротяжные устройства таких приборов позволяют получить скорости движения ленты от нескольких сантиметров в сутки до нескольких метров в секунду.

Самые быстросрабатывающие из таких приборов имеют разрешающую способность порядка тысячных долей секунды. Для увеличения скорости записи надо уменьшить вес подвижных частей прибора. Как это сделать?

Если сделать перо самописца короче, то оно станет легче, но масштаб записи мельче. Этот путь при выигрыше в одном несет проигрыш в другом. Это затруднение остроумно преодолевается в шлейфовом осциллографе, в котором для записи вместо тяжелого стержня с пером используется луч света. Благодаря легкости подвижного устройства шлейфовый осциллограф позволяет записывать изменения различных величин, происходящие в течение тысячных и десятитысячных долей секунды.

Самописцы и шлейфовые осциллографы нашли широкое применение в самых различных областях науки и техники. Они применяются для статистического контроля машинного времени (т. е. определения длительности работы и простоя машины), контроля работы энергосетей и различных технологических процессов; в медицине их успешно используют для записи токов сердца (электрокардиография),

в сейсмологии — для записи упругих колебаний земной коры и т. д.

В этих приборах прием сигналов и их регистрация производятся электрическим блоком, а временная развертка осуществляется лентопротяжным устройством, т. е. блоком механическим. Таким образом, эти приборы являются наполовину электрическими, наполовину — механическими. Поэтому для записи очень быстрых процессов они оказались непригодными.

Если струйку воды под напором выпустить через очень узкое отверстие, то вследствие трения о стенки трубки она окажется наэлектризованной. Пропустив эту струйку между двумя металлическими разноименно заряженными пластинками, можно увидеть, как она отклоняется при включении тока. Изменив с помощью переключателя полярность этих пластинок, можно наблюдать, как струйка поворачивается в другую сторону. При этом угол ее отклонения оказывается тем больше, чем больше разность потенциалов между заряженными пластинками.

Будучи студентом, автор этой книги собрал такой «струйный осциллограф» и демонстрировал своим товарищам. Если вы захотите это сделать, то поместите сосуд с водой на высоте 1,5—2 м над рабочим столом, чтобы создать напор воды. Соедините этот сосуд резиновым шлангом с пипеткой или иной стеклянной трубкой с узким отверстием. Между сосудом и пипеткой пристройте кран или зажим для регулировки подачи воды. На пути струйки установите на изоляторах две металлические пластинки и подведите к ним через двухполюсный перекидной рубильник провода от сухой батарейки. Зазор между пластинками должен быть небольшим. Разность потенциалов должна составлять несколько десятков вольт. Внизу нужно поставить какой-нибудь поддон или ведро.

Такая система может быть использована для записи различных процессов, но не очень быстрых, так как даже самая тонкая струйка, состоящая из маленьких капелек воды, обладает все еще слишком большой массой и инерцией.

Можно ли создать струйку, частицы которой были бы настолько легкими, чтобы их инерция не сказывалась при записи даже весьма быстрых процессов? Оказывается, что это сделать можно. Для этого нужно воспользоваться пучком электронов — мельчайших отрицательно заряженных частичек, масса каждой из которых составляет $9 \cdot 10^{-28}$ грамма. Устройство, в котором запись различных процес-

сов осуществляется с помощью пучка электронов, называется электронно-лучевым осциллографом.

Электронно-лучевой осциллограф состоит из двух основных частей: электронно-лучевой трубки и электрической схемы. В электронно-лучевой трубке имеются устройство для получения узкого пучка быстрых электронов и экран, который светится в тех местах, куда ударяют электроны. Электрическая схема управляет движением электронного пучка таким образом, что в зависимости от характера записываемого процесса на экране электронно-лучевой трубки получается то или иное изображение.

Когда с помощью электронно-лучевого осциллографа записывается быстрое однократное явление, например электрический разряд, то картина на экране осциллографа мелькает столь быстро, что ее трудно рассмотреть или сфотографировать. Это затруднение легко преодолевается, если изучаемое явление периодическое или его можно повторять много раз в течение секунды.

В этом случае горизонтальную развертку электронного луча так согласовывают с моментом начала явления, что на экране осциллографа ряд последовательных изображений одного и того же явления получаются точно на одном и том же месте и накладываются друг на друга. Эту картину, фактически мелькающую много раз в секунду, наш глаз воспринимает как неподвижное слитное изображение, имеющее некоторую среднюю яркость. Средняя яркость тем больше, чем выше частота повторения. При достаточной частоте повторения изображение можно спокойно рассмотреть, измерить и без особого труда сфотографировать.

В тех случаях, когда нельзя добиться многократного повторения явления, для получения достаточной яркости изображения пользуются высоковольтным осциллографом.

В высоковольтном осциллографе между катодом в анодом электронно-лучевой трубки создается разность потенциалов в несколько десятков тысяч вольт. При этом электронам сообщается настолько большая энергия, что при ударе об экран они вызывают ослепительное свечение. Изображение на экране получается настолько ярким, что, несмотря на кратковременность, его легко можно сфотографировать.

Например, с помощью высоковольтного осциллографа удалось подробно изучить грозные разряды. Так как они представляют собой явления однократные, а момент их появления заранее точно не известен, то была применена *ждуция схема развертки*, устроенная так, что электронный

луч начинал движение по экрану трубки в момент, согласованный с началом изучаемого разряда (работы И. С. Стекольников и др.). Таким образом удалось выяснить, что сила тока в канале молнии достигает 200 000 ампер, а напряженне, при котором начинается грозовой разряд, имеет величину порядка 50—100 миллионов вольт. Скорость движения молнии составляет около 0,1 скорости света, причем молния движется толчками. Сначала молния пробивает перед собой узкий проводящий канал, электризуя окружающий воздух, потом по этому каналу устремляется основной мощный разряд, значительно расширяющий его, затем вновь пробивается узкий проводящий канал и т. д.

В осциллографе скорость горизонтального движения электронного луча может быть задана заранее. Выбором этой скорости устанавливается масштаб времени развертки.

Таким образом, электронно-лучевой осциллограф позволяет записывать самые различные процессы и при этом измерять их длительность, скорость течения, а также промежутки времени между отдельными фазами данного процесса.

Как управляют временем

Специальная киносъемка и специальная фотография

Исследование некоторых процессов затруднительно вследствие того, что они протекают слишком медленно. Например, процесс роста растений длится месяцы и годы. Изучение изменений, происходящих в растении в процессе его роста, интересно и важно, однако непрерывные наблюдения в течение столь длительного срока — крайне утомительное и трудоемкое дело. Как бы хотелось в этом случае «сжать» время, ускорить его течение!

Наоборот, исследование других процессов оказывается затруднительным вследствие того, что они протекают слишком быстро.

Кто из любителей спорта не знает, что во время футбольного матча нередко бывают такие напряженные моменты игры, когда у футбольных ворот бегают и прыгают игроки обеих команд и перед глазами зрителей, как фейерверк, мелькают разноцветные майки игроков, а за их одноцветными ногами уже и совсем трудно уследить... Как бы хотелось в этом случае «раздвинуть» время, замедлить его!

При изучении различных машин и механизмов часто приходится сталкиваться с процессами, которые длятся лишь тысячные доли секунды. Между тем опыт конструирования и изготовления машин показал, что теоретически чрезвычайно трудно оценить все особенности работы отдельных узлов и деталей. Даже сравнительно долгое опробование опытного образца перед серийным выпуском с целью выяснения и устранения дефектов оказывается экономически оправданным. Для получения правильного решения задачи чрезвычайно полезно *увидеть* течение исследуемого процесса.

Ряд явлений в области баллистики, а также атомной и ядерной физики протекает в промежутки времени порядка миллионных и миллиардных долей секунды. Непосредст-

венное наблюдение таких процессов представляет большие трудности и не всегда эффективно. Можно ли, не меняя скорости протекания этих процессов, т. е. не искажая их, в то же время изменить длительность их наблюдения?

Для решения такого рода задач в настоящее время разработаны специальные методы *трансформации времени*. Однако не следует думать, что трансформаторы времени в какой-либо мере влияют на скорость течения изучаемых процессов (в одних случаях это не нужно, в других — невозможно), — они *изменяют лишь длительность их наблюдения*. Так, например, при исследовании молнии катодным осциллографом с помощью схемы развертки изображения заставляют электронный луч двигаться в горизонтальном направлении с большой скоростью, между тем как исследуемые сигналы вызывают отклонение луча по вертикальной оси трубки осциллографа. При этом удается получить запись изменений тока и напряжения грозового разряда в крупном масштабе. Таким образом, меняется не скорость протекания изучаемого явления, а масштаб времени при его наблюдении.

Наиболее распространенными методами трансформации времени являются осциллографирование, а также специальная киносъемка и специальная фотография.

При обычной киносъемке в 1 секунду получают 24 отдельных кадра и с такой же скоростью прокручивают ленту в кинопроекторном аппарате при демонстрации фильма.

При изучении медленно протекающих явлений, например заживления ран, деления клеток, роста растений и т. д., специальная киносъемка позволяет ускорить их просматривание. Для этого через равные промежутки времени, например каждую минуту, каждый час или день, снимается только по одному кадрку фильма. Через несколько дней, месяцев или лет такой киносъемки фильм пропускаяется через проекционный аппарат с нормальной скоростью. При этом все изменения кажутся непрерывными, но изменяется масштаб времени. Благодаря такой трансформации времени на экране можно увидеть, как растение «растет у нас на глазах». Процесс, протекающий за месяцы и годы, просматривается за полчаса, в течение которых можно видеть появление ростков из семян растения, набухание почек, завязывание и созревание плодов и, наконец, увядание растения.

Для получения «замедленной» съемки скорость движения ленты в киносъемочном аппарате соответственно увеличивается: получают 120, 240 кадров в секунд. При

демонстрации такого фильма с нормальной скоростью (24 кадра в секунду) движения всех тел представляются замедленными. Бегущий человек словно находится не в воздухе, а в воде: такими плавными и медленными кажутся теперь его движения.

С помощью высокоскоростной фотографической съемки оказалось возможным выявить важные особенности целого ряда процессов живой и неживой природы. Удалось заснять движения в тяжелых конструкциях, которые дотоле представлялись совершенно жесткими. Мощные рубильники при их выключении совершают упругие колебания и нередко выходят из строя только в результате вибрации. Тяжелые орудийные лафеты при выстреле совершают колебания и, по словам исследователя Г. С. Джонса, «трясутся как желе».

Скоростная съемка применялась для сравнения неподвижного пропеллера и пропеллера, вращающегося с большой скоростью. Изучалось распространение пламени и поведение головок клапанов в камере сгорания двигателя с искровым зажиганием. Исследовалось явление короткого замыкания при дуговой сварке и т. д.

При такой съемке необходимо открыть затвор аппарата или включить импульсный источник света в нужное время, очень точно согласовав эту операцию с развитием самого явления. Для этого различными авторами было разработано много интересных схем и устройств. Так, Г. И. Шаффри фотографировал всплеск жидкости в результате падения капли, используя для этого электрический контакт. Для получения такого снимка жидкость была сделана проводящей и один провод подводился к ней. Второй провод помещался на различной высоте над уровнем жидкости так, что замыкание электрической цепи, управляющей вспышкой лампы, производилось с различным запаздыванием, соответствующим разным фазам развития явления (рис. 28).

Еще более оригинальная схема задержки была применена для съемки насекомых в полете. Трудность здесь заключалась в том, что для получения достаточно резкого снимка нужно было сфокусировать аппарат на определенную точку сосуда и произвести снимок в тот момент, когда насекомое пролетит через эту точку. Задача была решена с помощью двух скрещенных фотоэлементов и двух источников света, расположенных так, что лучи пересекались в заданной точке. Схема срабатывала только в том случае, когда одновременно оказывались затемненными оба фотоэлемента.

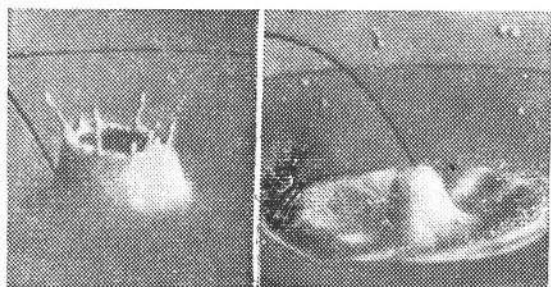


Рис. 28. Различные фазы всплеска воды при падении капли (по Г. И. Шафри)

Съемка производилась следующим образом: несколько штук жужжащих и упирающихся объектов съемки пустили в банку, снаружи которой были расположены фотоэлементы и источник света и связанный с ними фотографический аппарат. В момент, когда насекомое оказывалось в заданном месте, срабатывало автоматическое устройство и спускался затвор. Объект, так сказать, сам «давал команду» снять себя.

Ряд авторов посвятили свои работы спортивным задачам, таким, например, как правильный и неправильный удары клюшкой по мячу при игре в гольф, удар ногой по футбольному мячу (рис. 29). Некоторые работы были посвящены биологическим и медицинским задачам: были получены прекрасные снимки насекомых в полете, хамелеона, захватывающего приманку (рис. 30), скачущей ло-



Рис. 29. Импульсный рентгеновский снимок удара по футбольному мячу (по Г. С. Джонсу)

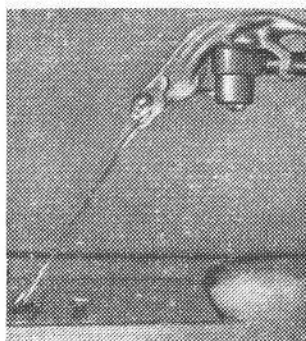


Рис. 30. Хамелеон, захватывающий приманку (по Е. Д. Эйлеу)

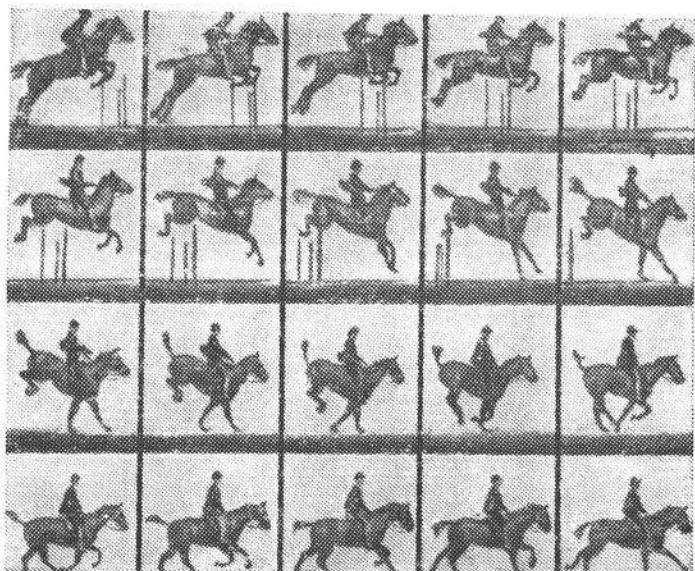


Рис. 31. Различные фазы скачка лошади (по Е. Майбриджу)

шадни (рис. 31). Высокоскоростная киносъемка бьющегося сердца животного до и после экспериментальных нарушений его работы позволила получить важные данные о его строении. Путем увеличения пространственного и временного масштабов при просматривании этих снимков удалось получить сведения не только о работе сердца в целом, но также и о работе отдельных мышечных волокон.

Наиболее широко скоростная съемка применялась для решения задач баллистики, например для изучения поведения снаряда после вылета его из дула орудия, механизма пробивания брони и т. д.

При скоростной съемке быстро протекающих явлений чрезвычайно существенной является синхронизация съемки с изучаемым процессом, создание калиброванного запаздывания съемки, позволяющего выделить ту или иную фазу явления, и получение в кадре меток времени, делающих съемку количественным методом исследования.

Важно отметить, что фотография и киносъемка сами по себе дают лишь *качественную* характеристику явлений и только сочетание скоростной съемки с пространственно-временной калибровкой позволяет получить очень ценный *количественный метод* исследования. Фотоснимок или серия снимков позволяют получить общие сведения о тече-

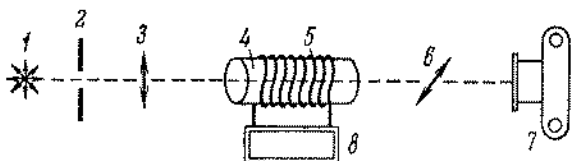


Рис. 32. Схема устройства фотозатвора, основанного на эффекте Фарадея: 1 — источник света, 2 — диафрагма, 3 — поляризатор, 4 — стеклянный цилиндр, 5 — катушка, 6 — анализатор, 7 — фотокамера, 8 — блок управления

нии явления, но только знание соответствующих расстояний и времен дает возможность количественно определить важные параметры изучаемого процесса: смещения, скорости, ускорения, усилия и т. д.

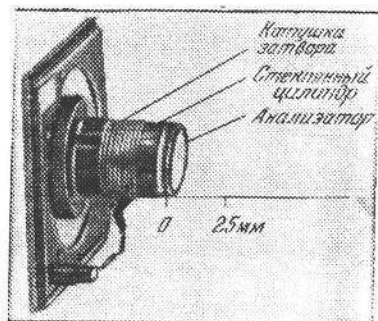
Для временной калибровки при не очень больших скоростях съемки применялось одновременное фотографирование на ту же пленку объекта съемки и циферблата часов. При высоких скоростях съемки метки времени получают следующим образом: камертонный генератор, настроенный на определенную частоту (например 1000 Гц), возбуждает искровой разрядник или инициирует вспышку аргоновой лампы. С помощью линзы свет от вспышек фокусируется на пленку между перфорацией и кадром. Таким образом, метки времени получают на той же пленке, где снят объект.

Таковы общие идеи «трансформации» времени для замедленного просмотра быстрых процессов. Методика решения отдельных задач такого рода достаточно интересна, часто оригинальна, нередко изящна и показывает, сколь значительно удалось расширить возможность познания природы.

Для сверхскоростной съемки различные виды механических фотозатворов оказались недостаточно быстрыми. Преодолеть эту трудность удалось путем использования эффекта Фарадея и эффекта Керра. Как известно, в 1846 г. Майкл Фарадей открыл влияние магнитного поля на свет. Убеденный в единстве всех явлений природы, Фарадей в течение многих лет искал проявления взаимодействия между светом и электромагнитными силами и, наконец, обнаружил, что при помещении в магнитное поле различные тела, в том числе обыкновенное стекло, вращают плоскость поляризации света.

Основанный на этом эффекте скоростной фотозатвор состоит из двух скрещенных поляризаторов и расположенного между ними стеклянного цилиндра, помещенного внутри катушки, обтекаемой электрическим током (рис. 32 и 33).

Рис. 33. Стекланный цилиндр с катушкой от фотозатвора, в котором используется эффект Фарадея



При прохождении тока через катушку стекло приобретает свойство вращения плоскости поляризации света и затвор открывается. С помощью таких затворов удалось получить экспозиции до одной микросекунды.

В таком устройстве довольно большое количество света теряется вследствие поляризации и поглощения в стеклянном блоке затвора. Однако эти потери света оказываются вполне допустимыми, если производится съемка достаточно ярких объектов, например различных взрывных явлений. Управление этими затворами осуществляется с помощью импульсов электрического тока. Длительность импульса определяется экспозицией, а регулируемое запаздывание импульса электрического тока по отношению к началу фотографированного явления позволяет выбрать нужный момент съемки.

Другой тип скоростного фотозатвора основан на использовании эффекта Керра. В 1875 г. И. Керр обнаружил, что есть некоторые вещества, например нитробензол, которые при наложении на них электрического поля приобретают свойство двойного лучепреломления и вращают плоскость поляризации света.

Современный скоростной фотографический затвор, основанный на эффекте Керра, состоит из двух поляроидов, между которыми помещена кювета с металлическими электродами, заполненная нитробензолом (рис. 34). Если поляроиды скрещены, а на электроды не подано электрическое напряжение, то через ячейку Керра свет не проходит. При подаче электрического напряжения на электроды свет через эту ячейку проходит. Так как электрическая емкость ячейки Керра очень небольшая, то на нее может быть подан весьма кратковременный импульс электрического тока. Используя ячейку Керра как фотографический затвор,

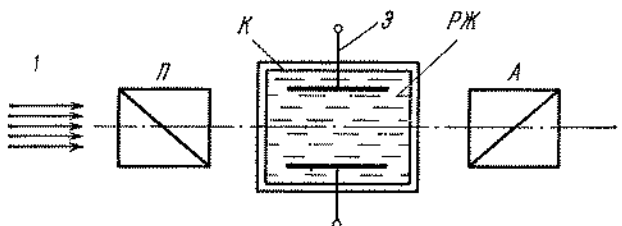


Рис. 34. Схема устройства фотозатвора, основанного на эффекте Керра; 1 — пучок света, П — поляризатор, К — кювета, РЖ — рабочая жидкость, Э — электроды, А — анализатор

удалось получить экспозиции длительностью лишь в несколько миллиардных долей секунды.

Однако это было лишь частью дела. Требовалось еще разработать такие устройства, которые позволяли бы смещать изображение относительно фотопленки или пленку относительно изображения с достаточно высокой скоростью. Для этого были разработаны и построены различные приборы, в том числе с вращающимися с очень большой частотой барабанами, в которые закладывается отрезок пленки. При этом прерывистое освещение и открытый затвор или сверхбыстрый затвор и постоянное освещение позволяют получить покадровую съемку.

В одном из приборов такого типа: ФК-1М (СССР) была получена покадровая съемка с частотой до 20 000 кадров/с, а в другом — камере Иемура М-3 (Япония) — частота съемки была доведена до 150 000 кадров/с.

Еще большие скорости съемки удалось получить в камерах с неподвижной фотопленкой и смещением относительно нее изображения объекта. В одном из приборов такого типа для смещения изображения применялось многогранное зеркало, которое вращалось с частотой в десятки и сотни тысяч оборотов в минуту (!), и разрешающая способность устройства была доведена до миллиардных долей секунды. Так, например, в скоростном фоторегистраторе СФР (СССР) в режиме фотокамеры частота съемки составляет $2,5 \cdot 10^6$ кадров/с.

В дальнейшем были разработаны приборы, в которых с помощью объектива, щелей, линз и вращающегося зеркала изображение объекта с большой скоростью перемещается вдоль нескольких, расположенных рядом так называемых вторичных объективов, формирующих ряд изображений на фотопленке (рис. 35). В таких системах число отдельных кадров равно числу вторичных объективов.

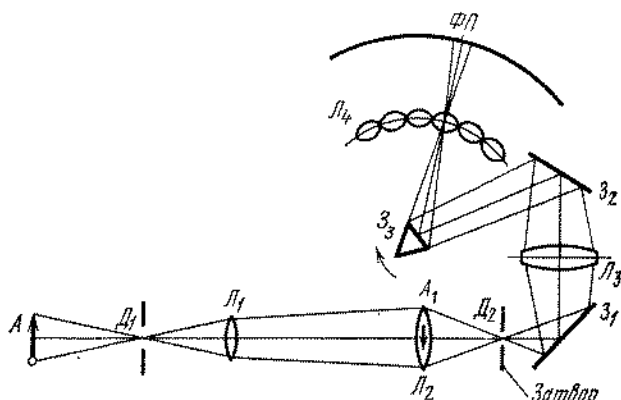


Рис. 35. Схема камеры Бриксона с вторичными объективами: А — объект съемки, Д₁, Д₂ — диафрагмы, Л₁—Л₃ — линзы, З₁, З₂ — зеркала, З₃ — вращающееся зеркало, Л₄ — вторичные объективы, ФП — фотопленка

Один из приборов такого типа, например фирмы Бекман и Уитли (США), при размере кадра $3,2 \times 8,5$ мм позволяет получить несколько десятков кадров при частоте съемки до $20 \cdot 10^3$ кадров/с.

Когда исследователи пожелали еще больше повысить частоту покадровой съемки, они столкнулись с тем, что все технические возможности известных методов уже доведены до предела. Заставить фотопленку двигаться еще быстрее было крайне трудно, к тому же целесообразность этого была под сомнением, так как при увеличении скорости движения пленки возрастает ее деформация и ухудшается качество изображения.

Получить еще более быстрое смещение изображения относительно пленки тоже было крайне трудно, так как уже и так использовались зеркала, вращающиеся с частотами до сотен тысяч оборотов в минуту. Однако если бы это и удалось, то для того, чтобы изображение не получилось смазанным, нужно соответственно уменьшить либо длительность экспозиции, либо ширину щели, через которую производится экспонирование пленки, либо размеры кадра. Уменьшить размер кадра или ширину щели, конечно, совсем несложно, но при этом существенно ухудшается качество изображения. Идти в этом направлении далеко — опасно, так как можно в конце концов получить крайне быструю смену фотокадров, на которых уже ничего нельзя будет рассмотреть. Что касается увеличения быстродействия фотозатворов, то, по крайней мере для известных методов, технический предел уже был достигнут.

Между тем решение все же было найдено и очень остроумное. Не безынтересно отметить, что важная часть этого решения была уже давно известна, и на ее основе десятки лет для детей делали так называемые живые картинки, а для взрослых — один из видов фотографической рекламы.

Напомним устройство таких систем. Основную их часть составляет непрозрачная пластинка, в которой имеется ряд прозрачных щелей. Пусть ширина щели в 30 раз меньше промежутка между щелями. Наложим такую *кадрообразующую решетку* на фотографическую бумагу и отпечатаем то или иное изображение. Затем сдвинем решетку на расстояние, равное ширине щели, и отпечатаем на фотобумаге еще одно изображение. Очевидно, что в данном случае можно на одном листе фотобумаги отпечатать 30 разных неперекрывающихся друг друга изображений. При рассмотрении экспонированной 30 раз фотобумаги без кадрообразующей решетки вряд ли что-либо удастся на ней разобрать. Однако достаточно на отпечатки кадрообразующую решетку, а затем смещать ее для того, чтобы последовательно увидеть все 30 изображений. Если с помощью кадрообразующей решетки последовательно сфотографировать различные фазы движения, а затем при рассмотрении изображений смещать кадрообразующую решетку, то можно увидеть ряд отдельных кадров, характеризующих различные фазы движения. Если смещать решетку достаточно быстро, то на изображениях фигуры кажутся движущимися. В этом методе очень существенно, что *при смещении решетки лишь на часть кадра получается ряд последовательных изображений отдельных и целых кадров.*

Применение такого метода для сверхбыстрой фотографии получило название растровой съемки. Были разработаны различные варианты соответствующих приборов, например со смещением фотопленки относительно растра, растра относительно пленки, со смещением изображения вращающимся зеркалом и т. д. В одном из таких устройств — фотокамере ФКР-2 (СССР) — при общем числе снимаемых кадров, равном 100, и частоте вращения зеркала 80 000 об/мин, частоту съемки удалось довести до $5 \cdot 10^8$ кадров в секунду.

Были разработаны также устройства для *высокоскоростной импульсной рентгенографии*. В таких приборах источником является острофокусная импульсная рентгеновская трубка, дающая мощную и очень короткую (менее 1 микросекунды) посылку рентгеновских лучей. Эти лучи просвечивают объект и дают его теневое изображение. Таким об-

разом были получены снимки пули, пробивающей броню. При этом путем согласования начала съемки и интервалов между отдельными кадрами с началом изучаемого процесса и скоростью его протекания удалось заснять отдельные этапы явления: увидеть, как пуля подлетает к броне и затем продавливается через нее, какие деформации происходят при этом в броне и пуле и т. д.

Были разработаны аналогичные высокоскоростные фотографические устройства для съемки в бета-лучах, т. е. потоке электронов. Для этого применяются высоковольтные импульсные трубки. В одном из таких приборов получен пучок электронов с энергией 500 000 эВ и длительностью 3 нс ($3 \cdot 10^{-9}$ с). Оказалось, что, в отличие от рентгеновских лучей, *бетаграфия* дает хорошие контрастные снимки даже при регистрации очень мелких частиц (до 25 мкм).

В самые последние годы для решения указанных выше задач была использована также и голография. Напомним, что голографические снимки после надлежащей обработки позволяют получить изображение объектов. При скоростной голографической съемке в качестве источников используются импульсные лазеры, дающие наносекундные посылки света, развертка изображения осуществляется одним из описанных выше способов и применяются различные виды быстрых фотозатворов.

Трансформация времени электронно-оптическим преобразователем

Совершенно особые перспективы в отношении изменения масштаба времени открывает использование для скоростной съемки электронно-оптического преобразователя. Возможности научной скоростной съемки в основном определяются четырьмя элементами системы: осветителем, затвором, цепью синхронизации с калиброванной задержкой времени, а также устройством для перемещения пленки относительно изображения или изображения относительно пленки.

При настоящем уровне развития техники вопросы освещения не ограничивают скорости съемки, так как при съемке ярких самосветящихся объектов оказывается достаточно собственного света, а при съемке несамосветящихся объектов достаточная яркость освещения обеспечивается импульсными источниками света. Не ограничивают скорости съемки и цепи синхронизации и задержки, так как

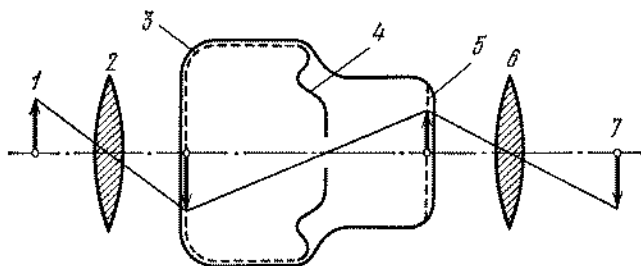


Рис. 36. Схема устройства электронно-оптического преобразователя

электронная коммутация может быть сделана достаточно быстродействующей.

Значительно более трудным оказывается создание достаточно быстродействующих затворов, а также устройств для перемещения пленки или изображения с требуемой весьма высокой скоростью.

Использование системы электронно-оптического преобразователя в качестве скоростного затвора и одновременно как устройства для смещения изображения имеет ряд преимуществ перед ранее описанными приборами. В съемочной камере с электронно-оптическим преобразователем можно получить чрезвычайно короткие экспозиции и настолько большие скорости съемки, что разрешающее время оказывается порядка миллиардных долей секунды. Электронно-оптический преобразователь позволяет усиливать яркость изображения. Наконец, использование электронно-оптического преобразователя открывает возможность наблюдения в инфракрасных и рентгеновских лучах.

Принцип действия электронно-оптического преобразователя следующий (рис. 36). Оптическое изображение объекта 1 с помощью главного объектива 2 фокусируется на фотокатод преобразователя 3. При этом из фотокатода выбиваются электроны, которые с помощью электронной оптики 4 фокусируются на флуоресцирующем экране 5. Электронная оптика представляет собой систему диафрагм, на которые поданы соответствующие электрические потенциалы. Экран делается в виде пластинки с нанесенным на нее слоем люминофора. В нем электронное изображение объекта преобразуется в световое. Далее с помощью вспомогательного объектива 6 это изображение переносится на фотопленку 7.

Так как фотокатод можно заставить работать не только от видимых глазом лучей, но и от инфракрасных или

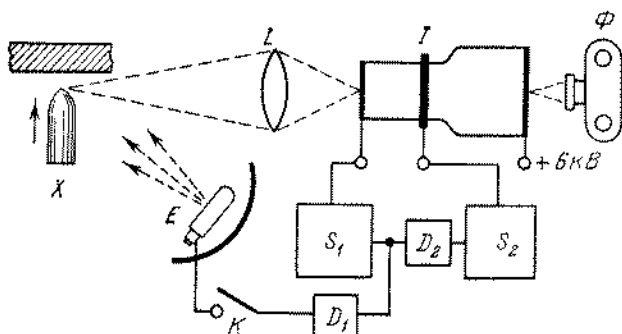


Рис. 37. Схема получения отдельных фотоснимков с преобразователем

рентгеновских, то с помощью преобразователя съемку можно осуществлять в широкой области светового спектра.

Манипуляции с фокусирующей системой трубки позволяют получать как уменьшенное, так и увеличенное изображение объекта. Поскольку яркость свечения экрана зависит от энергии ударяющихся о него электронов, то усиление яркости оптического изображения, возникающего на экране, может быть получено путем ускорения потока электронов. Для этого на анод трубки подается высокое напряжение: 6—10 киловольт.

Теперь рассмотрим, как производится высокоскоростная съемка. Изображение объекта X (рис. 37) с помощью линзы L фокусируется на поверхность фотокатода трубки I . В качестве источника света используется импульсная лампа E . Все переключения при съемке производятся с помощью системы быстродействующих электрических переключателей, связанных между собой. Нажатием ключа K включается импульсная лампа E и одновременно посылается сигнал тока в блок S_1 , управляющий включением трубки электронно-оптического преобразователя. Однако прежде чем попасть в блок S_1 , сигнал тока проходит через калиброванный замедлитель D_1 , создающий нужное запаздывание начала съемки.

При срабатывании блока S_1 трубка отпирается и начинается съемка и одновременно посылается сигнал тока в блок S_2 , управляющий выключением преобразователя. Прежде чем попасть в блок S_2 , сигнал тока проходит через калиброванный замедлитель D_2 . Таким образом, замедлитель D_2 управляет экспозицией при съемке. Фотоаппарат Φ служит для съемки изображения, получающегося на экране электронно-оптического преобразователя.

Отпирание и запираание изображения, перемещение его по экрану трубки, синхронизация этих манипуляций с различными моментами или течением снимаемого процесса, создание заданной задержки времени, наконец, строгая калибровка съемки по времени,— в общем, любого рода коммутация изображения в электронно-оптическом преобразователе производится быстрее, легче и точнее, чем в какой-либо из ранее описанных систем. Это происходит потому, что изображением управляют на той его промежуточной стадии, когда оно существует как *электронное*, т. е. управляют не пучком света, а пучком электронов.

С помощью такой системы была получена серия снимков с экспозицией 0,1 мкс, показывающих различные стадии развития и затухания разряда импульсной лампы.

На настоящем этапе развития техники высокоскоростной съемки с электронно-оптическим преобразователем предел увеличению скорости кладется возможностями смещения изображения. И. С. Куртней-Прагг путем подачи на отклоняющие катушки синусоидального тока получил скорости отклонения около 300 000 м/с, что в тысячу раз превышает скорости, достигнутые с лучшими механическими (например, барабанными) устройствами. Полученное при этом разрешающее время было около миллиардной доли секунды. Это значит, что такая установка в состоянии отметить разность во времени прихода двух световых лучей с разностью хода меньше одного метра.

Отдельные снимки таких сверхскоростных серий столь кратковременны (миллионные, десятиллионные и даже миллиардные доли секунды), что при рассматривании этих фотографий кажется, будто для их получения на миг удалось «остановить» время. Такое впечатление невольно создается, когда, например, рассматриваешь серию снимков, на которых запечатлены отдельные моменты опрокидывания мчащегося автомобиля, полет ракеты, разные этапы пробивания брони пулей, течение разряда в импульсной лампе, перегорание плавкого предохранителя, развитие детонации в камере сгорания автомобиля или последовательные моменты развития взрыва и т. д.

Таким образом, в отношении трансформации времени, т. е. способов просматривать тот или иной процесс в ином темпе, достигнуты весьма большие успехи. Если приборы — это «протезы» человечества, его искусственные глаза и руки, то описанные выше, по крайней мере в некоторых отношениях, совершеннее натуральных.

Изучение атомных и ядерных процессов, протекающих за миллионные, миллиардные и биллионные доли секунды

Длительность некоторых ядерных процессов

В описании методов и приборов для измерения коротких промежутков времени мы подошли к пределу, достигнутому современной измерительной техникой. Задачи, которые потребовали разработки этих исключительно быстродействующих приборов, связаны с изучением элементарных частиц, атомного ядра и ядерных реакций.

Измерение промежутков времени, в течение которых протекают различные явления микромира, является необходимым для понимания их природы и выяснения возможностей технического использования. В частности, изучение скоростей различных процессов, связанных с атомным ядром, важно для понимания строения вещества и необходимо при разработке устройств для получения и использования ядерной энергии.

Среди радиоактивных изотопов различных веществ наряду с долгоживущими есть и такие, *период полураспада* которых, т. е. время, в течение которого распадается половина количества вещества, имевшегося вначале, чрезвычайно мал. Даже у различных изотопов одного и того же элемента периоды полураспада оказываются существенно разными. Так, например, период полураспада полония-210 составляет 138,3 дня, а полония-216 — 0,16 с, период полураспада полония-214 равен $1,58 \cdot 10^{-4}$ с, полония-213 — всего лишь $4,2 \cdot 10^{-6}$ с и, наконец, период полураспада полония-212 равен $3 \cdot 10^{-7}$ с.

Некоторые из элементарных частиц стабильны, другие неустойчивы и самопроизвольно распадаются. Таковы,

например, имеющиеся в космическом излучении нестабильные частицы — мезоны и гипероны. Средняя продолжительность жизни мюонов (μ^\pm -мезонов) равняется миллионным долям секунды, положительно и отрицательно заряженных пионов (π^\pm -мезонов) — стомиллионным долям секунды, заряженных сигма-частиц (гиперонов) — около десяти миллиардной доли секунды (10^{-10} с), нейтральных сигма-частиц — около стомиллиардной доли секунды (10^{-11} с), а средняя продолжительность жизни нейтральных пионов (π^0 -мезонов) — около 10^{-16} с.

При радиоактивном распаде и в результате ядерных реакций в ряде случаев ядро, получившееся в результате превращения, оказывается в возбужденном состоянии, т. е. имеет некоторый избыток энергии. Переход возбужденного ядра в нормальное состояние совершается путем испускания гамма-квантов. Этот процесс протекает очень быстро, но не мгновенно, и притом с различной длительностью у различных радиоактивных изотопов. Так, например, золото-198 при бета-распаде превращается в ртуть-198, причем ядро ртути-198 оказывается в возбужденном состоянии и, переходя в нормальное, испускает гамма-кванты. При бета-распаде ядра золота-199 получающееся дочернее ядро ртути-199 также оказывается возбужденным и тоже спустя некоторое время испускает гамма-квант.

Период полураспада ртути-199 составляет около миллиардной доли секунды (10^{-9} с), а ртути-198 — около стомиллиардной доли секунды (10^{-11} с). Еще более кратковременным оказывается возбужденное состояние ядра лития-7, получающегося в результате ядерной реакции взаимодействия бора с нейтроном. Определение среднего времени жизни этого возбужденного состояния дало значение около десяти миллиардной доли секунды (10^{-13} с).

В пятидесятые годы учеными была открыта еще целая группа частиц, которые оказались относительно тяжелыми и чрезвычайно короткоживущими. Эти частицы получили название *резонансов*. Их открытие связано с созданием специальной измерительной техники — так называемых *пузырьковых камер*.

Пузырьковая камера представляет собой сосуд, снабженный смотровыми окнами и заполненный жидким водородом. Пролетая через такую камеру, заряженная частица создает на своем пути цепь пузырьков газообразного водорода и таким образом оставляет видимый след, который можно наблюдать и фотографировать. Именно таким образом были одни за другим открыты различные резонансы,

изучены свойства этих частиц и происходящие с ними реакции. Однако среднее время жизни резонансов оказалось настолько малым, что ни один из современных методов еще не дал возможности измерить его непосредственно.

Между тем косвенным путем это сделать все же удалось. Такой косвенный путь основан на следующих соображениях: при определении энергии и массы резонансов можно экспериментально определить ширину энергетического интервала, характерного для каждого из них. Согласно принципу неопределенности квантовой механики эта ширина тем больше, чем меньше среднее время жизни самой частицы: $\Gamma = \hbar/2\pi\tau$, где Γ — ширина энергетического интервала данной частицы, \hbar — постоянная Планка ($\hbar/2\pi = 1,05 \times 10^{-27}$ эрг·с), а τ — среднее время жизни частицы. Отсюда, зная экспериментальное значение ширины энергетического интервала частицы, можно вычислить среднее время ее жизни.

Найденные таким образом средние времена жизни различных резонансов составляют около 10^{-22} — 10^{-24} с. Например, один из резонансов, энергия которого составляет 1238 МэВ, или 2420 электронных масс, имеет найденную экспериментально ширину $\Gamma \approx 100$ МэВ, откуда его расчетное среднее время жизни

$$\tau = \frac{\hbar}{2\pi\Gamma} = \frac{1,05 \cdot 10^{-27}}{100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} \approx 10^{-28} \text{ с.}$$

Напомним, что $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ эрг.

Еще один резонанс, масса которого 3230 МэВ, имеет ширину энергетического интервала $\Gamma \sim 440$ МэВ, откуда следует, что его расчетное среднее время жизни около 10^{-24} с. Этот резонанс распадается на нуклон и π -мезон.

При изучении ядерных процессов задача измерения очень коротких промежутков времени осложняется тем, что изучаемые явления, например радиоактивный распад атомных ядер, появление тех или иных частиц в потоке космических лучей и т. д., носят не периодический характер, а являются однократными и нерегулярными.

В разработке методов и приборов для измерения очень коротких промежутков времени в общем наметилось три основных направления.

Первое направление заключается в создании схем, позволяющих непосредственно отмечать измеряемый промежуток времени, например, путем запуска и остановки быстродействующих пересчетных устройств, получения на экране осциллографной трубки изображений, длина которых

пропорциональна измеряемому промежутку времени, и т. п. Такие методы оказались удобными и эффективными для измерения коротких промежутков времени вплоть до миллионных и миллиардных долей секунды.

Второе направление заключается в создании схем с калиброванной задержкой времени и элементом схемы, отмечающим одновременное поступление на него двух сигналов. Такие схемы требуют кропотливых и длительных измерений по подбору нужной, но заранее неизвестной задержки времени. Однако именно эти схемы позволили экспериментально определять очень короткие промежутки времени вплоть до пяти стомиллиардных долей секунды ($5 \cdot 10^{-11}$ с).

Третье направление заключается в создании специальных схем, учитывающих специфические особенности каждого данного исследуемого явления и вытекающие из них возможности. Идя по этому пути, удалось экспериментально определить промежутки времени около 10^{-13} с (см. с. 137).

Значения более коротких промежутков времени, в течение которых протекают некоторые ядерные процессы, были получены косвенным, расчетным путем, основанным на теоретических соображениях о строении ядер и сопоставлении различных их характеристик. Такие определения, конечно, ценны, но менее убедительны, чем прямые. Поэтому актуальной является разработка экспериментальных методов определения еще более коротких промежутков времени.

При этом существенно следующее: когда длительность исследуемого процесса удастся определить экспериментально, то могут представиться по крайней мере три следующих случая:

1) длительности процесса, определенные из расчета и эксперимента, в пределах погрешности измерений и допущений гипотезы совпадают. Это означает, что гипотеза заслуживает доверия и, возможно, что ее следует возвести в ранг теории;

2) длительности процесса, определенные из расчета и эксперимента, не совпадают, причем расхождение теории и опыта в несколько раз превышает погрешности измерений. Значит, либо неправильна гипотеза, либо ошибочен эксперимент, либо неверны и гипотеза и эксперимент. Их следует пересмотреть и улучшить;

3) изучаемое явление содержит несколько неизвестных параметров, в том числе длительность процесса или отдельных его этапов. В этом случае экспериментальное определе-

ние соответствующих интервалов времени дает дополнительные возможности для понимания изучаемого явления и соответствующих количественных его расчетов.

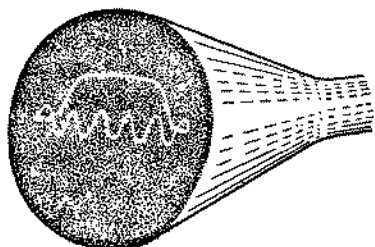
В течение последних десятилетий физикам, при изучении атомных и ядерных процессов, неоднократно приходилось сталкиваться с реализацией каждого из этих трех случаев. Поэтому усиленная разработка методов и устройств для прямого определения крайне коротких промежутков времени объясняется отнюдь не стремлением к рекордам, а насущной необходимостью, связанной с характером изучаемых задач.

Быстродействующие приборы с осциллографами

При исследовании явлений, происходящих в атоме, атомном ядре и космическом излучении, возникает необходимость в измерении очень коротких промежутков времени и притом для событий однократных и нерегулярных. Для решения такого рода задач Г. Килли разработал и построил прибор с высоковольтным осциллографом, в котором два электрических сигнала, промежуток времени между которыми нужно измерить, поступают на вход электрической схемы прибора. При этом первый из них отклоняет электронный луч от оси, а второй возвращает его к ней обратно. Так как одновременно с этим луч с большой скоростью движется вдоль оси, то на экране осциллографа получается П-образная кривая (рис. 38). Длина плато этой кривой позволяет судить о длительности измеряемого промежутка времени.

Для калибровки прибора на вход этой же трубки подаются высокочастотные электрические колебания известной частоты. Одновременная запись измеряемой П-образной и калибровочной синусоидальной кривых позволяет определить измеряемый промежуток времени с хорошей

Рис. 38 Кривая градуировки шкалы времени и П-образная кривая



точностью. Так, например, если стандарт-генератор вырабатывает переменный ток синусоидальной формы, имеющий частоту, равную десяти миллионам периодов в секунду, а по длине плато П-образной кривой укладываются четыре периода синусоиды, то длительность измеряемого процесса составляет четыре десятимиллионные доли секунды ($4 \cdot 10^{-7}$ с).

В приборе с высоковольтным осциллографом измерения получаются непрерывными, так как схема не настраивается на какой-либо определенный промежуток времени и в некотором интервале позволяет измерять любые промежутки.

Прибор пригоден для измерения промежутков времени порядка миллионных и миллиардных долей секунды. С помощью такого прибора измерялась скорость радиоактивного распада некоторых короткоживущих радиоактивных изотопов, например радиоактивного изотопа ртути с атомной массой 197, период полураспада которого (для изомерного перехода) оказался равным семи миллиардным долям секунды, и т. д.

Для измерения очень коротких промежутков времени в 1952 г. Ф. С. Завельским была предложена специальная электрическая схема, позволяющая определять измеряемый интервал времени по сдвигу фазы между двумя синусоидальными колебаниями одинаковой частоты. В этом приборе приемниками явлений служат счетчики ядерных излучений. Сигналы от этих счетчиков последовательно один за другим запускают два генератора, вырабатывающих высокочастотные колебания. От первого генератора колебания поступают на одну пару пластин *низковольтного осциллографа*, а от второго генератора — на вторую пару. Если между этими колебаниями нет сдвига фазы, то на экране осциллографа видна окружность. При наличии сдвига фазы и в зависимости от размера этого сдвига получаются фигуры Лиссажу разной формы. Измерив отношение длин полуосей этих фигур, можно определить сдвиг фазы, а по этому сдвигу найти измеряемый промежуток времени между приходом сигналов. Измерения производятся в интервале разности фаз от 0° до 180° , так как при больших разностях фаз повторение картины создает неопределенность в отсчете.

Такой прибор позволяет получить более или менее длительное изображение от кратковременных, однократных и нерегулярных явлений. В ряде случаев это оказывается удобным.

Метод запаздывающих совпадений

Идея этого метода проста. Она основана на использовании в схеме такого элемента, который срабатывает, когда на него попадают два сигнала одновременно, и не срабатывает, если сигналы приходят порознь. Если скоро мы предположим, что такой элемент в схеме есть, то задача измерения короткого промежутка времени между событиями сводится к тому, чтобы, подавая на этот элемент соответствующие электрические сигналы, первый из них задержать ровно настолько, чтобы он пришел одновременно со вторым, и измерить созданную для этого задержку.

Прибор, работающий по методу совпадений, состоит из двух приемников явлений (например, счетчиков ядерных излучений), двух усилителей, переменной калиброванной линии задержки, схемы совпадений и регистратора (рис. 39).

Счетчики регистрируют течение изучаемого процесса, например радиоактивный распад, пролет заряженной частицы и т. д. При срабатывании счетчика на его выходе появляется короткий сигнал электрического тока. При прохождении через усилители амплитуда этих сигналов увеличивается в определенное число раз. С выхода первого усилителя сигнал поступает на схему совпадений, предварительно пройдя линию задержки, с выхода второго усилителя — непосредственно.

В качестве линий задержки применяют отрезки коаксиального кабеля. Если нужно задержать сигнал на стомиллионные доли секунды, то отрезок кабеля должен иметь длину в несколько метров.

Схемы совпадений бывают разных типов. Один из них аналогичен электрической цепи с двумя выключателями, соединенными последовательно, так что ток может

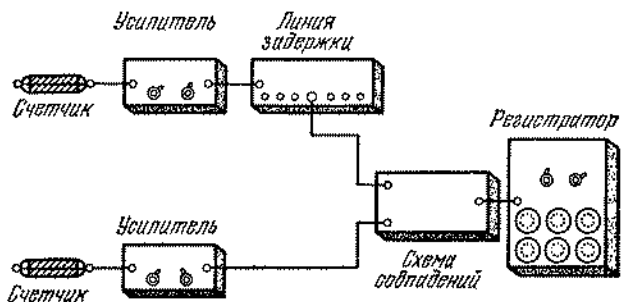


Рис. 39. Структурная схема запаздывающих совпадений

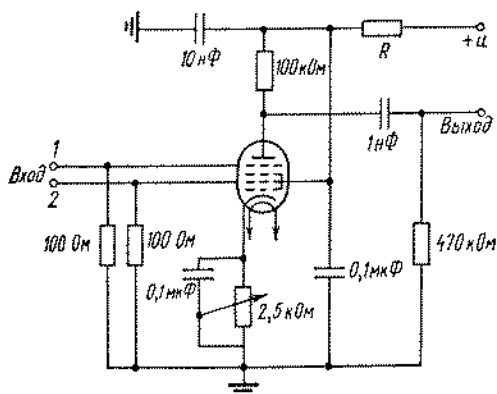


Рис. 40. Схема совпадений В. Боте

пройти лишь тогда, когда оба они включены. В такой схеме совпадений используется многосеточная электронная лампа, у которой на обе управляющие сетки подано отрицательное запирающее напряжение такой величины, что отпирается лишь одна из сеток еще недостаточно для прохождения сигнала. Лишь тогда, когда на обе сетки одновременно приходят положительные сигналы, лампа отпирается и сигнал проходит.

Эта схема была предложена В. Боте в 1929 г. (рис. 40). В дальнейшем указанная схема неоднократно и успешно применялась при решении различных физических задач. Использование в ней сцинтилляционных счетчиков, дающих сигналы длительностью в миллиардные доли секунды, а также современных типов радиоламп и транзисторов позволило получить разрешение по времени порядка 1—2 наносекунд.

Другой тип схемы совпадений, разработанный Б. Росси, состоит из двух электронных ламп L_1 , L_2 , соединенных параллельно, а также нагрузочного сопротивления R_3 , входных сопротивлений R_1 , R_2 , разделительных конденсаторов C_1 , C_2 и регистратора (рис. 41). Перед началом работы обе лампы отперты, поэтому их сопротивление мало и потенциал в точке O низкий. Внешние сигналы имеют отрицательную полярность и, приходя на сетки электронных ламп, запирают их. Однако запирающее действие лишь одной из ламп мало меняет их общее сопротивление, между тем как одновременное запирающее действие обеих ламп резко увеличивает их общее сопротивление и падение напряжения на них.

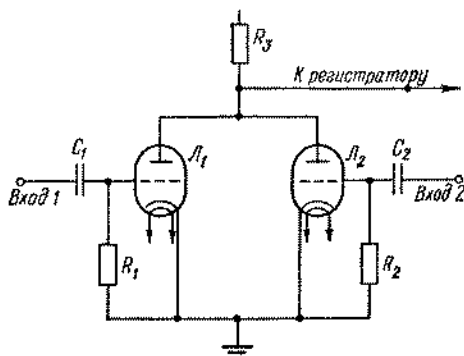


Рис. 41. Схема совпадений Б. Росси

При этом потенциал в точке O увеличивается и создается сигнал, который сосчитывается регистратором.

В дальнейшем было разработано несколько схем совпадений на электронных лампах, отличающихся большим быстродействием, а в последние годы созданы ячейки совпадений на полупроводниках, позволяющие измерять промежутки времени меньше миллиардных долей секунды.

Р. Грехем и Р. Е. Белл, использовав схему запаздывающих совпадений с «быстрой» ячейкой Росси, довели разрешающую способность метода до стомиллиардных долей секунды. Так, в частности, было определено среднее время жизни возбужденного состояния ядра атома ртути-198, которое составляет лишь стомиллиардные доли секунды, и изучены многие другие очень быстрые процессы.

Сверхбыстрый фотозатвор и период релаксации молекул

Насколько важно при решении какой-либо научной или технической задачи знать: разрешима она или нет? Психологически — это очень важно. Знать, что цель может быть достигнута, — это уже больше трети успеха, хотя от этого знания до создания метода и прибора путь бывает очень нелегким и томительно длинным.

Как часто уверенность в успехе предрешает его. Разве Магеллан искал бы так настойчиво путь вокруг Земли, если бы не был уверен, что он есть? Разве один из главных секретов создания атомной бомбы не состоял в том, что ее можно сделать, и разве этот секрет не испарился вместе

с державшей первую такую бомбу стальной башней и не рассеялся по всему миру из грибовидного облака?

Когда с помощью оптических и электронно-оптических фотозатворов удалось получить экспозиции порядка миллиардных долей секунды, то это справедливо было признано великолепным достижением. Однако при этом все же возникли следующие вопросы: можно ли с помощью устройств такого типа получить еще большее быстродействие? Если этого достигнуть нельзя, то почему? А если можно, то как?

Между тем в середине нашего века предполагалось, что для дальнейшего уменьшения экспозиций с помощью фотозатвора на ячейке Керра нужно выполнить по крайней мере два следующих условия: 1) найти такую рабочую жидкость, в которой длительности ориентации и дезориентации молекул достаточно короткие и 2) суметь создать на электродах ячейки достаточно большие и короткие управляющие электрические импульсы.

Однако в те годы путей для получения более коротких управляющих электрических импульсов найдено не было и, кроме того, считалось (и притом ошибочно!), что период релаксации молекул (т. е. время, необходимое для их перехода в другое состояние) составляет около 10^{-9} с. Нетрудно понять, что эти обстоятельства указывали на невозможность дальнейшего увеличения быстродействия таких затворов.

В те же годы путь для преодоления этих трудностей в значительной мере уже был подготовлен. Ранее мы уже говорили о том, что в середине нашего века были изобретены квантовые генераторы электромагнитного излучения (см. с. 80—84). В последующие десятилетия эта область науки и техники бурно развивалась: были разработаны и построены различные типы квантовых генераторов, работающих в оптическом диапазоне частот (лазеры), в том числе газовые и твердотельные, непрерывного действия и импульсные, маломощные и сверхмощные и т. д. Лазерная техника оказалась весьма эффективной в самых различных областях, например в металлургии, дальней связи, медицине, при ядерном синтезе и т. д.

Лазерный луч — это очень короткая и узконаправленная электромагнитная волна, характеризующаяся определенной напряженностью электрического и магнитного полей, частотой, с которой они пульсируют, и скоростью их распространения в среде. Если лазер работает в импульсном режиме, то при этом вырабатываются более или менее ко-

роткие суги волн, т. е. посылки, перемежающиеся паузами. Уже удалось получить посылки длительностью лишь в 10^{-11} и даже 10^{-13} с со значительно более длинными паузами между ними. При этом оказалось возможным сосредоточить в таких посылках весьма большие мощности, вплоть до десятков и даже сотен миллионов ватт. При прохождении такого лазерного луча на короткое время и в определенных местах среды создаются весьма высокие напряженности электрического и магнитного полей.

С помощью этих устройств было обнаружено, что некоторые непрозрачные растворы (например, раствор криптоцианина в метиловом спирте) при попадании в них лазерного луча на некоторое время *просветляются*. Оказалось, что время, необходимое для их просветления, составляет около 10^{-11} — 10^{-12} с, а для восстановления их непрозрачности требуется примерно столько же времени или чуть больше. Указанный эффект имеет место только при воздействии импульса большой мощности, так как слабый импульс, переводя в другое состояние лишь часть молекул, не делает весь раствор прозрачным.

Таким образом, комбинация из кюветы с соответствующим раствором и импульсного лазера большой мощности может быть использована как фотозатвор.

В конце 60-х и начале 70-х годов нашего века на основе ячейки Керра и с помощью остроумного и изящного использования современной лазерной техники был создан сверхбыстрый фотозатвор *). Напомним, что на пути его создания было по крайней мере два препятствия: трудность получения на электродах ячейки Керра достаточно короткого управляющего электрического сигнала большой величины и ошибочное представление о том, что длительность релаксации молекул составляет миллиардные доли секунды.

Первое препятствие было преодолено тем, что ячейка Керра была вообще лишена электродов, а вместо управляющего электрического сигнала на нее был подан чрезвычайно короткий и мощный импульсный луч от лазера, который и создал в ней электрическое поле нужной величины и длительности. Для преодоления второго препятствия предполагалось искать соответствующие жидкости, однако оно отпало, когда удалось измерить длительность релаксации молекул в уже известных рабочих жидкостях.

*) Фабелинский И. Л.// Природа.— 1973.— № 3.

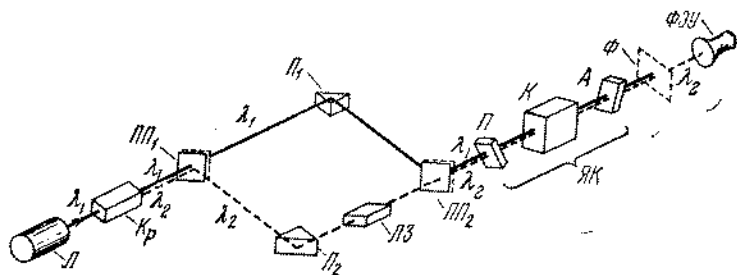


Рис. 42. Схема устройства сверхбыстрого фотозатвора с ячейкой Керра

Это было сделано так: на ячейку Керра, состоящую из кюветы с рабочей жидкостью и двух скрещенных поляризаторов, было подано два сигнала: мощный — управляющий и слабый — зондирующий, причем так, что между ними имелся заданный и переменный сдвиг во времени. В соответствующем приборе (рис. 42) источником мощного сигнала является лазер L , работающий в импульсном режиме на длине волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм и испускающий мощные наносекундные (10^{-12} с) импульсы волн. Эти импульсы направляются на кристалл калийдигидрофосфата Kp , который преобразует часть этого света в световые же сигналы с длиной волны $\lambda_2 = 0,53$ мкм (зеленый свет). Таким образом, из этого кристалла выходят уже два сигнала: мощный с длиной волны λ_1 и слабый с длиной волны λ_2 . Эти сигналы попадают на полупрозрачную пластинку $ПП_1$, которая пропускает мощный сигнал и отражает слабый. Следовательно, далее сигналы идут разными путями: λ_1 проходит через полупрозрачную пластинку $ПП_1$ и попадает на призму P_1 , отражается от ее внутренней грани под прямым углом, доходит до второй полупрозрачной пластинки $ПП_2$, отражается от нее и попадает в ячейку Керра $ЯК$, состоящую из поляризатора P , кюветы K и анализатора A .

Между тем зеленый луч λ_2 отражается от полупрозрачной пластинки $ПП_1$, попадает на призму P_2 , отражается от ее внутренней грани под прямым углом, проходит через пластинку $LЗ$, попадает на полупрозрачную пластинку $ПП_2$ и, пройдя через нее, попадает в ту же ячейку Керра.

Из кристалла Kp выходят два луча и до ячейки Керра длина их путей приблизительно одинакова, причем каждый из них один раз отражается от полупрозрачной пластинки и один раз проходит через нее и по одному разу отражается от призмы. Однако зеленый луч, кроме того, еще проходит через пластинку $LЗ$. Так как плотность этой пластинки

больше, чем плотность окружающей среды, а скорость распространения света в ней соответственно меньше, то в кювету зеленый луч λ_2 приходит несколько позже, чем сигнал λ_1 . Пластика ЛЗ выполняет функцию лини задержки времени. В опыте пользуются набором таких пластинок и по мере надобности их меняют.

Таким образом, зеленый луч можно подать в кювету тогда, когда она уже подвергалась воздействию мощного сигнала λ_1 . В этом случае зеленый луч попадает в уже открытую ячейку Керра ЯК, проходит ее, зеленый фильтр Ф и попадает на фотоумножитель ФЭУ, который его и регистрирует. Нетрудно видеть, что, меняя задержку, можно определить, через сколько времени после попадания в кювету мощного управляющего сигнала затвор открывается и через сколько времени после ухода этого сигнала он закрывается.

Как видно разрешены в этом методе и приборе казались бы непреодолимые трудности. Генератор коротких сигналов и пара пластин, образующих хотя и очень малую, но все же конечную электрическую емкость, не давали возможности создать в кювете нужное электрическое поле и в то же время сделать управляющий сигнал короче определенной величины. С помощью лазерного импульса все это удалось осуществить. Согласование столь кратковременных сигналов между собой во времени представляет огромные трудности. Ведь за 10^{-12} с даже самые быстрые сигналы — электрические или световые — успевают переместиться лишь на доли миллиметра. Их согласование не в состоянии обеспечить ни механические, ни электронные переключатели. Между тем в этом методе и устройстве с помощью раздвоения луча и введения калиброванной лини задержки коммутация осуществляется с великолепной точностью, надежностью и простотой.

Таким образом было определено время релаксации молекул разных рабочих жидкостей. Для нитробензола оно оказалось равным (32 ± 6) пс; для толуола — (14 ± 2) пс, а для сероуглерода около 2,5 пс ($1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$).

С помощью устройства такого типа удалось определить среднее время жизни в твердом теле квантов звука (фононов). В другом опыте с помощью такого же метода была измерена длительность флуоресценции одного из полнметрических красителей (ДД1), т. е. в указанном веществе была определена длительность пребывания молекул в возбужденном состоянии. Это время оказалось равным (14 ± 3) пс.

Эти результаты свидетельствуют о возможности использования сверхбыстрых затворов такого типа для прямого наблюдения весьма быстро протекающих процессов, что представляет совершенно исключительный интерес для ряда областей наук.

Между тем есть основания полагать, что быстродействие затворов такого типа может быть еще несколько увеличено, и, следовательно, возможно, что для прямых измерений длительности станут доступными еще некоторые явления.

Измерение среднего времени жизни возбужденного состояния ядра лития-7

В конце 40-х годов нашего века очень короткие промежутки времени были измерены Л. Дж. Эллнотом и Р. Е. Беллом с помощью оригинального и остроумного метода, построенного на учете специфических особенностей явления.

При ядерной реакции взаимодействия бора-10 с нейтроном ядро бора-10, захватывая нейтрон и испуская альфа-частицу, превращается в ядро лития-7. При этом ядро лития-7 оказывается в возбужденном состоянии и через некоторый очень короткий промежуток времени переходит в основное состояние, испуская гамма-квант. Среднее время жизни этого возбужденного состояния и надлежало измерить.

Описываемую ядерную реакцию можно представить так, что ядро бора-10, захватив нейтрон, образует промежуточное неустойчивое ядро, которое распадается на две частицы: альфа-частицу и ядро лития-7, разлетающиеся с большой скоростью в разные стороны. Измерения показали, что возбужденное ядро лития-7 вылетает с энергией 0,85 МэВ, что соответствует скорости $4,8 \cdot 10^8$ м/с.

Для дальнейших рассуждений необходимо вспомнить эффект Доплера. Кто не слышал, как меняется высота тона гудка паровоза, мчащегося с большой скоростью мимо нас? Это явление объясняется эффектом Доплера. Если гудок и наблюдатель неподвижны, то число колебаний воздуха, воспринимаемое наблюдателем в одну секунду, равно частоте колебаний, испускаемых гудком. Если источник звука приближается с некоторой скоростью к наблюдателю, то число колебаний, воспринимаемых наблюдателем в одну секунду, больше частоты колебаний источника, и это от-

мечается наблюдателем как повышение высоты тона гудка. Изменение частоты пропорционально отношению скорости движения гудка и скорости звука.

Аналогичное явление наблюдается для световых волн, представляющих собой электромагнитные колебания, и астрономы используют его для определения скорости движения звезд. Гамма-кванты представляют собой электромагнитные колебания, и для них тоже имеет место эффект Доплера, т. е. изменение частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем (прибором), при изменении скорости движения источника колебаний относительно наблюдателя.

В нашей задаче скорость движения источника колебаний, т. е. возбужденного ядра лития-7, равна $4,8 \cdot 10^6$ м/с. Так как скорость распространения электромагнитных колебаний равна $3 \cdot 10^8$ м/с, то отношение этих скоростей равно 0,016, или 1,6%. Изменение частоты гамма-лучей на 1,6% достаточно четко отмечается современными приборами. Нам известно, с какой скоростью движется возбужденное ядро лития-7. Если бы мы могли измерить, какое расстояние оно проходит, прежде чем испустить гамма-квант, то этого было бы достаточно для определения промежутка времени, в течение которого ядро находится в возбужденном состоянии.

Опыт был поставлен таким образом, что возбужденные ядра лития-7 с различной скоростью тормозились в веществе мишени и останавливались в ней. Подбирая мишени разной толщины и плотности и отмечая разницу частот гамма-квантов, испускаемых движущимися и заторможенными ядрами лития-7, исследователи определили длину пробега возбужденного ядра, а затем и среднее время жизни возбужденного состояния, которое оказалось равным $7,5 \times 10^{-14}$ с.

В 1971 г. такие же исследования были проведены Р. Б. Бегжановым, Д. А. Гладышевым, Ф. С. Акиловым и А. Х. Халиковым. По их данным среднее время жизни возбужденного состояния ядра лития-7 равняется $(9,6 \pm 1,2) \times 10^{-14}$ с.

Описанные методы и приборы для измерения этих чрезвычайно коротких промежутков времени позволили изучить и понять ряд важных и интересных проблем, связанных со строением вещества, радиоактивностью и самой структурой времени. Далее рассказано о том, к каким выводам это привело.

Расширение понятия времени

Все существенные идеи в науке родились в драматическом конфликте между реальностью и нашими попытками ее понять.

А. Эйнштейн, Л. Инфельд

Время в классической механике

Всегда ли, в любых ли условиях темп течения времени одинаков?

Если мимо вас с большой скоростью проносятся часы, то можно ли быть уверенным в том, что их показания точно соответствуют показаниям ваших часов?

Когда какое-нибудь радиоактивное вещество движется с большой скоростью относительно земной поверхности, а вы, находясь на земной поверхности, определяете скорость его распада, то можно ли поручиться за то, что результат этих измерений совпадет с данными, полученными в обычных условиях, т. е. тогда, когда точно такой же радиоактивный препарат лежит неподвижно в банке, стоящей на вашем столе?

Если пароход плывет вдоль берега со скоростью 15 км/ч, а пассажир идет по его палубе от кормы к носу, т. е. в направлении его движения, со скоростью 5 км/ч, то скорость его движения относительно берега равна 20 км/ч. Если он идет с той же скоростью против движения парохода, то его скорость относительно берега 10 км/ч. А если в аналогичном опыте все скорости увеличить в миллионы раз, то останется ли справедливым этот закон сложения скоростей?

Например, если ракета движется относительно Земли со скоростью 200 000 км/с и выбрасывает в направлении своего движения снаряд, который относительно нее движется со скоростью 150 000 км/с, то действительно ли земной наблюдатель регистрирует скорость движения этого снаряда равной 350 000 км/с?

С точки зрения «здорового смысла», основанного на обычном житейском опыте, на все эти вопросы нужно отве-

тнить: да. То же самое нужно было бы сделать и на основе классической механики, построенной до XX века трудами Галилео Галилея, Исаака Ньютона и ряда других ученых. Более того, с точки зрения этой науки все эти вопросы странненькие, если не вздорные.

В своих «Математических началах натуральной философии» Ньютон писал:

«Абсолютное, истинное и математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью».

«Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения, мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год».

«Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается везде одинаковым и неподвижным».

«Абсолютное время не может быть изменено в своем течении. Одна и та же продолжительность и одно и то же состояние соответствуют существованию всех вещей, безразлично, скоры ли движения, медленны или равны нулю».

Таким образом, по Ньютону возможно движение относительно пространства, а темп течения времени не зависит от характера и скорости движения тел. К этому остается еще добавить, что частью классической механики является закон сложения скоростей при переносном движении, предложенный Галилеем и имеющий вид: $w = v_1 + v_2$. По этому закону результирующая скорость w равна сумме составляющих скоростей v_1 и v_2 , взятых с учетом их направлений. Если обе составляющие скорости направлены в одну и ту же сторону, то результирующая равна их сумме, если в разные — разности.

В XVII—XIX веках один успех классической механики следовал за другим. На ее основе были вычислены орбиты планет. Некоторое время спустя обнаружили отклонения реальных орбит от вычисленных. Поставило ли это под сомнение формулы классической механики? Напротив. Случилось так, что указанные отклонения реальных орбит от вычисленных лишь с еще большей убедительностью продемонстрировали правильность уравнений классической механики.

Эти научные события произошли следующим образом. Исходя из предположения о том, что отклонение реальной орбиты планеты Уран от вычисленной обязано притяжению другой, более далекой и пока еще неизвестной планеты нашей Солнечной системы, Джон Адамс к 1845 г. закончил вычисление орбиты новой планеты и указал ее положение на небесном своде. Теперь мы знаем, что он это сделал с погрешностью, меньшей 2° . Между тем Урбан Леверье, не зная о расчетах Адамса и совершенно независимо от него, сделал такие же расчеты и закончил их к 1846 г. Леверье послал письмо астроному Иоганну Галле с указанием места на небосводе, в котором нужно искать новую планету. По получении письма тот в тот же вечер и вблизи от указанного места обнаружил новую планету, которая получила название Нептун.

Перечисление целого ряда блестящих успехов, достигнутых на основе классической механики, можно было бы продолжить.

Между тем представления о времени и пространстве, лежащие в основе классической механики, неоднократно подвергались критике. Иные взгляды высказывались и до Ньютона, и после него. Однако до тех пор, пока классическая механика успешно решала научные задачи, твердо держались и ее основы.

Некоторые трудности классической механики

От глубокой древности и в течение многих веков астрономы изучали движение планет и Солнца. При этом они определяли и вычерчивали очень сложные траектории их перемещений относительно звезд, в которых прямое движение планет время от времени перемежается остановками и сменяется возвратным движением. Так как астрономы Древнего мира и средних веков считали Землю неподвижной — центром мира, то они, естественно, пользовались системой координат, связанной с Землей. Для того чтобы объяснить сложные и причудливые движения планет, Клавдием Птолемеем (II век н. э.) и другими астрономами, так же как и он решавшими эту задачу в координатной системе, связанной с Землей, была придумана система эпициклов, т. е. ряда одновременных и совместных вращательных движений планет. Эта система была очень сложной, но довольно точно описывала видимые движения планет и для того времени, конечно, была большим научным дости-

жением. Например, объяснение траектории движения Юпитера заключалось в круговом движении этой планеты по эпициклу — окружности, центр которой в свою очередь движется по другой окружности, в центре которой находится Земля, и т. д.

У человека непредубежденного и проникательного слишком сложные объяснения всегда вызывают сомнения в их правильности и необходимости. Сохранилась запись о том, как, выслушав рассказ о циклах и эпициклах птолемеевской геоцентрической модели мира, король испанский Альфонс X сказал: «Если бы при сотворении мира создатель спросил моего совета, то я предложил бы ему более простой план устройства Вселенной».

Плана Вселенной король Альфонс X не предложил. Однако этой своей фразой он не только ярко выразил себя со всем своим умом и самодовольством, но и правильно поставил очень важный вопрос о необходимости пересмотра идей о строении мира. Между тем понять устройство Солнечной системы и дать существенно новое и лучшее ее описание сумел лишь Николай Коперник (1473—1543), который рассмотрел эти же движения в координатной системе, связанной с Солнцем. При этом они приобрели долгожданные простоту и стройность. Проведя такое преобразование координат, Коперник, как известно, пошел и дальше, высказав утверждение, что все планеты, в том числе и Земля, на самом деле вращаются вокруг Солнца. Эта работа Коперника справедливо считается одним из крупнейших достижений науки.

В середине XIX века законы классической механики и очень точные астрономические наблюдения позволили глубоко изучить движения известных планет и по небольшим отклонениям реальных их движений от расчетных предсказать существование неизвестных в то время далеких планет. Тем не менее при анализе планетных движений на основе классической механики обнаружилась и некая червоточинка: в траектории движения Меркурия — планеты, наиболее близкой к Солнцу и поэтому вращающейся вокруг него быстрее всех других планет, — было замечено такое отклонение реальной траектории от расчетной, которое на основе классической механики объяснить не удалось. К этому обстоятельству мы еще вернемся.

В конце XIX века ученых очень занимали вопросы о распространении света и о скорости «эфирного ветра». Напомним, что в те времена предполагалось, что электромагнитные колебания распространяются в эфире — некоей тон-

чайшей среде, заполняющей все пространство. Полагая этот эфир неподвижным, ученые считали, что различные тела, двигаясь сквозь него, встречают эфирный ветер. Ставя задачу об определении скорости эфирного ветра, ученые хотели таким образом определить абсолютную скорость движения Земли.

Идея соответствующего эксперимента была сформулирована еще Максвеллом, который писал: «Если бы можно было измерить скорость света по времени, которое ему требуется, чтобы пройти расстояние между двумя точками на поверхности Земли, а потом полученные данные сравнить со скоростью света в обратном направлении, то мы смогли бы определить скорость движения эфира относительно этих двух точек».

Легко видеть, что идея этого опыта очень проста, почти очевидна и основана на законе сложения скоростей Галилея. В самом деле, если этот закон справедлив (а в этом в XIX веке никто не сомневался) и Земля движется относительно эфира, то такой опыт должен был позволить вполне однозначно определить скорость этого движения.

Однако в техническом отношении такой опыт совсем не прост. Скорость света в вакууме $c=300\,000$ км/с, а скорость орбитального движения Земли $v=30$ км/с. Отношение этих скоростей равно $v/c=10^{-4}$, а квадрат этого отношения составляет лишь $v^2/c^2=10^{-8}$. Между тем ряд соображений привел ученых к тому, что для определения абсолютного движения Земли годятся лишь методы, основанные на измерении v^2/c^2 .

Довольно долгое время ученым не удавалось построить пригодные для этого приборы. Лишь в конце XIX века Альберт Майкельсон разработал и построил свой интерферометр — прибор, обладающий очень высокой чувствительностью и точностью. В этом приборе луч света от какого-либо источника с помощью полупрозрачного зеркала разделяется на два пучка. Эти пучки света некоторыми отрезками пути проходят во взаимно перпендикулярных направлениях, а затем сходятся в одном и том же месте на экране прибора. При этом на экране возникает интерференционная картина. Если источник света монохроматический, то интерференционная картина представляет собой чередование светлых и темных полос. Когда длительность распространения света в одном из пучков почему-либо изменяется, то происходит сдвиг этих полос. Такой прибор позволяет обнаружить даже крайне небольшое запаздывание распространения одной из электромагнитных волн по отношению

к другой. В конце XIX века этот прибор был шедевром тонкой измерительной техники.

Располагая прибор так, что один из лучей света двигался в нем по направлению движения Земли, а другой перпендикулярно к этому направлению, Майкельсон предполагал таким образом обнаружить движение Земли относительно эфира и измерить скорость этого движения. В 1881 г. Майкельсон опубликовал свои первые результаты, а в 1888 г. — результаты повторных и более точных измерений, сделанных совместно с Эдвардом Морли. Оба исследования показали, что скорость света одинакова при распространении его в любом направлении: по движению Земли, против него и перпендикулярно к нему. Таким образом, из этих опытов следовало, что *скорость распространения света постоянна*. Причем постоянна не для неподвижного эфира, а для движущейся Земли.

Как понять этот экспериментальный факт? Почему закон сложения скоростей классической механики, который неоднократно проверялся и до сих пор всегда оправдывался, в случае света, Земли и эфира нарушается? По этому вопросу в конце XIX и начале XX века происходили острые дискуссии.

К тому времени уже накопилось много данных, свидетельствовавших о том, что свойства эфира — странные и во многом противоречивые. В самом деле, световые волны распространяются с большой скоростью и на огромные расстояния. Между тем в любом из известных на Земле материалов скорость распространения колебаний тем больше, а происходящие при этом потери энергии тем меньше, чем больше упругость этого материала. Таким образом, если носителем световых волн является эфир, то его упругость должна быть колоссальной. Однако космические тела движутся в этом эфире, не встречая сколько-нибудь заметного сопротивления. Следовательно, эфир должен быть абсолютно проницаемым. Не просто согласовать эти два положения, не правда ли?

Эрнст Мах предложил вообще отказаться от эфира, Оливер Лодж рекомендовал сохранить его. Джордж Фитцджеральд объяснил отрицательный (в смысле обнаружения абсолютного движения) результат опыта Майкельсона тем, что при движении тел их размеры в направлении движения уменьшаются, и как раз настолько, чтобы компенсировать изменение скорости света.

На первый взгляд предложение Фитцджеральда может показаться слишком фантастичным. Однако в самом конце

XIX века Гендрик Лоренц построил теорию электрона, из которой следовало, что при движении он сжимается в направлении перемещения, и притом тем больше, чем больше его скорость. Далее он предположил, что так же ведут себя и все тела. В 1895 г. он писал: «Как ни странна на первый взгляд указанная гипотеза, нужно будет все же признать, что она вовсе не так неприемлема, если только мы допустим, что и молекулярные силы передаются через эфир, подобно тому как мы можем теперь определенно утверждать это относительно электрических и магнитных сил. Если это так, то весьма вероятно, что поступательное движение изменит взаимодействие между двумя молекулами или атомами подобным же образом, как и притяжение или отталкивание между заряженными частицами. Так как форма и размеры твердого тела в конечном итоге обуславливаются интенсивностью молекулярных взаимодействий, то в этом случае не может не произойти и изменение размеров». И далее: «Перемещение ... обусловило бы сокращение в направлении движения в отношении $1: \sqrt{1-v^2/c^2}$ ».

Гипотеза Лоренца и следующий из нее вывод о сокращении тел в направлении их движения поворачивают всю задачу неожиданно и необычно. Получается, что хотя эффект есть, но с помощью опыта Майкельсона обнаружить его нельзя. Ведь в приборе Майкельсона распространение света происходит от одной его точки до другой, расстояние между которыми составляет *базу прибора*. Нетрудно понять, что изменение длительности распространения света от одного конца базы прибора до другого может произойти по крайней мере по двум причинам: из-за изменения скорости движения световой волны и в результате изменения длины этой базы. Так вот, по гипотезе Лоренца получается так, что при движении Земли и расположенного на ней прибора Майкельсона база этого прибора укорачивается как раз настолько, что это компенсирует изменение скорости света.

Итак, Лоренц высказал два предположения. Первое заключается в том, что при движении тел происходит изменение их размеров, массы, а также темпа течения времени. При этом он дал группу формул (получивших название *преобразований Лоренца*), представляющих количественное выражение сокращения длины, увеличения массы и замедления темпа времени в зависимости от скорости движения тел.

Второе предположение Лоренца заключается в объяс-

нении отрицательного (в смысле обнаружения абсолютного движения Земли) результата опыта Майкельсона. В этом объяснении сохранены законы классической механики и светоносный эфир, отнюдь не отрицается абсолютное движение и в то же время остроумно показано, почему в опыте Майкельсона обнаружить это абсолютное движение не удастся. Однако многие ученые посчитали такое объяснение необоснованным.

Анри Пуанкаре (1854—1912) в своей статье «Настоящее и будущее математической физики» *) назвал эти предложения Г. Лоренца *sur de roue* — ухищрением, что на вежливом языке ученого означает: мало обоснованные фантазии.

А. Пуанкаре писал... Однако прежде, чем привести его слова, напомним, что в конце XIX и начале XX века он активно разрабатывал ряд вопросов теоретической физики, очень много сделал для преодоления основных трудностей классической механики и вместе с Г. Лоренцем и Г. Минковским наиболее близко подошел к созданию новой механики — неклассической. В упомянутой статье, опубликованной в конце 1904 г., Анри Пуанкаре писал:

«... Все попытки измерить скорость Земли относительно эфира привели к отрицательным результатам ... Испробовали множество способов. Наконец, Майкельсон достиг самых высоких пределов точности, но все было тщетно».

Далее А. Пуанкаре говорит о разных способах, которыми теоретики объясняли неудачу попыток определения абсолютной скорости Земли и дает свою (неодобрительную!) оценку тому, как с этой задачей справился Г. Лоренц:

«...Если Лоренц благополучно справился с ней — так только путем нагромождения гипотез. Наиболее хитроумной была идея местного времени ... К несчастью, этого недостаточно, и требуются дополнительные гипотезы. Необходимо допустить, что все движущиеся тела испытывают одинаковое сжатие в направлении движения. Например, один из диаметров Земли уменьшается на 1/200 000 000 вследствие движения нашей планеты, тогда как другой диаметр сохраняет свою длину».

Как известно, таким образом Лоренц вовсе не отверг абсолютное движение, а показал, что ни один из эксперн-

*) Пуанкаре А. Настоящее и будущее математической физики // Принципы относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 27—44.

ментов не дает возможности его обнаружить. По этому поводу А. Пуанкаре пишет:

«Таким образом все, по-видимому, приведено в порядок, но рассеяны ли сомнения? Что случилось бы, если мы могли сообщаться сигналами, которые уже не были бы световыми и скорость распространения которых отличалась бы от скорости света? ... И разве нельзя себе представить подобные сигналы, если, вместе с Лапласом, допустим, что универсальное притяжение передается в миллион раз быстрее света?».

Прекрасно понимая, что эти два предложения Лоренца (замедление времени и сокращение тел в направлении их движения) требуют и третьего, А. Пуанкаре далее пишет, что по Лоренцу нужно:

«...Чтобы поступательное движение влияло на массы всех частиц в той же степени, что и на электромагнитные массы электронов. Следовательно, механические массы должны изменяться согласно тем же законам, что и электродинамические; следовательно, они не могут быть постоянными». Затем А. Пуанкаре произносит знаменательные слова:

«На основе всех этих результатов, если они подтверждаются, возникла бы совершенно новая механика, которая характеризовалась бы главным образом тем фактом, что никакая скорость не могла бы превышать скорость света». Однако уже на следующей странице А. Пуанкаре добавляет: «Но прежде чем начать волноваться, следует спросить себя, верно ли все это?»

Подумайте: на что похожа в этой статье аргументация А. Пуанкаре? Она напоминает качели, не правда ли? За каждым взлетом следует падение, а за каждым падением — взлет; за каждой правдой следует заблуждение, а за каждым заблуждением — пронизательнейшая правда. Так, например, далее он пишет:

«Попробуем всесторонне рассмотреть теорию Лоренца, усовершенствовать ее понемногу — и, может быть, все уладится».

Так, вместо того чтобы предполагать, что движущиеся тела испытывают сжатие в направлении движения и что это сжатие одинаково (независимо от природы тел и действующих на них сил), нельзя ли принять более простую или более естественную гипотезу? Можно представить, например, что эфир видоизменяется, когда движется относительно погруженной в него матеральной среды; что, изменившись, он уже более не передает возмущения во все направления с одной и той же скоростью... И можно было бы обойтись без столь необычного сжатия тел».

После этого предложения снова следует взлет и Пуанкаре пишет почти пророческие слова:

«Возможно даже, мы должны создать совершенно новую механику, которую мы лишь смутно представляем, механику, где инерция возрастала бы со скоростью, причем скорость света являлась бы непреодолимым пределом. Обычная механика, более простая, оставалась бы как первое приближение, справедливое для скоростей не слишком больших, так что новая динамика включала бы старую».

Снова движение качелей и в конце своей статьи А. Пуанкаре о старых принципах, т. е. принципах классической механики, говорит так:

«В заключение я хочу сказать, что мы не дошли до этого, и ничто еще не доказывает, что принципы не выйдут из борьбы победившими и невредимыми».

Можно ли нарочно придумать ситуацию более драматичную? Анри Пуанкаре тщательно взвешивает несколько решений, глубоко и правильно понимает, к чему ведет каждое из них; более того, разрабатывает эти решения, углубляет их ... и все-таки уходит в сторону от правильного пути. Как будто он увидел на дороге груды камешков, тщательно рассмотрел их, подержал каждый на ладони и взял стекляшку, отшвырнув ногой алмаз.

Как известно, время — лучший судья во многих спорах. Преобразования Лоренца вошли в основной фонд науки, между тем как его же гипотеза об изменении при движении молекулярных сил — отпала, а мираж эфира рассеялся. Однако, для того чтобы это произошло, понадобились новые факты и новые идеи.

Время в специальной теории относительности

К началу XX века уже накопилось несколько серьезных трудностей классической механики: в астрономии — отклонение траектории движения планеты Меркурий от расчетной; в электродинамике — странная асимметрия некоторых физических законов, например описывающих движение магнита вблизи от проводника и движение проводника в магнитном поле; в оптике — отрицательный результат опыта Майкельсона.

Пожалуй, именно опыт Майкельсона наиболее ярко продемонстрировал сбой классической механики. В самом деле, почему для света, так сказать, *обычный* (т. е. классический) закон сложения скоростей оказался непригодным?

Для удобства дальнейших рассуждений вспомним несколько основных положений классической механики. Например, для того чтобы какое-либо тело изменило направление или скорость своего движения, нужно, чтобы на него действовала внешняя сила. Напротив, если внешние силы на тело не действуют, то оно движется равномерно и прямолинейно. Свяжем с каждым из тел систему отсчета. Можно представить себе существование целого ряда таких систем, *движущихся равномерно друг относительно друга*. Их принято называть *инерциальными системами*.

Классическая механика утверждает — и это подтверждено знаниями, добытыми в течение многовекового развития науки, — что *все физические законы одинаково справедливы для любой инерциальной системы*. Это означает, что все инерциальные системы равноправны и в каждой из них все физические уравнения имеют одну и ту же форму. Если же разные инерциальные системы имеют различную скорость, то при переходе от одной к другой нужно воспользоваться преобразованием Галилея для переносного движения, например так, как это сделано на с. 138.

Напомним еще раз, что в том случае, когда процессы, происходящие в одной инерциальной системе, почему-либо приходится описывать и рассчитывать с помощью системы координат, связанной с другой инерциальной системой, то применяющиеся при этом *законы преобразования классической механики учитывают изменение координат и скоростей, но оставляют неизменными темп течения времени, а также размеры и массу тел*.

Таким образом, к началу XX века считались твердо установленными следующие положения:

1. Физические законы одинаково справедливы для любой инерциальной системы.

2. При переходе от одной инерциальной системы к другой справедливы законы преобразования координат классической механики.

3. Скорость света в вакууме постоянна и не зависит от скорости движения источника и наблюдателя.

К этому нужно еще добавить, что физики XIX века считали, что свет распространяется через эфир — некую тонкую среду, проникающую через все тела.

Как мы уже знаем, особенность этой ситуации заключается в том, что эти положения между собой несовместимы, а свойства эфира противоречивы. В самом деле, если эфир увлекается телами при их перемещении, то при движении источника света к наблюдателю или от него наблю-

датель должен был бы обнаружить изменение скорости света. Если при движении тел эфир совершенно не увлекается нмн, еслн все тела перемещаются в абсолютно неподвижном эфирном море, то наблюдатель, движущийся относительно этого эфирного моря в разных направлениях и с разной скоростью, каждый раз обнаруживал бы, что свет имеет разную скорость, и, таким образом, мог бы установить свое абсолютное движение. Как известно, скорость света постоянна в любых случаях, и поэтому гипотезу о светоносном эфире, как явно противоречивую, нужно отбросить.

Однако и это еще не спасает дела. Кроме того, нужно еще отказаться по крайней мере от одного из трех указанных выше положений, так как они противоречат друг другу и, следовательно, несовместимы.

В 1905—1908 гг. Альберт Эйнштейн разработал и опубликовал *специальную теорию относительности*, в которой дал совершенно неожиданное, очень изящное и кардинальное решение всей проблемы, включая вопросы, связанные с эфиром, абсолютным движением и законами преобразования координат. При этом оказалось необходимым значительно расширить существовавшие в XIX веке понятия о времени, размерах и массе тел. Основные положения этой новой, предложенной им теории изложены в его статье «К электродинамике движущегося тела», опубликованной в 1905 г. *). В ней Альберт Эйнштейн пишет:

«Известно, что электродинамика Максвелла в том виде, как ее в настоящее время обыкновенно понимают, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по-видимому, несвойственна самим явлениям».

Далее в этой же статье А. Эйнштейн пишет:

«Дальнейшие соображения опираются на принцип относительности и на принцип постоянства скорости света. Мы определяем оба принципа следующим образом.

1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из двух координатных систем, находящихся относительно друг друга в равномерном поступательном движении, эти изменения относятся.

2. Каждый луч света движется в покоящейся системе координат с определенной скоростью V независимо от того,

*) Эйнштейн А. К электродинамике движущегося тела // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 97, 100.

испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом».

«... Эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел. Тогда введение "светоносного эфира" окажется излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится "абсолютно покоящееся пространство, наделенное особыми свойствами"».

Развивая эти положения, А. Эйнштейн показывает, что понятия классической механики об абсолютном движении и одновременности двух событий, происходящих в разных местах, не имеют физического смысла. Затем он доказывает, что при переходе от одной инерционной системы к другой, движущейся с некоторой скоростью относительно первой, нужно пользоваться не преобразованием Галилея, а другими, которые выводятся из тех же двух основных принципов.

С помощью ряда мысленных опытов, представляющих анализ реальной ситуации измерений, Эйнштейн установил, что, находясь в одной инерциальной системе и наблюдая события или процессы, происходящие в другой, которая движется относительно первой с постоянной скоростью, наблюдатель обнаруживает в другой системе *замедление темпа течения времени, уменьшение размеров тел и увеличение их массы*, причем в количественном отношении все это происходит в соответствии с формулами *преобразований Лоренца*.

Вполне закономерно поставить следующий вопрос: в чем же, в конце концов, различие между упомянутыми выше теориями, если все они приводят к сходным формулам? Различие огромное: у Фитцджеральда сокращение размеров тел в направлении их движения вводится лишь для того, чтобы объяснить отрицательный (в смысле обнаружения абсолютного движения) результат опыта Майкельсона. У Лоренца сокращение размеров тел в направлении их движения введено, конечно, для той же цели, однако оно имеет вполне определенное и самостоятельное объяснение. Напомним, что по Лоренцу оно объясняется некими силами, действующими между частицами твердых тел. Причем, и это весьма существенный шаг вперед, Лоренц дает формулы преобразования координат, включающие не только сокращение размеров тел, но и замедление темпа времени и увеличение массы тел при их движении.

Впрочем, для Лоренца по-прежнему существует эфир и

абсолютное движение тел относительно этого эфира, а данные им преобразования координат показывают лишь то, что мы лишены возможности обнаружить это движение.

Адриан Пуанкаре углубил и улучшил преобразования Лоренца, а также показал, что они между собой взаимосвязаны. Затем он взвесил возможность того, что они имеют не формальный, а реальный смысл и... отказался от этой возможности, посчитав, что сохранение эфира и введение особых его деформаций — более реальный и приемлемый путь преодоления всех трудностей.

Между тем Альберт Эйнштейн сразу и полностью утверждает новую механику. Существование предельной скорости и постоянство скорости распространения света в пустоте для любой инерциальной системы для него не странный экспериментальный факт и не парадокс. По Эйнштейну дело заключается в том, что именно так и устроена Природа. Точно так же собственное или местное время для него не формальный прием. В теории относительности Эйнштейна оно-то и есть истинное время. Все дело в том, что Природа устроена так, что темп течения времени в системах, движущихся с разной скоростью, различен.

Как известно, специальная теория относительности, а в дальнейшем и построенная А. Эйнштейном общая теория относительности позволили не только преодолеть все трудности классической механики, но и создать новую физику и целые области новой техники. Кое-что об этом будет сказано далее. Однако сейчас мы вернемся к представлению об интервале времени в специальной теории относительности.

Для интервала времени соответствующая формула преобразования имеет вид

$$t_2 = \frac{t_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где t_1 — интервал времени между двумя какими-либо событиями, происходящими в первой инерциальной системе, измеряемый с помощью часов, находящихся в этой же первой системе, t_2 — интервал времени между теми же двумя событиями, происходящими в первой инерциальной системе, отмечаемый с помощью часов, находящихся во второй инерциальной системе, c — скорость света в вакууме, v — относительная скорость движения первой и второй инерциальных систем.

Когда скорость относительного движения инерциальных систем достаточно большая, например составляет

150 000 км/с, т. е. половину скорости света, то $v^2/c^2=1/4$, а $\sqrt{1-v^2/c^2}=0,866$. Нетрудно подсчитать, что при такой скорости движения наблюдатель, измеряющий скорость процессов, происходящих в первой системе, из второй системы отметит, что они протекают на 17 % медленнее, чем аналогичные процессы в его системе.

Нетрудно увидеть также, что в том случае, когда скорость относительного движения инерциальных систем очень мала ($v \ll c$), то отношение v^2/c^2 близко к нулю, соответственно член $\sqrt{1-v^2/c^2}$ близок к единице, а вся формула преобразования приобретает вид $t_2=t_1$. Между тем это выражение есть не что иное, как формула преобразования классической механики, по которой темп времени в разных инерциальных системах одинаков.

В классической механике молчаливо подразумевалась мгновенная передача сигналов с бесконечной скоростью, и поэтому можно было говорить об одновременности событий в любой точке Вселенной и для тел, движущихся с любой скоростью. В теории относительности принимается во внимание, что скорость света в вакууме является наивысшей скоростью для распространения сигналов и в этом смысле является предельной. Между тем, если сигналы распространяются с конечной скоростью, а наблюдаемые тела и наблюдатели находятся в разных местах и движутся с разной скоростью, то события, одновременные для одного наблюдателя, в общем случае уже не являются одновременными для другого.

Далее Эйнштейн показал, что в теории относительности сложение скоростей двух тел описывается уже не законом Галилея, а несколько более сложным выражением, причем так, что суммарная скорость всегда меньше арифметической суммы слагающих скоростей и никогда не может превысить предельную, т. е. скорость света в вакууме.

Существенно отметить, что в том предельном случае, когда относительная скорость движения инерциальных систем очень мала, все формулы преобразования теории относительности переходят в формулы преобразования классической механики. Таким образом, *теория относительности включает в себя классическую механику как некий частный случай, имеющий место при малых скоростях движения инерциальных систем.*

Резонно поставить вопрос: какую скорость в теории относительности следует считать большой и какую малой? В теории относительности большой является скорость,

сравнимая со скоростью света, а скорость пули или самолета оказывается малой. В самом деле, даже если скорость современного сверхзвукового реактивного самолета посчитать равной 3600 км/ч, или 1 км/с, то отношение $v^2/c^2 = 1,1 \cdot 10^{-11}$. При этом характерный член, входящий в формулы преобразования теории относительности, $\sqrt{1-v^2/c^2}$ отличается от единицы лишь на $5,5 \cdot 10^{-12}$. Поэтому с точки зрения земного наблюдателя при полете такого самолета время для пилота течет медленнее, чем для людей, находящихся на Земле, однако лишь на 5 десятиллиардных долей процента. С точки зрения земного наблюдателя в таком же отношении изменяются размеры и массы при полете этого самолета, а также всех находящихся на нем тел. Между тем при измерении длины или массы столь малые величины пока еще лежат за пределами, доступными современной измерительной технике.

Возможны и такие вопросы: насколько реальны различия между выводами, получаемыми с помощью теории относительности и классической механики, сколь эти различия велики и имеют ли они практическое значение?

Мы уже упоминали, что астрономы обнаружили различие между реальной траекторией движения планеты Меркурия и рассчитанной на основе классической механики. Это различие было отмечено в положении оси эллипса, по которому Меркурий движется вокруг Солнца. Оказалось, что оно составляет 43 угловые секунды за 100 лет. Неправда ли, не так уж много? Но то, что это различие есть, а объяснить его не удается, подрывало классическую механику и в XIX веке мучило многих ученых. Между тем с помощью теории относительности удалось объяснить это различие и получить расчетную траекторию Меркурия, совпадающую с реальной. Для строгости изложения отметим, что вначале, на основе специальной теории относительности, удалось объяснить лишь часть этого различия, а в дальнейшем, на основе общей теории относительности, это различие удалось объяснить полностью.

При движениях, скорость которых близка к скорости света, теория относительности дает результаты, существенно отличающиеся от получаемых на основании классической механики. В современной ядерной технике, при изучении частиц больших энергий, при проектировании и работе различных ядерных устройств, оказывается совершенно необходимым это учитывать. В самом деле, ведь в ряде таких устройств приходится сталкиваться с тем, что темп

течения времени у частиц, движущихся в этих приборах, а также размеры и масса этих частиц изменяются на десятки и сотни процентов. Если это не принимать во внимание, то такие приборы — циклотроны, синхротроны и т. д. — попросту не будут работать.

Далее подробно рассмотрен один важный и интересный пример такого рода. Однако прежде чем перейти к его изложению, нужно сделать несколько замечаний, причем не столько физического, сколько исторического и психологического характера.

Попытаемся понять, какой была реакция Г. Лоренца на работы Альберта Эйнштейна. Сначала — на основании слов Макса Борна, сказанных им на лекции, прочитанной в Берне в 1955 г. на Международной конференции, посвященной пятидесятилетию теории относительности *):

«...Лоренц никогда не претендовал на авторство в открытии принципа относительности. Спустя год после визита Пуанкаре в Геттинген мы слушали лекции Лоренца... Вторая лекция начинается словами: «Обсуждать принцип относительности Эйнштейна здесь, в Геттингене, где преподавал Минковский, кажется мне особенно приятной задачей». Этого вполне достаточно, чтобы показать, что сам Лоренц считал основоположником принципа относительности Эйнштейна. На той же странице, а также в последующих разделах имеются другие замечания, которые показывают нежелание Лоренца расстаться с идеей абсолютного пространства и времени. Когда я посетил Лоренца за несколько лет до его смерти, он еще не отказался от скептического отношения к принципу относительности. Я сообщил вам все эти детали потому, что они освещают положение в науке пятьдесят лет назад, а не потому, что я придаю большое значение вопросу о приоритете».

Высказывания по этому же поводу Г. Лоренца не противоречат словам М. Борна, но тональность их другая. В книге «Теория электронов», опубликованной в 1909 г. (т. е. после появления основных работ А. Эйнштейна по специальной теории относительности), Г. Лоренца пишет **):

«Я полагаю, что все же можно кое-что сказать в пользу и того способа, которым я старался изложить свою теорию. Эфир, который может являться носителем электромагнитного поля, его энергии и его колебаний, я должен поневоле

*) Борн М. Физика и относительность // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 235.

***) Лоренц Г. О принципе относительности // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 197.

рассматривать как нечто обладающее известной субстанциональностью, как бы отличен он ни был от обычной материи. С этой точки зрения представляется естественным не вводить с самого начала предположения, что совершенно безразлично, движется тело через эфир или нет, и измерять расстояния и промежутки времени при помощи масштабов и часов, имеющих относительно эфира неподвижное положение.

Было бы несправедливо не добавить, что наряду с захватывающей смелостью своего отправного пункта теория Эйнштейна имеет еще и другое значительное преимущество по сравнению с моей теорией. В самом деле, мне не удалось получить уравнения, отнесенные к подвижным осям, в *точно* такой же форме, что и уравнения для неподвижной системы; Эйнштейн же выполнил это при помощи системы новых переменных, весьма, впрочем, мало отличающихся от тех, которые были введены мной. Я не пользовался этими подстановками только по той причине, что формулы представляются довольно сложными и имеют несколько искусственный вид, если только не выводить их из самого принципа относительности».

В 1915 г., при переиздании этой книги, Лоренц сделал следующее примечание:

«Если бы мне предстояло написать эту последнюю главу теперь, я, конечно, поставил бы на гораздо более видное место теорию относительности Эйнштейна (§ 189), с помощью которой теория электромагнитных явлений в движущихся системах получает такую простоту, которой мне достигнуть не удалось. Главная причина моей неудачи заключалась в том, что я всегда придерживался мысли, что только переменную t можно принимать за истинное время и что мое местное время t' должно рассматриваться не более как вспомогательная математическая величина. В теории Эйнштейна, напротив, t' играет ту же роль, что и t ».

В 1965 г. Дж. Кесуани *) подверг описанные события строгому расследованию, взвесив не только то, что говорил каждый из участников этой научной драмы, но даже и то, что и как они не говорили. В статье «Возникновение теории относительности» он пишет:

«Пуанкаре прожил около семи лет после того, как была опубликована работа Эйнштейна, но нигде он не приписывал Эйнштейну приоритет в открытии теории относитель-

*) Кесуани Дж. Возникновение теории относительности // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 261—263.

ности. Напротив, он часто утверждал, что первооткрывателем был Лоренц ...Ни в одной работе он не приписывал Эйнштейну создания теории относительности ...В лекции по теории относительности, прочитанной Пуанкаре в 1909 г., ...он даже не упомянул имени Эйнштейна, хотя приводил другие имена...

В то время как Пуанкаре считал Лоренца первооткрывателем, сам Лоренц никогда не претендовал на это открытие».

Действительно, в работе под названием «Две статьи Анри Пуанкаре о математической физике», опубликованной в 1914 г., Г. Лоренц пишет *):

«Формулы, которые я тогда установил для координат и времени, ... побудили Пуанкаре написать свою статью о динамике электрона, в которой он дал мое имя преобразованию, о котором я только что говорил. По этому поводу должен заметить, что подобное преобразование имелось уже в одной статье Фогта, опубликованной в 1887 г., из которой я не извлек все возможное. В самом деле, для некоторых физических величин, встречающихся в формулах, я не указал наиболее подходящего преобразования. Это было сделано Пуанкаре, а затем Эйнштейном и Минковским».

Между тем в работе, опубликованной в 1928 г., Г. Лоренц пишет:

«...Я ввел концепцию местного времени, которое является разным для разных систем отсчета, движущихся относительно друг друга. Но я никогда не думал, что это имеет какое-либо отношение к реальному времени. Это реальное время все еще представлялось мне в старых классических понятиях абсолютного времени, которое не зависит ни от каких специальных систем координат. Для меня существовало только одно истинное время. Я рассматривал свое преобразование времени только как эвристическую рабочую гипотезу. *Итак, теория относительности является фактически работой исключительно Эйнштейна*».

Альберт Эйнштейн нигде специально не занимался «делжкой пирога». Однако его отношение к этому можно усмотреть из его статьи «О принципе относительности и его следствиях», опубликованной в 1907 г., в которой он пишет **):

*) Лоренц Г. Две статьи Анри Пуанкаре о математической физике // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 191.

***) Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях // Принцип относительности.— М.: Атомиздат, 1973.— С. 186.

«Следовало лишь понять, что введенную Лоренцем вспомогательную величину, названную им «местным временем», на самом деле следует определить как «время». С таким определением времени основные уравнения теорий Лоренца будут удовлетворять принципу относительности, если заменить написанные выше преобразования другими уравнениями, соответствующими новому понятию времени. Тогда гипотеза Лоренца и Фитцджеральда окажется необходимым следствием теории. И только представление об эфире как носителе электрических и магнитных сил не находит места в излагаемой здесь теории; напротив, электромагнитные поля оказываются здесь не состояниями некоторой материи, а самостоятельно существующими объектами, имеющими одинаковую природу с весомой материей и обладающими вместе с ней свойством инерции.

Ниже делается лишь попытка свести в единое целое работы, которые возникли до настоящего времени путем объединения теории Лоренца и принципа относительности».

Теперь обратимся к еще одному участнику этой самой глубокой и интересной научной драмы XX века.

В основе специальной теории относительности лежит положение о постоянстве скорости распространения света. Экспериментально этот факт был обнаружен Майкельсоном несколько раньше, чем Эйнштейн опубликовал свои первые статьи по теории относительности. Во многих книгах создание специальной теории относительности описывается так, будто именно открытие Майкельсоном постоянства скорости распространения света и привело Эйнштейна к его новым идеям. Действительно, излагать теорию относительности удобнее, если посчитать, что новый экспериментальный факт привел к новым теоретическим обобщениям. Так обычно в науке и бывает, и поэтому это логично.

Между тем в данном случае было по-другому. Из ряда статей, высказываний и переписки того времени следует, что Эйнштейн формулировал свою специальную теорию относительности независимо от работ Майкельсона. Положение о постоянстве скорости распространения света Эйнштейн рассматривал как необходимое следствие из ряда явлений электродинамики, а опыт Майкельсона, с которым он был знаком,— лишь как подтверждение своих теоретических выводов.

Между тем в те же годы, т. е. в самом конце XIX и начале XX века, Майкельсон полученные им важные экспериментальные результаты о постоянстве скорости распространения света оценивал если не как ошибку, то, во всяком

случае, как неудачу. Сейчас нам это может показаться странным, но в те годы Майкельсон считал, что скорость света обязательно должна быть различной в разных направлениях, а он попросту не смог этого обнаружить.

Таким образом, в том, что в вопросе о постоянстве скорости распространения света Эйнштейн больше опирался на свои теоретические построения, чем на экспериментальные результаты Майкельсона, со стороны Эйнштейна не было и тени желания умалить заслуги Майкельсона. Напротив, в ряде своих статей и речей он охотно и щедро воздавал ему должное. В этом было другое: огромная сила теоретической мысли и глубокая уверенность в правильности новых научных идей.

Какое драматическое стечение обстоятельств иногда преподносит жизнь, не правда ли?

В последующие годы среди противников А. Эйнштейна нашлись и такие, которые сделали эту ситуацию не только драматичной, но еще и злой. Ведь в те годы А. Эйнштейн жил в Германии, работал в немецких университетах, был членом Прусской Академии наук... Между тем в начале 30-х годов в фашистской Германии многие ученые «не арийцы» были уволены с работы. Против А. Эйнштейна была развернута кампания травли, включавшая заявления о «неарийском» духе теории относительности. К 1 апреля 1933 г. готовилось торжественное исключение А. Эйнштейна из Прусской Академии наук.

Однако А. Эйнштейн превзошел этот план, заблаговременно покинув Германию и опубликовав открытое письмо в Прусскую Академию наук с заявлением о своем выходе из нее. Затем он отказался и от германского гражданства. В заявлении, опубликованном им в марте 1933 г. в английской газете*), он написал:

«До тех пор, пока у меня будет такая возможность, я останусь только в стране, где господствует политическая свобода, терпимость и равенство всех граждан перед законом. Политическая свобода означает свободу выражения своих политических взглядов устно или письменно. Терпимость означает уважение взглядов любого другого человека, кем бы он ни был.

В настоящее время в Германии таких условий нет».

Фашистская Германия ответила на это тем, что имущество А. Эйнштейна было конфисковано, а за его голову (т. е.

*) Эйнштейн А. Собр. соч.—Т. IV.—М.: Наука, 1967.—С. 179.

за его убийство!) была назначена награда *). Разумеется, всеми этими действиями национал-социалистические правители больше всего покарали самих себя. Недаром старая поговорка гласит: «Когда боги хотят кого-нибудь наказать, то они его лишают разума».

Между тем теория относительности довольно скоро стала одной из основ наших научных знаний.

Среднее время жизни мюона и его энергия

Нестабильные мезоны можно рассматривать как субатомные «часы», движущиеся с очень большими скоростями. Поэтому измеренное среднее время жизни этих мезонов значительно больше среднего времени жизни мезонов, находящихся в покое.

Б. Росси

Сколько велико изменение темпа времени в движущихся телах, насколько реален этот эффект и как его можно наблюдать? Для ответа на эти вопросы было бы очень удобно иметь двое одинаковых часов, одни расположенные в нашей земной лаборатории, а другие — пронесящиеся мимо нас со скоростью, близкой к скорости света. Такая возможность есть, и ниже рассказано, как этот опыт был осуществлен.

В 1936—1938 гг. К. Д. Андерсон и С. Г. Неддермеер, а также И. К. Стринг и Е. К. Ственсон, исследуя космические лучи, обнаружил в них проникающее излучение, которое по ряду признаков отличалось от быстрых электронов и быстрых протонов. Проведенные ими исследования показали, что это излучение представляет собой поток быстрых положительно и отрицательно заряженных частиц, имеющих массу большую, чем у электронов, и меньшую, чем у протонов. Так были открыты новые частицы, которые получили название μ -мезонов или *мюонов*. По современным данным масса положительных и отрицательных мюонов одинакова и равняется приблизительно 207 электронным массам.

Вскоре проявились некоторые странности поведения этих частиц.

Заряженные частицы при прохождении через слои вещества теряют энергию на ионизацию и частично поглощаются. Обычно проникающую способность частиц оценивают по их поглощению в слое вещества данной плотности и толщины. Для того чтобы сразу учесть оба эти фактора, массу поглощающего слоя оценивают по числу граммов данного

*) *Зелиг К. А. Эйнштейн.* — М.: Атомиздат, 1964.

вещества на квадратный сантиметр площади. Оказалось, что мюоны сильнее поглощаются в воздухе, чем в эквивалентных по массе слоях свинца или латуни.

Такие опыты были повторены многими авторами. Ведь непонятное всегда влечет ученых. За ним скрывается иногда ошибка, чаще — новое открытие. Были проведены систематические исследования интенсивности мюонов на уровне моря и на разных высотах при наличии соответствующего поглощающего слоя. Эти опыты подтвердили наличие аномального поглощения мюонов при прохождении их через толстые слои воздуха. Более того, ослабление интенсивности мюонов в воздухе при движении их под углом оказалось больше, чем при движении по вертикали, хотя при этом учитывалось увеличение массы воздуха, пересекаемого частицей.

Объяснение странности поведения мюонов было дано в 1938 г. Г. Куленкампом, предположившим, что мюоны не стабильны и что среднее время их жизни того же порядка величины, что и длительность прохождения через слой атмосферы. В этом случае ослабление интенсивности потока мюонов при прохождении через слой атмосферы объясняется не только прямым их поглощением, но и самопроизвольным распадом. В то же время ослабление интенсивности мюонов при прохождении из через слой металла обязано лишь прямому поглощению, так как длина пути мюона в эквивалентном по массе слое металла всего несколько сантиметров или дециметров и соответствующее время во много раз меньше среднего времени жизни мюона.

В дальнейшем многие исследователи подтвердили распад мюонов и показали, что он происходит по схеме $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$, т. е. положительный мюон распадается на позитрон, нейтрино и антинейтрино, а отрицательный мюон — на электрон, нейтрино и антинейтрино.

В 1939 г. Б. Росси провел серию исследований для определения среднего времени жизни мюонов *). Идея этих опытов очень проста и является развитием высказываний Г. Куленкампа. Она заключается в следующем: так как мюоны радиоактивны, то при прохождении через слой вещества их число убывает не только вследствие поглощения, но и в результате распада. Следовательно, чем больше время пролета в слое вещества, тем больше мюонов успевает распасться. Если мюоны проходят через различные слои вещества, имеющие одинаковую массу, но различные тол-

*) Росси Б. Космические лучи.— М.: Атомиздат, 1966.

щину и плотность, то относительная убыль числа мюонов тем больше, чем толще слой и чем короче среднее время их жизни.

Таким образом, измерив уменьшение интенсивности мюонов в соответствующим образом подобранных слоях различных веществ (например, воздуха, воды, графита), можно определить среднее время жизни мюонов. Именно это и сделал Росси. Он провел измерения интенсивности мюонов в Чикаго (на высоте 180 м над уровнем моря), Денвере (1600 м над уровнем моря), Эко-лейк (3240 м над уровнем моря) и на горе Эванс (4300 м над уровнем моря), т. е. в пунктах, куда мюоны попадали, пройдя слои воздуха разной толщины и плотности. В каждом из этих пунктов он проводил две серии измерений: без фильтра и с графитовым фильтром определенной толщины. Таким образом он получал также данные об ослаблении потока мюонов в тонком слое плотного вещества. Обработка результатов этих измерений показала, что среднее время жизни мюонов составляет несколько микросекунд.

В последующие годы, несколько усовершенствовав измерительную аппаратуру, Б. Росси и Д. Холл провели серию измерений среднего времени жизни движущихся мюонов, но уже не для суммарного их потока, а для отдельных групп различной энергии. При этом оказалось, что у мюонов большой энергии, т. е. быстрых, среднее время жизни приблизительно в три раза больше, чем у мюонов малой энергии, т. е. более медленных. Как оценить этот результат?

Для измерения времени может быть использован любой процесс, периодически повторяющийся (например, качания маятника) или протекающий равномерно (например, высыпание песка, радиоактивный распад). Когда физики в своих лабораториях изучали скорость распада различных радиоактивных веществ, то они столкнулись с тем, что у одних изотопов период полураспада составляет миллиарды лет, а у других — лишь тысячные и миллионные доли секунды. При этом оказалось, что изменения температуры и давления в пределах, достижимых в земных лабораториях, не влияют на скорость распада. Таким образом, радиоактивные вещества могут служить для отсчета интервалов времени, т. е. работать как своеобразные часы и притом с большим постоянством.

С этой точки зрения мюоны, как и любые другие радиоактивные частицы, тоже могут рассматриваться как своеобразные часы. Почему же эти «часы» изменяют свои

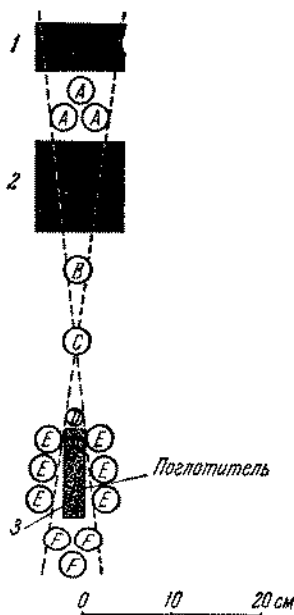


Рис. 43. Схема опыта для определения среднего времени жизни покоящегося мезона

показания при изменении энергии и скорости движения частиц? Почему быстрые мюоны живут дольше медленных?

Б. Росси и Д. Холл объяснили это тем, что по теории относительности темп течения любого процесса в природе зависит от скорости движения системы, в которой этот процесс происходит, относительно другой системы, на которой расположены наблюдатель и его измерительные приборы. Поскольку мюоны относительно Земли движутся с очень большой скоростью, близкой к скорости света, то и эффект замедления времени достигает большой величины, порядка сотен процентов. Указанные авторы пошли еще дальше: располагая данными о среднем времени жизни движущихся мюонов, по формулам теории относительности они вычислили, что среднее время жизни покоящихся мюонов должно составлять около двух микросекунд.

Ф. Разетти решил определить среднее время жизни покоящихся мюонов экспериментально. Так как мюон распадается на электрон или позитрон и нейтрино и антинейтрино ($\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$), то для определения его среднего времени жизни нужно зафиксировать два события: оставку мюона и его распад, и измерить интервал времени между ними. Эта задача была решена с помощью остроумного по замыслу и виртуозного по технике эксперимента, осуществленного Разетти в 1941 г. с помощью схемы запыдавающих совпадений.

По тому же принципу, но с несколько улучшенной методикой и большей точностью в 1942, 1943 гг. среднее время жизни покоящегося мезона было определено Б. Росси и Н. Нерсоном.

Схема этих опытов следующая (рис. 43). На пути мезонов ставится несколько фильтров 1, 2, 3 и несколько групп счетчиков A, B, C, D, E, F. Все счетчики, помеченные одной

и той же буквой, соединены между собой параллельно. Это означает, что они работают просто как один счетчик большой площади.

Счетчики групп *A, B, C, D* соединены в приборе по схеме совпадений. Это означает, что прибор выдает результирующий сигнал только тогда, когда наблюдаемая частица проходит через все эти группы счетчиков. Этим самым из всего потока космического излучения вырезается узкий направленный пучок таких частиц, которые способны пройти через два толстых свинцовых фильтра *1* и *2*, а это возможно лишь для частиц определенного типа и энергии. Таким образом «ядерный телескоп» отбирает частицы нужного типа.

Третий фильтр нужен для наблюдения остановившихся мезонов. Еще одна группа счетчиков помещена за этим фильтром (группа *F*) и соединена в приборе со всеми остальными по схеме антисовпадений. При этом прибор выдает результирующий сигнал только тогда, когда наблюдаемая частица проходит через группы счетчиков *A, B, C, D*, но не проходит через группу счетчиков *F*. Таким образом, прибор фиксирует остановку мезона в поглотителе.

Для того чтобы отметить распад мезонов, с боков фильтра *3* помещена группа счетчиков *E*, регистрирующих электроны или позитроны, появляющиеся при распаде мезонов. Эта группа счетчиков соединена в приборе со всеми остальными группами по схеме запаздывающих совпадений. При этом срабатывание всего прибора происходит только тогда, когда мезон, пройдя через первые два фильтра и застряв в третьем, спустя определенный промежуток времени испускает электрон или позитрон.

Итак, исследователь создал устройство, которое среди частиц различного типа, движущихся с огромными скоростями, отбирало лишь нужные ему μ -мезоны, а среди них — лишь те, которые застряли в фильтре *3*. Теперь надлежало измерить, через сколько времени после того как μ -мезон застрял в фильтре и остановился, он распадается и испускает β -частицу.

В первых опытах такого рода при регистрации нужных событий последовательно, шаг за шагом, менялось заранее заданное запаздывание между счетчиками *A, B, C, D* и счетчиками *E*. В последующих опытах Б. Росси и Н. Персона вместо этого применялся «электронный секундомер», который позволял измерять интервал времени между остановкой и распадом мюона для каждого отдельного акта распада.

Определенное в результате этих исследований среднее время жизни покоящегося мюона оказалось равным $(2,15 \pm \pm 0,1)$ мкс. Легко видеть, что этот результат находится в хорошем согласии с расчетным значением, полученным ранее Б. Росси и Д. Холлом на основе формул теории относительности.

Описанные опыты очень наглядно демонстрируют изменение темпа времени в движущихся телах и необходимость расширения самого понятия времени в соответствии с теорией относительности.

Измерение больших промежутков времени

Путешествие в прошлое

Археологи изучают далекое прошлое, исследуют возникновение, развитие и гибель древних культур. По различным находкам — орудиям труда, одежде, предметам домашнего обихода, вооружению — они узнают, как жили люди многие тысячи лет назад. Археологические находки позволяют также судить о связях между различными древними народами. Определение возраста этих находок имеет при этом первостепенное значение для выяснения влияния одного народа на другой и решения ряда других важных археологических задач.

Как определяется возраст археологических находок?

Высокие курганы разбросаны по великой русской равнине. В них погребены воины в полном вооружении, каждый со своим боевым конем. Много различных предметов положено в могильники этих людей, чтобы, согласно их верованиям, они и в загробной жизни ни в чем не нуждались. Эти курганы рассказывают нам об отдаленном прошлом нашей страны, о жизни и культуре различных племен, населявших несколько тысяч лет назад обширные пространства от Карпат на западе до Памира и Алтая на востоке.

Раскопки в Неаполе Скифском около Симферополя знакомят нас с более поздним историческим периодом. Здесь археологические находки свидетельствуют о существовании культуры скифов городского характера. Возраст курганов обычно определяют по типу погребения и погребальным предметам местной работы, но иногда в курганах находят и привозные вещи: глиняные сосуды греческой работы, китайские ткани, зеркальце китайской работы... Эти вещи позволяют более точно установить время жизни человека, погребенного в кургане.

По археологическим находкам в районах Приднестровья удалось узнать о так называемой трипольской культуре — о людях, живших около 5000 лет назад. Найденные

археологами фигурки домашних животных, мотыги из рога оленя, ножи и серпы из кремня, кремневые наконечники стрел, остатки обмазки глинобитных жилищ, каменные зернотерки, множество статуэток позволили узнать, на каких диких животных охотился древний человек, какими домашними животными он владел, каким было его хозяйство и как складывались его верования.

Не так давно в Узбекистане археологи нашли погребенный в песках город. Раскопки его дали возможность многое узнать о высокой культуре древнего Хорезма. Обгорелые остатки крепости и жилищ позволили много веков спустя прочесть историю его гибели и узнать, как и когда нашествие кочевников положило конец благосостоянию и мощи древнего Хорезма.

Еще более далеки от нас события, происходившие в Древнем Египте. Они отделены от нас многими десятками веков, но неутомимые археологи находят пути для того, чтобы и в этом случае ответить на вопросы: что, как и когда?

В Древнем Египте особое внимание уделялось погребению. Бальзамирование тела умершего и богатое убранство гробницы (различными предметами или их изображениями), согласно египетским верованиям, было необходимо для удобного и приятного существования его тени. Ведь древние египтяне верили, что человек состоит из трех частей: тела, искры божьей и тени, или Ка, которая соединяет тело с искрой божьей. Египетские жрецы учили, что после смерти человека его тень еще тысячи лет бродит по земле. В точности похожая на человека, но только будто сотканная из тумана, тень может ходить, говорить и первые несколько сот лет должна питаться, в дальнейшем ей достаточно лишь изображений пищи. Главное для тени — тело, в котором она жила раньше. Если оно не сохранилось, то тень тоскует и бродит неприкаянной по земле.

Эти взгляды заставляли древних египтян создавать грандиозные города мертвых, занявшие целый край западной пустыни, и строить огромные пирамиды, внутри которых располагались усыпальницы фараонов. Ныне эти города мертвых позволили многое узнать о давно минувшей жизни. Сопоставление отрывочных записей различных событий, терпеливое их изучение позволяют ученым восстановить историю древней жизни. Однако лишь тогда, когда удается уверенно датировать хотя бы отдельные важнейшие события, вся картина далекого прошлого приобретает достаточную последовательность и достоверность.

Установить даты археологам помогают исторические памятники и древние хроники, содержащие записи различных событий: войн и стихийных бедствий, смены царей и царских династий и т. д. Особенно удачно, когда одно и то же событие отмечается несколькими независимыми источниками или само событие таково, что мы можем точно определить время, когда оно произошло. Так, например, из древней китайской летописи известно о двух незадачливых астрономах по имени Хи и Хо, которые в 2200 г. до нашей эры не предсказали своевременно затмения Солнца и за эту провинность лишились голов. Сопоставление летописи с современным вычислением этого затмения дает точную метку времени и позволяет проверить, насколько правильно древние китайские летописцы отсчитывали время.

Однако археологам далеко не всегда так легко удается определить время исследуемых событий. Наоборот, чаще всего это оказывается совсем не просто. Между тем определение возраста археологических находок является совершенно необходимым условием для получения уверенных заключений об истории древних народов. Можно ли найти метод для непосредственного определения возраста археологических находок? Существуют ли часы для отсчета тысячелетий? Да, такие часы существуют, причем нескольких различных типов. Однако о том, каковы они, какой у них принцип действия и в каких пределах они работают, мы расскажем несколько далее.

А теперь заглянем еще дальше. Если бы мы могли перенестись всего лишь на 10 000 лет назад, то обнаружили бы, что на земле нет ни городов, ни деревень; небольшие группы людей ютятся в пещерах, со всех сторон их подстерегают опасности. Страшные, непонятные им силы природы властвуют над ними. Плохо вооруженные, они охотятся на одних зверей и с трудом защищаются от других. Эти люди не имели письменности и не оставили почти никаких памятников.

Еще дальше в глубь веков! Как трудно узнать человека в этом существе с низким покатым лбом, обросшем волосами, облаченном в звериную шкуру. Полусогнувшись так, что руки иногда касаются коленей, сжимая дубину или каменный топор, пугливо крадется доисторический человек — предшественник гордо распрямившегося современного человека, владыки природы.

Для того чтобы разобраться в последовательности и смене этих давно минувших форм жизни, нужно определить их возраст. Как же это сделать?

Попробуем заставить заговорить вещи и даже камни.

Недавно в Испании была открыта пещера, которая в течение многих тысяч лет служила обиталищем то для людей, то для зверей. Они жили в ней, умирали, а земля, слой за слоем, прикрывала их останки. Множество всяких остатков образовало в этой пещере холм высотой 13,5 метра, поднимающийся с ее дна почти до самого свода. Сначала на небольшой глубине были обнаружены треугольные кинжалы из бронзы. Люди, которые их оставили, жили 2000 лет назад. Несколько глубже были найдены различные вещи и скелеты. Еще глубже — кости северного оленя и сделанные из кости резцы. Затем снова скелеты. Еще на два метра ниже было найдено много каменных ножей и сверл, оставленных людьми, жившими 10 тысяч лет назад. На один метр глубже лежали кости носорога и пещерного медведя. А на самом дне пещеры были найдены грубо выделанные каменные топоры и скребки, сделанные около 50 тысяч лет назад.

Процесс наращивания слоя земли идет медленно. Исследования показали, что в этой пещере для увеличения слоя земли на четверть дециметра требовался целый век.

Археологические находки, обнаруженные в различных частях света, позволили постепенно выяснить основные вехи развития человека и его культуры. Удалось установить, что 30—40 тысяч лет назад жили так называемые кроманьонские люди, имевшие продолговатый объемистый череп, широкое лицо и необычайной силы жевательные мышцы. Археологами найдены скелеты этих людей, а также изготовленные ими разнообразные орудия труда и рисунки животных на стенах пещер.

Неандертальские люди, жившие 50—70 тысяч лет назад, занимали среднее место между обезьяной и человеком. Их колени были всегда несколько согнуты. Лоб у них был скошен назад, подбородка почти не было. Скелеты этих людей рассказали нам о том, как они выглядели; принадлежавшие им каменные орудия — топоры, ножи, шарообразно обтесанные камни, сверла и т. п. — позволили нам узнать, на какой ступени развития они находились. Существовавшие несколько сот тысяч лет назад питекантропы ходили так же прямо, как и мы, но голова их была значительно больше похожа на обезьянью, чем на человеческую. Они имели резко выступающие надбровные дуги и лоб, так круто уходящий назад, что в скошенном черепе умещалось мозга вдвое меньше, чем у современного человека.

В 1960 г. в Олдувейском ущелье в Танганьике (Африка)

археологи супруги Мэри и Луис Лики нашли останки еще более примитивного человека, который получил название *Homo habilis* («человек умелый»). Этот человек в качестве орудий применял гальки с оббитым краем. Датирование пород, взятых из того слоя, где он был найден, позволило установить, что он жил около 2 миллионов лет назад.

Если заглянуть еще дальше, то можно проследить эпохи, когда еще не было человека и только гигантские растения и огромные животные населяли Землю.

Историю Земли принято разделять на отдельные большие этапы. Последний из них назван кайнозойской эрой или эрой «новой жизни». Он длится уже около 55 миллионов лет. В конце кайнозойской эры появился человек и живем мы.

Кайнозойской предшествовала мезозойская эра, или эра «средней жизни», длившаяся приблизительно 135 миллионов лет. Это было время, когда на Земле стояло вечное лето. Климат тогда был настолько теплым и ровным, что в находимых ныне окаменевших деревьях той эпохи нельзя различить колец, так как деревья росли равномерно круглый год.

В мезозойскую эру властителями Земли на суше, в воде и в воздухе были пресмыкающиеся. Гигантские ящеры достигали огромных размеров, например бронтозавр весил около 30 тонн, раз в пять больше, чем современный африканский слон. Длина бронтозавра равнялась 20 метрам, так что взрослому человеку нужно было бы сделать 30 шагов, чтобы пройти от его морды до хвоста. К концу мезозойской эры стало холоднее. В период оледенения все эти гиганты погибли.

Палеозойская эра, или эра «древней жизни», началась около 600 миллионов лет назад и окончилась 340 миллионов лет назад. Это было в общем спокойное, теплое время, лишь изредка прерывавшееся похолоданиями.

В начале палеозойской эры жизнь была только в океанах, в которых жили ракообразные существа — трилобиты и археоциаты — организмы, промежуточные между губками и кораллами. Археоциаты имели известковый скелет и длинные, похожие на корни волокна, с помощью которых они прикреплялись к подводным камням. Затем в морях появились рыбы, а растения и вслед за ними некоторые животные переселились на сушу. К концу палеозойской эры живые существа окончательно завоевали материка, размножились и упрочились на суше. Сырые дремучие леса из гигантских папоротников и хвощей покрыли

Землю. В морях к этому времени трилобиты и археоциаты вымерли, но рыбы чрезвычайно размножились и дали большое разнообразие видов.

Еще более ранние периоды жизни на Земле называют эозойской эрой или эрой «зари жизни». Первые материки и океаны появились на Земле около 1,5 миллиарда лет назад. В пластах, которые образовались около 700 миллионов лет назад, уже имеются остатки довольно сложных форм живых существ. Таким образом, вероятно, что около 1 миллиарда лет назад или даже несколько раньше на Земле возникла жизнь и первые скопления живых существ — крохотные комочки живого, похожего на студень вещества протоплазмы — появились в тепловатых водах океанов.

Тщательные розыски, кропотливые исследования позволили палеонтологам по остаткам древней жизни, а иногда только по неясным ее следам — отпечаткам на камнях — постепенно, шаг за шагом, разобраться в пути ее развития. Многочисленные сопоставления позволили выяснить последовательность развития различных форм жизни и, хотя и довольно приблизительно, установить их хронологию.

Когда ученые, исследуя минувшие эпохи, пользуются пластами земной коры как ступеньками, ведущими в прошлое, то остатки живых организмов служат для них метками для определения возраста, являются как бы окаменелой хронологией.

Крупнейшие геологи уже давно отмечали важность определения возраста горных пород как для теоретической, так и для практической геологии. Академик В. А. Вернадский в своих работах подчеркивал важность определения длительности геологических процессов и возраста геологических формаций. Академик В. А. Обручев писал, что «...руководящую роль при поисках новых месторождений полезных ископаемых играет знакомство с геологическими процессами, которые в минувшие периоды жизни Земли создавали эти месторождения и создают их, конечно, и в настоящее время...» «Наличие каких же полезных ископаемых мы можем предполагать в горной стране?.. Ответ будет зависеть от возраста этой страны» *).

Увы, палеонтологический метод определения возраста горных пород вследствие имевших место в древние времена массовых переселений живых организмов далеко не всегда надежен.

*) Обручев В. А. Основы геологии.— М.: Госгеолиздат, 1947.— С. 287, 293, 294.

А если пойти еще дальше и проследить те эпохи истории Земли, когда на ней еще не было жизни? Как и когда складывался лик Земли? Что может служить для установления опорных дат этой эпохи? Какие «часы» пригодны для этого?

Относительная и абсолютная геохронология

Ни одни из описанных нами ранее часов не годятся для измерения столь больших промежутков времени и датирования давно минувших событий. Ведь часы, *изготовленные человеком*, в геологических масштабах времени появились сравнительно недавно, некоторые несколько тысячелетий, а другие лишь несколько десятков лет назад. Использование изготовленных человеком часов для *непрерывного* отсчета времени не пасчитывает и нескольких сот лет.

Часы — вращающаяся вокруг своей оси Земля и часы — Земля, вращающаяся вокруг Солнца, работают уже миллиарды лет, однако отсчет по ним начался лишь несколько тысяч лет назад и, как мы теперь доподлинно знаем, велся нерегулярно, с провалами и сбоями.

Ученые разработали метод отсчета времени по годичным кольцам деревьев, но эта шкала времени простирается не очень далеко (до нескольких тысяч лет) и имеет ограниченное применение. Отложения ленточных глин, песка, солей также дают возможность отсчета времени. Все эти методы учеными изучались и использовались. Однако часы, основанные на этих процессах, оказались очень неточными.

Имеется еще ряд методов измерения больших промежутков времени. Целая группа таких методов основана на изучении смены различных форм жизни. На протяжении веков и тысячелетий одни виды растений и животных сменяли другие. Каждый из этих видов существовал более или менее продолжительное время. Многие виды существовали одновременно. Однако большинство из них, пережив период расцвета и широкого распространения, затем по разным причинам погибало и уступало место другим.

Изучив последовательность, в которой происходила смена одних видов другими, и хотя бы приблизительно определив продолжительность существования каждого из них, можно таким образом составить шкалу времени. Такие часы основаны на сопоставлении различных событий между собой и, следовательно, показывают *относительное время*. Они дают возможность уверенно определять *последовательность* разных явлений. Однако эти часы оказываются очень неточными при датировании отдельных событий, или, как часто

говорят, определеннн возраста этих событий. Тем не менее и в настоящее время эти методы во многих случаях оказываются полезными и широко применяются.

В начале нашего века для отсчета больших промежутков времени были разработаны «радиоактивные часы». Именно они позволили определять возраст различных объектов исследования с приемлемой точностью, получать даты давно минувших событий и, в конечном счете, лучше разобраться в истории жизни на Земле, формировании самой Земли и даже развитии Солнца и звезд. Очень существенной особенностью радиоактивных часов является то, что с их помощью для археологических находок, горных пород и других объектов исследования определяется *абсолютный возраст*: абсолютный в том смысле, что он находится по некоторым свойствам (радиоактивности) данного образца и непосредственно для данного образца, между тем как в методах относительной хронологии возраст данного образца определяется из сопоставления его с другими объектами, например остаткамн спор и пыльцы растений, раковинами различных типов и т. д.

«Радиоактивными часами» называют метод или, вернее, целую группу очень мощных методов, в которых явление радиоактивного распада ядер различных изотопов используется для определения больших промежутков времени. Проведенные исследования радиоактивных веществ показали, что скорость их распада не зависит от окружающей температуры и давления по крайней мере в тех пределах, которые достижимы в земных лабораториях. Таким образом, процесс радиоактивного распада с успехом может быть использован для отсчета промежутков времени.

Распад различных радиоактивных изотопов происходит с существенно различной скоростью, например: период полураспада висмута-212 равен 60,5 минуты, урана-238—4,5 миллиарда лет, а углерода-14—5730 годам. Напомним, что *периодом полураспада* радиоактивного вещества называется промежуток времени, в течение которого количество его уменьшается вдвое. Таким образом, для измерения различных объектов и разных интервалов времени имеется достаточно широкий выбор подходящих изотопов. Тем не менее при использовании радиоактивных часов для отсчета больших промежутков времени обнаружилась специфические и серьезные трудности. Потребовалось много труда и научной выдумки для того, чтобы достигнуть той степени понимания используемых процессов, которая позволила эти трудности преодолеть.

Между тем принцип измерения больших промежутков времени с помощью радиоактивных часов очень прост. В некоторой мере он подобен принципу работы огненных часов, в которых соответствующим образом приготовленная палочка горит с постоянной и заранее известной скоростью. Зная начальную длину палочки, скорость ее сгорания и измерив длину несгоревшей ее части, можно без особого труда определить, сколько прошло времени от того момента, когда палочка была зажжена. Именно так и поступали в древности.

Однако между радиоактивными и огненными часами аналогия оказывается неполной в том отношении, что через равные интервалы времени длина горящей палочки огненных часов уменьшается на определенные отрезки, т. е. по закону арифметической прогрессии, а количество радиоактивного вещества через равные интервалы времени уменьшается в определенное число раз, т. е. по закону прогрессии геометрической. Если в начальный момент длина палочки огненных часов равнялась A , а скорость ее сгорания B , то через 1, 2, 3 часа ее длина будет равняться $A - 1B$, $A - 2B$, $A - 3B$ и т. д. Если количество радиоактивного вещества в начальный момент равнялось A , то через равные и характерные для каждого радиоактивного изотопа интервалы времени оно будет равняться $\frac{1}{2}A$, $\frac{1}{4}A$, $\frac{1}{8}A$ и т. д. Кривую, описывающую такое изменение величины, называют *экспонентой*. То, что количество имевшегося вначале радиоактивного вещества убывает с течением времени по экспоненте, никаких добавочных затруднений в отсчете времени не вызывает.

Труднее обстоит дело с определением в тех или иных образцах начального содержания радиоактивного вещества. В самом деле, как узнать начальное содержание радиоактивного вещества в материале, который никто специально не готовил и который тысячи и миллионы лет пролежал в грунте, прежде чем любознательный ученый извлек его оттуда и назвал образцом?

Еще более трудным оказалось исключение различных побочных эффектов, действовавших во время пребывания образцов в грунте. Ведь практически ни один материал, используемый для определения возраста, в отношении обмена с внешней средой не является вполне закрытой системой. Напротив, обычно во время пребывания образцов в грунте имеет место как утечка радиоактивных веществ, так и некоторое поступление их извне. Во избежание более или менее значительных искажений датирования, все это нужно учитывать путем введения соответствующих поправок.

Для преодоления этих трудностей потребовались разнообразные знания, понадобилось много труда, а в некоторых случаях довольно сложные и остроумные умозаключения. В одних методах с указанными трудностями справиться удалось, и такие методы получили широкое распространение, в других — не удалось, и такие методы в дальнейшем были отброшены.

Далее описаны наиболее интересные и важные методы датирования, а также некоторые задачи, которые удалось решить с их помощью.

Радиоуглеродный метод датирования событий

Для решения многих задач геологии, палеогеографии и археологии в настоящее время широко и успешно применяется метод радиоуглеродного датирования. Поэтому мы опишем его довольно подробно.

Этот метод — эти радиоуглеродные часы — позволяет определять абсолютный возраст различных материалов органического происхождения и таким образом датировать те или иные события, происходившие у поверхности Земли в далеком прошлом. Их циферблат начинается от нуля, т. е. от современности и простирается на 50—60 тысяч лет назад.

Созданы эти часы не очень давно. Радиоуглеродный метод определения абсолютного возраста материалов органического происхождения был предложен в 1946 г. В. Ф. Либби. Им же были разработаны физические основы этого метода. Известно, что в земной атмосфере и океанах, в наземных растениях и животных, в морских организмах, в общем во всей биосфере Земли, имеется радиоактивный углерод ^{14}C . Правда, его относительно немного. Если из какого-нибудь органического материала, например куска дерева, путем сжигания получить углерод, то в нем обнаруживается характерное для ^{14}C β -излучение. В качестве удобной количественной характеристики этого излучения вводят понятие об *удельной активности*, понимая под этим число распадов, происходящих в 1 г естественной смеси изотопов углерода за 1 мин. Для углерода, полученного из только что срубленного дерева, удельная активность равна всего 15,3 расп/(г·мин). Между тем в 1 г углерода содержится около $5 \cdot 10^{23}$ атомов.

Естественный углерод представляет собой смесь нескольких изотопов, в том числе двух стабильных: ^{12}C (98,9 %) и ^{13}C (1,1 %), а также очень малого, равного лишь

$1,07 \cdot 10^{-10}$ %, количества радиоуглерода ^{14}C . Однако предположение о том, что этот радиоуглерод является остатком того, который был на Земле в период ее образования, т. е. 4,5 миллиарда лет назад, совершенно невероятно.

Ведь период полураспада ^{14}C равен всего лишь 5730 годам. Если бы 4,5 миллиарда лет назад вся Земля целиком состояла из радиоуглерода, то и в этом случае к нашему времени его осталось бы в миллиарды миллиардов раз меньше, чем обнаруживается сейчас.

Почему же на Земле радиоуглерод не исчез, не вымер и обнаруживается ныне? Очевидно, лишь потому, что есть какой-то механизм, который его все время порождает.

Этот механизм ныне известен и заключается в следующем. На Землю непрерывным потоком приходит космическое излучение. В его составе есть тяжелые незаряженные частицы: *нейтроны*. При прохождении через атмосферу нейтроны взаимодействуют с ядрами атмосферного азота. При этом происходит следующая ядерная реакция (рис. 44): нейтрон, сталкиваясь с ядром азота, образует с ним промежуточную неустойчивую систему, которая спустя очень короткое время выбрасывает протон и, таким образом, превращается в ядро радиоактивного углерода-14.

Вслед за перестройкой ядра довольно быстро происходит перестройка электронной оболочки и получается атом углерода, в химическом отношении идентичный любым другим углеродным атомам. Вступая в соединение с атомами кислорода, он окисляется до углекислого газа. Наряду с обычным углекислым газом воздуха он поглощается растениями, входит в состав углекислых солей, растворенных в океанах, и т. д.

Таким образом, порожденный нейтронами космического излучения углерод-14 включается в биохимический круговорот жизни Земли.

Будучи радиоактивным, ядро атома углерода-14 через некоторое время распадается. При этом испускаются бета-частица (электрон) и антинейтрино, а ядро углерода-14 превращается в ядро стабильного азота-14.

Между тем всякий живой организм находится в состоянии непрерывного обмена с окружающей средой, погло-

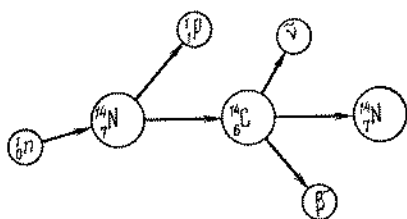


Рис. 44. Схема образования и распада углерода-14

щая одни вещества и выделяя другие. Поэтому представляется естественным предположение о том, что в живом организме удельная активность углерода должна быть такой же, как и в окружающей среде. Это заключение логично, но не бесспорно. К тому же оно представляет лишь одно звено довольно длинной цепи умозаключений, необходимых для отыскания начального содержания радиоуглерода в образцах.

Переберем же все эти звенья одно за другим: космическое излучение вблизи от поверхности Земли содержит нейтроны. Эти нейтроны, взаимодействуя с азотом земной атмосферы, порождают радиоуглерод. Образовавшийся радиоуглерод окисляется до углекислоты, смешивается с обычной углекислотой атмосферы и таким образом включается в биохимический круговорот Земли. Все организмы в процессе обмена поглощают углекислоту и таким образом получают радиоуглерод.

Если в течение десятков тысяч лет интенсивность космического излучения, падающего на Землю, и соответственно плотность потока нейтронов вблизи от Земли, не изменялись;

если радиоуглерод, порожденный в земной атмосфере нейтронами космического излучения, разбавлялся в ней стабильным углеродом всегда в одинаковой мере;

если в земной атмосфере не было и нет иных нерегулярных источников радиоактивного и стабильного углерода;

если удельная активность углерода атмосферы не зависит от широты и долготы местности и высоты ее над уровнем моря;

если действительно относительное содержание радиоуглерода в живых организмах такое же, как и в атмосфере;

если все это так, то для определения начального содержания радиоуглерода в данном образце органического происхождения достаточно измерить его содержание в любой пробе нулевого возраста и органического происхождения, например в только что срубленном дереве.

Эта величина измерена и хорошо известна. Она такова, что дает 15,3 радиоактивного распада в минуту на 1 г естественной смеси всех изотопов углерода.

После отмирания организма его углеродный обмен с внешней средой прекращается. Таким образом, моментом начала отсчета радиоуглеродных часов является смерть организма. Десятки тысяч лет назад какое-то дерево было по-

валено лавиной или ледником, какое-то животное погибло в бою или от землетрясения, и с этого момента в них содержание стабильного углерода не изменялось, а количество радиоуглерода непрерывно убывало с вполне определенной скоростью, так что через 5730 лет его осталось лишь $\frac{1}{2}$ от первоначального, через 11 460 лет — лишь $\frac{1}{4}$ и т. д.

Насколько все эти допущения правомочны? Ведь если хотя бы одно из них неверно, то разваливается вся цепь заключений, а определяемый радиоуглеродный возраст оказывается иллюзорным.

Для суждения о правильности всех этих предположений Либби и другими авторами была проведена широкая экспериментальная проверка метода на различных образцах известного возраста. При этом оказалось, что в пределах погрешности измерений результат определений абсолютного возраста образцов не зависит от геомагнитной широты пунктов взятия проб и от высоты этих пунктов над уровнем моря. Это свидетельствует о достаточно быстром усреднении, происходящем вследствие перемешивания атмосферы.

Кроме того, оказалось, что если принять во внимание некоторые различия начальной удельной активности углерода в наземных и морских организмах, то результаты радиоуглеродного датирования не зависят также и от типа образцов.

Однако решающей проверкой правильности радиоуглеродных часов должно было быть сравнение их показаний с возрастом достаточно древних образцов, надежно определенным другим способом. Понятно, что осуществить такую проверку было совсем не просто, так как для этого нужно было располагать предметами органического происхождения, возраст которых был бы заранее достаточно точно известен и составлял бы многие тысячелетия.

Для контрольных измерений удалось отыскать семь различных образцов дерева:

1. Кусок ели, возраст которой был установлен по годичным кольцам ее ствола и оказался равным 1369 годам. Таким образом, он был датирован 580 г. нашей эры.

2. Кусок дерева от окаменелого гроба (Египет), который по историческим данным был датирован 200 ± 150 г. до н. э. Таким образом, в 1949 г., т. е. тогда, когда производились указанные исследования, возраст этого образца составлял 2149 ± 150 лет (знаки \pm и цифра 150 указывают на погрешность определения возраста и показывают, что в данном случае он был известен приблизительно в пределах от 2000 до 2300 лет).

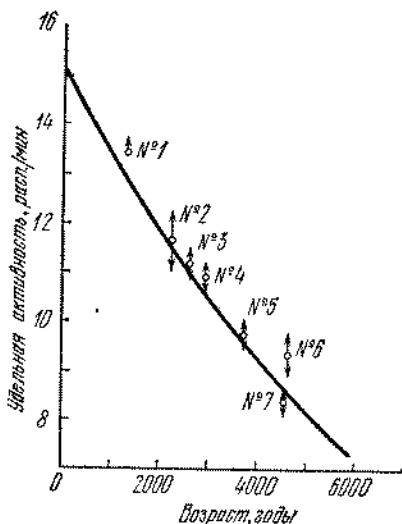


Рис. 45. Удельная активность углерода образцов известного возраста: кружки — экспериментальные значения абсолютного возраста, полученные радиоуглеродным методом, сплошная кривая — расчет

3. Кусок дерева от пола дворца в северно-западной Сирии, который по историческим данным был датирован (675 ± 50) г. до н. э.

4. Внутренняя часть дерева секвойи, годовичные кольца которой соответствовали интервалу времени от 1031 до 928 г. до н. э. В 1949 г. это соответствовало среднему возрасту, равному (2928 ± 52) года.

5. Кусок доски от похоронного судна египетского царя Сезостриса. Этот образец по историческим данным был датирован 1800 г. до н. э.

6. Кусок доски из акаций с гробницы Джосера в Саккаре, который по историческим данным был датирован (2700 ± 75) г. до н. э. Таким образом, возраст этого образца составлял около 4650 лет.

7. Кусок кипарисовой доски из гробницы Снофру в Мейдуме, который по историческим данным был датирован (2625 ± 75) г. до н. э. Таким образом, возраст этого образца равнялся около 4600 лет.

Проделанные радиоуглеродные измерения возраста этих образцов, как это видно из рис. 45, дали довольно хорошее совпадение расчетов с экспериментами и таким образом подтвердили догадку и расчет пытливого ума ученых.

На основании указанных результатов В. Ф. Либби сделал вывод о справедливости следующих предпосылок, положенных им в основу радиоуглеродного метода:

1. Интенсивность космического излучения вблизи Земли, интенсивность потока нейтронов и соответственно удельная активность углерода в земной атмосфере по крайней мере в течение последних нескольких десятков тысяч лет постоянны.

Напомним, что удельной активностью углерода называют число радиоактивных распадов радиоуглерода, происходящих в 1 г углерода образца за 1 мин.

2. Удельная активность углерода в живом организме данного типа одинакова и постоянна, таким образом, является «мировой» постоянной биологического вещества.

3. После отмирания организма изменение в нем удельной активности углерода происходит по экспоненциальному закону, т. е. в соответствии с законом геометрической прогрессии.

Таким образом, казалось очевидным, что метод открывает возможность однозначного определения абсолютного возраста образцов органического происхождения. После этого многие исследователи стали широко и успешно применять радиоуглеродные часы для определения абсолютного возраста самых различных образцов.

Уточнение радиоуглеродного метода

Идея радиоуглеродного метода простая, но не бесспорная. Между тем в последующие годы, наряду с дальнейшими успехами метода, время от времени стали обнаруживаться и отдельные резкие отличия радиоуглеродных дат от тех, которые ожидалось археологам и геологам в соответствии с их представлениями по тому или другому вопросу. При этом в одних случаях радиоуглеродные даты в конце концов подтверждались и археологам и геологам приходилось менять свои представления. Однако в других случаях неточными оказывались радиоуглеродные даты.

В то же время техника радиоуглеродных измерений и соответственно их точность были уже значительно улучшены, и ученые воспользовались этим для того, чтобы разобраться в тонкостях радиоуглеродного метода. При этом выяснилось, что ни одно из основных положений, сформулированных Либби, не выполняется точно и все они нуждаются в дополнительном анализе. В то же время оказалось, что удается сделать так, чтобы показания радиоуглеродных часов были достаточно точными и достоверными.

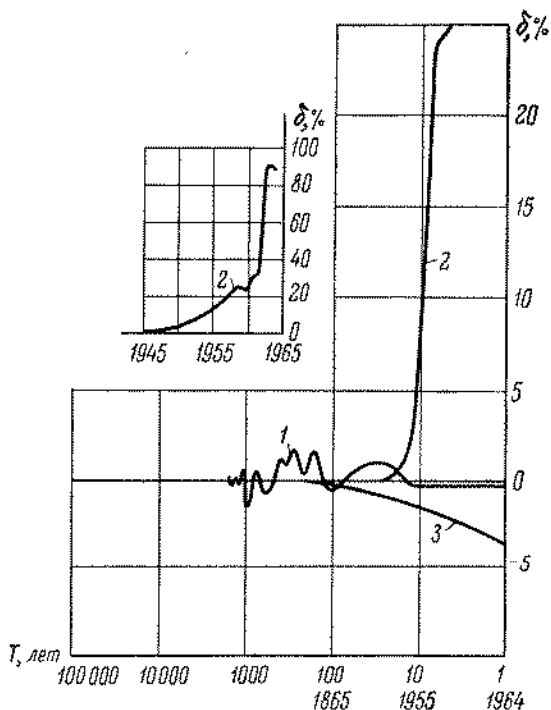


Рис 46. Относительное изменение удельной активности углерода в прошлом, обусловленное: 1 — солнечной деятельностью, 2 — эффектом ядерных испытаний, 3 — промышленному эффекту

Для того чтобы в этом разобраться (а это интересно и даже поучительно), лучше всего, следуя истории развития этого метода, подвергнуть в нем сомнению каждый пункт. Действительно ли тысячи и десятки тысяч лет назад концентрация радиоуглерода в земной атмосфере была такой же, как и сейчас? Ведь если это не так, то отсчет времени становится неопределенным. Неопределенным в такой же мере, как если бы неизвестной была начальная длина палочки огненных часов.

Эти сомнения не напрасны. В 1958 г. Г. Л. де-Фриз, а затем М. Стайвер, Г. Е. Зюсс и др. показали, что удельная активность углерода в земной атмосфере уменьшается с увеличением активности Солнца. Этот эффект объясняется тем, что солнечные магнитные поля модулируют поток космических лучей, падающих на Землю. Такие исследования были доведены до нескольких тысяч лет назад, и при этом

оказалось, что вариации удельной активности углерода не превышают 1—2 % (рис. 46, кривая 1), что соответствует искажению абсолютного возраста, отсчитываемого с помощью радиоуглеродных часов, на 80—160 лет.

Однако не исключена и возможность того, что в более отдаленном прошлом изменения удельной активности углерода в атмосфере Земли были более значительными, например вследствие больших изменений климата Земли. Изучение этого вопроса представляет большой интерес.

Добавочным источником радиоуглерода в биосфере Земли является испытание ядерного и в особенности термоядерного оружия. Загрязнение атмосферы радиоактивным углеродом, происшедшее в результате ядерных испытаний над поверхностью Земли, имеет глобальный характер. Этот эффект достиг значительной величины в сравнении со средней удельной активностью углерода за предшествующий период времени. Однако в настоящее время в связи с запрещением ядерных испытаний в воздухе ядерный эффект имеет тенденцию к уменьшению. Так как эффект ядерных испытаний начал действовать лишь около 40 лет назад, то для датирования образцов старше этого возраста он не имеет значения (рис. 46, кривая 2).

Еще одной причиной нарушения постоянства концентрации радиоуглерода в биосфере Земли является разбавление природной смеси углерода стабильными изотопами. Такое разбавление обязано промышленным выбросам углекислоты в атмосферу. Вследствие перемешивания атмосферы эффект в общем имеет глобальный характер. Путем исследования древесных колец известного возраста Г. Е. Зюсс показал, что этот эффект начал действовать около 150 лет назад (рис. 46, кривая 3).

Таким образом, изменения удельной активности углерода в прошлом действительно имели место. Эти изменения в некотором интервале времени уже известны. Поэтому тогда, когда это возможно и нужно, в результаты измерений вводят соответствующую поправку и получают уточненное значение абсолютного возраста отобранных проб.

Теперь обсудим второе основное положение Либби. Действительно ли удельная активность углерода в живых организмах данного типа одинакова? Строго говоря, это не так. К. Д. Килинг показал, что условия жизни данного организма в некоторой, хотя и небольшой мере влияют на концентрацию в нем радиоуглерода. Проникающие из этого эффекта искажения в определении абсолютного возраста могут достигать нескольких сот лет.

Однако вскоре был найден выход и из этой трудности. Исследования показали, что когда у двух одновозрастных деревьев различается концентрация радиоуглерода (которую оценивают по отношению $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$), то отношение стабильных изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ тоже оказывается измененным. Причем сдвиг отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ всегда в два раза больше, чем сдвиг отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Таким образом, независимое измерение отношения стабильных изотопов данного образца позволяет выяснить, есть ли изотопный сдвиг и какой он величины. Обычно он невелик. Однако тогда, когда это нужно, вводят соответствующую поправку и получают уточненное значение абсолютного возраста.

Таким образом, удалось справиться с рядом трудностей, существенных в основном при датировании молодых образцов. Между тем при датировании очень древних образцов обнаружились трудности совсем особые. Анализ этих трудностей, позволивший очертить границы радиоуглеродного метода, или, если угодно, узнать, каким тысячелетием заканчивается «циферблат» радиоуглеродных часов, описан далее.

Границы радиоуглеродного метода

Геологам очень нужно уметь датировать древние образцы, так как это дает столь важную для них возможность проникнуть в далекое прошлое Земли. Археологам иногда нужно уметь определять возраст совсем молодых образцов.

Часто бывает так, что самое существенное и важное лежит вблизи границ метода или даже за ними. Естественно, что у ученых возникает желание раздвинуть эти границы.

Верхней возрастной границей радиоуглеродных часов является нулевой возраст. Однако вследствие того, что самые молодые образцы радиоуглеродным методом датируются с погрешностью около ± 50 лет, «циферблат» радиоуглеродных часов начинается от несколько размазанного нуля.

То, что нуль радиоуглеродных часов несколько размазан, объясняется наличием погрешности измерений. Любой результат, полученный экспериментально, имеет некоторую погрешность, и радиоуглеродные даты в этом отношении не составляют исключения. Поэтому типичная запись отсчета радиоуглеродных часов содержит ту или иную дату и погрешность ее определения, например: $T = (10\ 000 \pm 70)$ лет.

Такая запись означает, что истинное значение возраста образца с достаточно большой вероятностью лежит в пределах от 9030 до 1070 лет.

Можно ли снизить погрешность радиоуглеродных измерений? Да, но при этом нужно иметь в виду следующее: при радиоуглеродном датировании приходится исследовать образцы, обладающие очень малой радиоактивностью. Между тем измерительное устройство чувствительно и к другим излучениям, например к космическому излучению и радиоактивному излучению окружающих предметов. Это постороннее, *фоновое* излучение примерно такое же, как и измеряемое. Уровень фона зависит от ряда причин и может несколько меняться. Поэтому для снижения погрешности измерений необходимо по возможности увеличить чувствительность прибора к измеряемому излучению и, наоборот, насколько это возможно, снизить его чувствительность к постороннему, фоновому, излучению.

Для того чтобы уменьшить фон, приемник излучения (т. е. счетчик) окружают массивной защитой, устроенной из нескольких тонн свинца и 80—100 кг ртути. Это снижает фон в 6—8 раз. Кроме того, с помощью специальной электронной схемы сигналы, воспринимаемые прибором, сортируют, отбирая и сосчитывая лишь те, которые имеют определенную характерную для радиоуглерода энергию. Таким образом, счет нужных сигналов ведется в определенном энергетическом «окне», а все сигналы, энергия которых больше его верхней границы и меньше его нижней границы, не сосчитываются. Следовательно, не регистрируется и значительная часть помех. Это позволяет снизить фон еще в несколько раз.

Наконец, производят временной отбор сигналов. Для этого вблизи от измеряемого образца ставят уже не один, а два счетчика, воспринимающих излучение. Затем с помощью специальной электронной схемы сосчитывают лишь те сигналы, которые появляются в обоих счетчиках одновременно. Помехи и шумы возникают нерегулярно и притом то в одном приемнике, то в другом, а сигналы от измеряемого образца возбуждают оба приемника одновременно. Поэтому такая схема позволяет почти без потерь сосчитать нужные сигналы и отсеять значительную часть ненужных. Все эти мероприятия позволяют снизить фон приблизительно в 20 раз.

Увеличение количества исследуемого вещества и увеличение длительности измерений также приводит к снижению погрешности результата измерений. При этом соответ-

ственно возрастают затраты труда и времени как на подготовку образцов, так и на их измерение. Однако если это диктуется характером решаемой задачи, то на это приходится идти, так как таким образом можно снизить погрешность датирования молодых образцов вплоть до 20—10 лет.

Чем определяется нижняя возрастная граница радиоуглеродного метода? Каким тысячелетием кончается циферблат радиоуглеродных часов? Оказывается, что ответы на эти вопросы совсем не тривиальные; более того, по существу, имеются две нижние возрастные границы.

Рассмотрим, почему это происходит. Если после отмирания дерево пролежит в земле около 50 000 лет, то содержание в нем радиоуглерода снижается в сотни раз. В таком образце остаточная активность радиоуглерода оказывается намного меньше фона. При этом даже тогда, когда длительность измерений доведена до нескольких суток, погрешность результата все же составляет несколько тысяч лет. Для более древних образцов погрешность оказывается еще больше и из-за малой точности измерения теряют смысл. Этим и определяется *техническая* нижняя возрастная граница радиоуглеродного метода. Технической границей она нами названа потому, что в конечном счете ее величина определяется уровнем техники измерений. В настоящее время в большинстве радиоуглеродных лабораторий она составляет 40—50 тысяч лет.

Техническую нижнюю возрастную границу можно отодвинуть увеличением количества измеряемого образца, затягиванием длительности измерений или изотопным обогащением (например, путем термодиффузии). Все эти пути учеными уже испробованы и оказались пригодными, по очень трудоемкими. Используя их, удалось датировать отдельные древние образцы вплоть до 70 000 лет.

При решении некоторых важных научных проблем трудности и длительность работы отступают на второй план и существенной считается лишь принципиальная возможность решения задачи. Поэтому так важно ответить на вопрос о том, до какого предела можно довести нижнюю возрастную границу радиоуглеродного метода.

Обычно при определении абсолютного возраста радиоуглеродным методом учитывают лишь тот ^{14}C , который попал в организм из внешней среды, и, следуя Либби, считают, что после отмирания организма в нем имеет место лишь распад этого радиоактивного углерода (радиоуглерода).

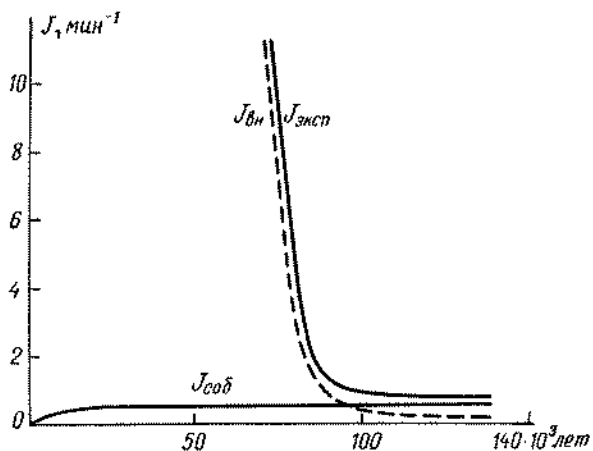


Рис. 47. Изменение активности углерода в образце с течением времени: $J_{вн}$ — активность углерода, полученного из внешней среды, $J_{соб}$ — «собственная» активность, $J_{эксп}$ — экспериментальная активность углерода

Однако организмы (растения, животные) и сами содержат азот, а в сфере их обитания, т. е. у поверхности Земли, есть нейтроны. Отсюда следует, что внутри организмов при их жизни и после отмирания тоже образуется радиоуглерод.

Назовем ^{14}C , поглощенный организмом при его жизни из атмосферы, внешним радиоуглеродом, а тот ^{14}C , который образуется в самом организме как при его жизни, так и после отмирания, — собственным радиоуглеродом. Полагая, что уменьшение внешнего радиоуглерода в образце происходит по экспоненциальному закону (рис. 47, штриховая кривая $J_{вн}$) и наряду с этим имеет место накопление в нем собственного радиоуглерода (рис. 47, $J_{соб}$), мы неизбежно приходим к тому, что их сумма с течением времени изменяется по закону, отличному от экспоненциального (рис. 47, $J_{эксп}$). Отсюда ясно, что третье положение, сформулированное Либби, о том, что в образцах уменьшение удельной активности углерода происходит по экспоненциальному закону, т. е. в геометрической прогрессии, не может считаться точным.

Между тем при определении абсолютного возраста измеряется именно это — суммарное (или экспериментальное) значение удельной активности углерода образца. Легко понять, что если при этом не учитывается накопление собст-

венного радиоуглерода, то найденное значение абсолютного возраста оказывается фиктивным.

Сколь велика совершаемая при этом ошибка? Она столь большая, что этот эффект нужно всегда учитывать, или столь малая, что им в любом случае можно пренебречь? Произведя соответствующие расчеты, Ф. С. Завельский показал, что абсолютный возраст образцов, определенный радиоуглеродным методом без учета образования в нем собственного радиоуглерода, действительно отличается от истинного. Однако для образцов, возраст которых меньше 50 000 и даже 70 000 лет, это различие столь малое, что им можно пренебречь. Это заключение наглядно демонстрирует рис. 47, на котором видно, что тогда, когда возраст образца составляет 70 000 лет, остаточная активность внешнего радиоуглерода ($J_{вн}$) в 20 с лишним раз больше активности собственного радиоуглерода ($J_{соб}$). Даже тогда, когда возраст образца равен 80 000 лет, $J_{вн}$ в 5—6 раз больше, чем $J_{соб}$. Соответственно для образцов, возраст которых составляет около 80 000 лет, поправка на собственный радиоуглерод составляет около 1500 лет, или 2 %. Для образцов, возраст которых больше 90 000 лет, поправка на собственный радиоуглерод резко возрастает и достигает сначала десятков, а потом и сотен процентов *).

Теперь можно ответить на поставленные ранее вопросы. Разрабатывая в 40-е годы нашего века физические основы радиоуглеродного метода, В. Ф. Либби располагал измерительными приборами, которые позволяли определять абсолютный возраст образцов примерно до 20—30 тысяч лет. Имея дело с образцами не старше этого возраста, он был вполне прав, утверждая, что в них уменьшение удельной активности углерода с течением времени происходит по экспоненциальному закону.

И. Арнольд в 1954 г. уже упоминает о возможности образования радиоуглерода в самом образце, а Е. Олсон в 1963 г. оценивает влияние этого эффекта на отсчет радиоуглеродных часов и приходит к заключению о том, что в количественном отношении он несуществен. Учитывая уровень измерительной техники тех лет, такое заключение можно считать более или менее правильным. Между тем в настоящее время техническая верхняя возрастная граница радиоуглеродного метода уже поднята до 50—70 тысяч лет и ставится вопрос о ее дальнейшем повышении.

*) Завельский Ф. С. Еще одно уточнение радиоуглеродного метода // ДАН СССР. Сер. геол.—1968.— Т. 180, № 5.

Из изложенного видно, что при датировании образцов, возраст которых больше 80—90 тысяч лет, кроме усовершенствования измерительной техники требуется также введение поправки на собственный радиоуглерод.

Для того чтобы узнать эту поправку, нужно определить содержание азота в образце и интенсивность нейтронного излучения грунта, в котором в течение десятков тысяч лет лежал образец. Однако в течение столь длительного хранения образца уровень нейтронного излучения грунта мог меняться. Понятно, что вследствие этого поправка определяется очень неточно. Поэтому когда в образце остаточная активность внешнего радиоуглерода становится меньше активности собственного радиоуглерода, то абсолютный возраст, определенный радиоуглеродным методом, становится неопределенным. Это обстоятельство кладет уже не технический, а *принципиальный* нижний возрастной предел увеличению отсчета тысячелетий радиоуглеродными часами.

Этот предел зависит от содержания азота в образце и от уровня нейтронного излучения грунта. Для разных образцов она несколько различна и в среднем составляет около 100—120 тысяч лет.

Некоторые применения радиоуглеродных часов. Датирование почв и теоретические модели круговорота углерода

Большое количество определений абсолютного возраста радиоуглеродным методом было проделано для образцов, взятых с торфяников. Их возраст ставился в соответствие с хронологией, основанной на исследовании пыльцы и спор древних растений. В общем, было получено достаточно полное соответствие между определением возраста по радиоактивному углероду и пыльцевому методу.

Остатки угля дали возможность с помощью радиоуглеродного метода датировать культурный слой пещеры Ласко (Франция), стены которой были покрыты доисторической живописью. Возраст этого слоя был определен в $(15\ 500 \pm 900)$ лет. Таким образом, археологам были даны важные опорные даты.

Исследованию радиоуглеродным методом подверглись остатки древесного угля, найденные в доисторической стоянке человека, раковины, употреблявшиеся в качестве ук-

рашей и доисторическими людьми, содержание желудка древнего животного и т. п.

Радиоуглеродным методом были исследованы образцы, взятые при раскопке отбросов, накопившихся против Храма Солида в Перу. Возраст этих отбросов (раковин, веревок, циновок, остатков животных) на разной глубине оказался различным — от нескольких сот до десятков тысяч лет. Соответствующая датировка являлась весьма важной при археологических исследованиях.

В Палестине около Мертвого моря были найдены свитки Библии (книга Исайи). Радиоуглеродный анализ верхней обертки свитка показал возраст (1917 ± 200) лет.

Советские исследователи нашли на Таймыре довольно хорошо сохранившийся во льду труп мамонта. Для исследования его возраста радиоуглеродным методом были взяты сухожилия животного. В результате измерений относительного содержания радиоуглерода выяснилось, что мамонт пролежал во льдах Таймыра около 12 тысяч лет.

Десять с лишним лет назад антропологи были изрядно смущены находкой остатков пильтдаунского человека. Найденные череп и челюсть имели ряд признаков, взрывающих установившиеся представления об эволюции человека. Когда же с помощью радиоуглеродного метода определили абсолютный возраст этих находок и он оказался равным всего лишь около 500 лет, то стало ясно, что имела место мистификация или, если угодно, шутка.

В Северном Ираке была открыта Шанидарская пещера, в которой люди обитали в течение примерно 100 000 лет. Раскопки этой пещеры описаны Ральфом Солецким. Вскрывая в этой пещере слой за слоем, ученые анализировали найденные предметы и определяли абсолютный возраст находок. В верхнем слое были обнаружены остатки общественных очагов, каменные ступки, остатки домашних животных. Этот слой охватывает время от современного до некоторой эпохи каменного века, а по радиоуглеродным часам оказалось, что его нижняя часть отстоит от нас на 7000 лет.

Во втором слое были найдены хорошо отточенные наконечники копий, костяные шила для шитья, куски графита с выгравированными на них рисунками, кучи раковин улиток. Возраст из этого слоя был по радиоуглероду определен в 12 000 лет. Это средний каменный век. Находки позволили установить, как человек того времени жил, охотился, что ел и каким было его искусство.

Третий слой, тоже датированный радиоуглеродными часами, во времени занимал промежуток от 29 до 34 тысяч лет. Это древний каменный век. В этом слое были найдены различные кремневые орудия.

В самом нижнем, четвертом слое пещеры, простирающемся на глубину от 5 до 14 м вплоть до коренных пород, ученые нашли остатки давно вымершего неандертальского человека и его примитивные орудия. Радиоуглеродным методом возраст низа этого слоя не определялся. По ряду соображений ученые посчитали, что он составляет около 100 000 лет.

Эти примеры (а число их можно было бы значительно увеличить) показывают, где и как работают радиоуглеродные часы и сколь интересно и важно отодвинуть еще дальше их нижнюю возрастную границу.

В настоящее время радиоуглеродный метод определения абсолютного возраста уже широко применяется в различных археологических и геологических исследованиях и при построении соответствующих шкал времени является опорным.

Тем не менее, когда исследователи занялись радиоуглеродным датированием почв, то полученные результаты потрясли их. Обнаружился большой разброс дат, значительная зависимость их величины от метода подготовки и обработки проб, наконец, все даты, как правило, оказывались намного меньше, «моложе» того, что ожидалось.

Естественно было предположить, что результаты искажены различными загрязнениями; тем более, что наличие их было очевидным. Ведь в образцах почв обычно обнаруживаются корни живых растений. Их наличие резко искажает радиоуглеродный возраст и тем сильнее, чем древнее почва. Однако когда этот вид погрешности удалось исключить (путем тщательной механической и химической обработки проб, центрифугирования и т. д.), то искажения стали меньше, но не исчезли.

В то время как по этим вопросам шла острая теоретическая дискуссия, несколько исследователей сумели найти и отобрать синхронные пробы почвы и древесного угля, т. е. такие, истинный возраст которых был одинаковым, или по крайней мере очень близким друг к другу. При этом оказалось, что радиоуглеродный возраст почв в 1,5—2 раза меньше радиоуглеродного возраста древесного угля, который в данном случае играл роль реперной метки абсолютного возраста. В ФРГ, Израиле и СССР удалось найти такое сочетание условий, при котором одна и та же почва в

данном месте существует и развивается нормально, а в соседнем перекрыта наносом и, таким образом, отгорожена от внешних влияний, законсервирована. Радиоуглеродное датирование таких почвенных «близицов», у которых часть их существования шла в разных условиях, показало различие их возраста в 1,8—2,2 раза (1).

В чем же дело? Этот вопрос задали себе многие ученые в разных странах мира. Каждый из них располагал примерно теми же исходными данными для размышлений, что и другие. Однако ответили они на него очень по-разному.

Несколько ученых пришли к заключению, что радиоуглеродный метод для датирования почв непригоден. Это решение было радикальным, но неправильным, и другие ученые с ним не согласились.

Академик И. П. Герасимов предложил учесть, что органическое вещество современных почв состоит из биологически активной и биологически инертной частей, и указал на то, что радиоуглеродное датирование почв по биологически активному углероду характеризует скорость биологического круговорота вещества в почвах, а радиоуглеродное датирование по биологически инертному углероду дает абсолютный возраст почвы. Эта концепция указывает подход к пониманию механизма протекающих в почве процессов.

На основании этой концепции следующий шаг к решению задачи о правильном радиоуглеродном датировании почв был сделан Ф. С. Завельским *) путем построения теоретических моделей круговорота углерода в почвах. При этом было учтено несколько следующих довольно очевидных обстоятельств: радиоуглеродный метод датирования органических материалов в своем традиционном варианте основан на том, что во время своей жизни организм обменивается углеродом с внешней средой, а после отмирания организма его углеродный обмен с внешней средой прекращается. Таким образом, оставшееся от данного организма вещество в отношении углеродного обмена считается *закрытой системой*, в которой изменение удельной активности углерода с течением времени происходит только вследствие радиоактивного распада.

Строго говоря, ни один органический материал, используемый для радиоуглеродного датирования, не является в

*) Завельский Ф. С. Радиоуглеродное датирование и теоретические модели круговорота углерода в почвах // Изв. АН СССР. Сер. географ.— 1975.— № 1.

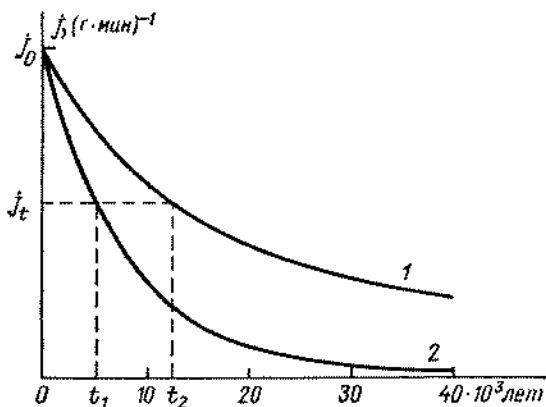


Рис. 48. Изменение удельной активности углерода в образце с течением времени по открытой (1) и закрытой (2) системам; j_0 и j_t — начальная и остаточная удельная активность углерода

отношении углеродного обмена вполне закрытой системой. Однако если принимаются соответствующие меры при отборе и обработке проб, учитываются некоторые побочные факторы и вводится ряд поправок, то древесину, древесный уголь и некоторые другие материалы все же правомочно рассматривать как *практически закрытые системы*.

Между тем в современных почвах в течение всего времени их существования происходят процессы образования органического вещества, переноса его из одного горизонта в другой, минерализации органического вещества и т. д. Таким образом, по самому своему существу *в отношении углеродного обмена современные почвы являются открытыми системами*. Поэтому для определения их календарного возраста обязательно нужно изменение в них удельной активности углерода с течением времени рассчитывать по открытой модели круговорота углерода (рис. 48, кривая 1, возраст t_2). Если же возраст почвы ошибочно определяется по формулам и кривой закрытой системы, то он оказывается фиктивно уменьшенным (рис. 48, кривая 2, возраст t_1).

Таким образом, построение соответствующих открытых моделей круговорота углерода в почвах позволяет определять их календарный возраст.

Такова одна из возможностей модельного подхода к почвам. Однако есть и другая, заключающаяся в контроле самих моделей. Если возраст почвы, найденный радиоуглеродным методом на основании данной модели, совпадает с ее календарным возрастом, найденным по историческим,

радиометрическим или иным данным, то это свидетельствует о том, что процессы, происходящие в реальной почве, более или менее адекватно описываются этой моделью. В противном случае испытываемая модель уточняется или отвергается и строится другая, которая подвергается таким же испытаниям, вплоть до создания модели достаточно достоверной.

Это путь совсем не легкий. Однако он ведет к созданию моделей в достаточной мере адекватных реальным процессам, происходящим в почвах. Не трудно увидеть, что такой подход ведет не только к более достоверному датированию почв, но и лучшему пониманию происходящих в них процессов.

Таким образом, измерение времени в сочетании с построением и использованием математических моделей различных систем оказывается довольно мощным методом исследования механизма ряда процессов, в том числе и протекающих в почвах.

Возраст горных пород, Земли и Луны

Резерфорд также прочитал лекцию при полном зале в Королевском Институте... Он смог... опровергнуть лорда Кельвина, считавшего, что прошлое и будущее Земли ограничивается несколькими сотнями миллионов лет.

Некоторые журналы приветствовали это крупными заголовками, сообщающими, что по Резерфорду Земля должна существовать на много миллионов лет больше по сравнению с оценками Кельвина, и писали: «судный день отложен».

В. Фаулер

Первые попытки определения возраста Земли

Когда на Земле возникла жизнь и каков возраст основных ее форм? Когда образовались моря и горы и сформировался лик Земли? Когда образовалась планета Земля?

Ответить на эти вопросы было очень заманчиво и очень трудно. Крупнейшие ученые взялись за решение этой задачи.

Какие часы пригодны для получения ответа на эти вопросы? Очевидно, лишь такие, работа которых основана на процессах, длящихся от глубокой древности до наших дней и протекающих с известной скоростью.

Первые попытки определения возраста Земли были сделаны более двухсот лет назад. В 1715 г. астроном Эдмунд Галлей определил возраст Земли с помощью метода, который можно было бы назвать «солевыми часами». Этот метод основан на том, что моря и океаны в период их образования были пресными, а ныне стали солеными потому, что реки на своем пути к ним вымывали из горных пород различные соли. При круговороте воды, при ее испарении из океанов и морей, соль оставалась в них и год за годом, тысячелетие за тысячелетием накапливалась. Таким образом, если знать, сколько соли ежегодно все реки приносят в океаны, и измерить, сколько соли в них уже накопилось, то можно определить возраст океанов. Проведя соответствующие расчеты и учтя, что Земля старше океанов, образовавшихся лишь на определенном этапе ее развития, Эдмунд Галлей нашел, что возраст Земли равен 90—350 миллионам лет.

Впрочем, эти цифры довольно сомнительны как вследствие трудности определения количества соли, приносимой реками, так и из-за отсутствия уверенности в том, что и в отдаленные эпохи истории Земли скорость выноса солей была такой же, как и сейчас. Более того, из-за захвата солей осадочными породами и поступления их от вулканических источников можно заведомо сказать, что скорость выноса солей была неравномерной. Следовательно, результаты, которые дает этот метод, неточны и неоднозначны.

Второй метод Э. Галлея, предназначенный для определения возраста Земли, в некоторой мере аналогичен песочным часам. Этот метод основан на определении толщины осадков, намываемых реками. Количество мелкого осадка, который некоторые реки выносят в море, составляет громадную величину, исчисляемую миллионами и сотнями миллионов кубических метров в год. Так, например, Хуанхе (Желтая река, Китай) выносит в океан столько мелких частичек песка и гумуса, что вода на значительной площади около ее устья становится мутной; эта часть Тихого океана и называется Желтым морем.

В спокойной воде морей и озер муль речной воды осажается, и на их дне, слой за слоем, постепенно нарастает осадок. Под давлением вышележащих слоев этот осадок все более уплотняется, образуя с течением времени твердые породы: известняки, песчаники, сланцеватые глины и т. д. По данным сейсмологии толщина земной коры составляет около 100 км. Если считать, что для намывания слоя толщиной в 1 м требуется от 3 до 10 тысяч лет, то возраст земной коры оказывается равным 300—1000 миллионам лет. Продолжительность существования Земли, разумеется, больше этого возраста.

Этот метод более надежен, чем предыдущий, однако и здесь вовсе нет уверенности в том, что в давние времена скорость осаждения пород была такой же, как и сейчас. Таким образом, ни первый, ни второй методы Э. Галлея не дают достаточно достоверного решения задачи об измерении очень больших промежутков времени.

Значительно более надежной основой для построения шкалы геологического времени является эволюция фауны и флоры. В течение тысячелетий, миллионов и сотен миллионов лет одни виды растений и животных сменяли другие, а их остатки откладывались в земле. Ныне по этим остаткам геологи определяют возраст различных пород. Этот метод построения шкалы времени является относительным. Последовательность геологических событий он выявляет до-

вольно хорошо. Однако так как в прошлом происходили различные местные изменения среды обитания растений и животных, то шкала времени, основанная на их эволюции, все же является не очень точной.

Между тем самые ранние формы жизни появились на Земле лишь на определенном этапе ее развития, около миллиарда лет назад. Датирование геологических событий, происходивших на Земле до появления на ней жизни, приходится делать уже иными методами. В этой области истории Земли, охватывающей несколько миллиардов лет, геологи отсчитывают время по определенным крупным геологическим процессам, например по образованию некоторых типов горных пород, складчатых структур и т. д. Такой метод тоже является относительным, он дает хорошую ориентацию в последовательности геологических событий, однако еще не дает возможности достаточно точно определить, сколько миллионов или миллиардов лет назад эти события произошли.

Какие же часы могут служить для надежного определения возраста Земли и Луны?

Радиоактивные часы для отсчета миллионов и миллиардов лет

Для измерения очень больших промежутков времени исследователи воспользовались различными радиоактивными методами. Однако при этом обнаружились серьезные трудности, связанные с определением начала отсчета и учетом различных искажений. Понадобилось много труда и выдумки для преодоления этих трудностей (полностью не устраненных до сих пор). Рассмотрим несколько основных типов таких часов, их возможности и особенности, а также отдельные результаты, полученные с их помощью.

Уран-гелиевые и уран-свинцовые часы. Напомним, что нижняя граница радиоуглеродного метода не превышает 100 000 лет. Между тем для целого ряда задач геологии, палеогеографии и астрофизики необходимо расширить циферблат абсолютных часов вплоть до миллионов и миллиардов лет. Для этой цели были использованы достаточно долгоживущие радиоактивные изотопы, например уран-238 с периодом полураспада 4,51 миллиарда лет, актиноуран-235 (0,71 миллиарда лет), калий-40 (1,3 миллиарда лет) и ряд других.

Уран является рассеянным элементом, но отнюдь не редким и в небольших количествах обнаруживается во многих горных породах. Кроме того, у него есть долгоживущие изотопы. Таким образом, по этим двум показателям он является вполне удобным для датирования горных пород. Затруднение заключается в том, что неизвестно начальное содержание урана в образцах. Поэтому, обнаружив уран в пробе и измерив его количество или активность, еще нельзя определить возраст образца.

Известно, что на Земле уран не образуется в настоящее время и не образовывался в прошлом. Для этого на ней нет и не было подходящих условий. Таким образом, тот уран, который на ней есть, является первозданным, т. е. полученным ею вместе с тем веществом, из которого она сформировалась. В период образования на Земле минералов этот уран в том или ином виде вошел в состав некоторых из них. При радиоактивном распаде урана, входящего в состав того или иного минерала, продукты распада урана обычно остаются внутри минерала. Именно это обстоятельство и было использовано учеными для отсчета времени.

В самом деле, если мы не знаем начального содержания урана в образце, но измерили, сколько в нем его сейчас, знаем скорость его распада и определили, какое количество его успело распасться с момента образования минерала, то этого достаточно для определения возраста данного образца.

Для того чтобы определить то количество урана, которое распалось с момента образования минерала, потребовалось изучить всю цепь последовательных распадов дочерних продуктов урана. Уран-238 ($^{238}_{92}\text{U}$) является родоначальником одного из радиоактивных семейств. Распадаясь, он испускает α -частицу и с периодом полураспада 4,51 миллиарда лет превращается в торий-234. Торий-234 в свою очередь распадается и с периодом полураспада 24,1 дня, испуская β -частицу, превращается в протактиний-234. Далее следует ряд распадов и превращений, сопровождающихся испусканием α - и β -частиц, и, наконец, получается стабильный изотоп: свинец-206. На рис. 49 цепь распадов представлена в виде ломаной линии, причем каждый сдвиг влево обозначает α -распад, а сдвиг вправо — β -распад. Всего во время этих распадов, пока уран-238 превращается в свинец-206, испускается восемь α -частиц и шесть β -частиц.

В некоторой мере аналогично протекает распад и в двух других радиоактивных семействах. Торий-232 ($^{232}_{90}\text{Th}$) после шести α - и четырех β -распадов превращается в стабильный

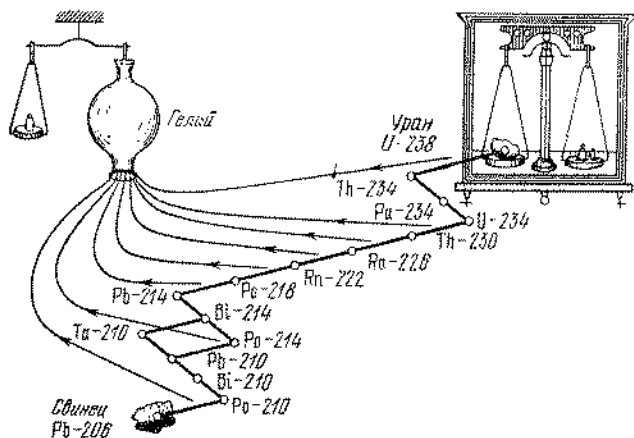


Рис. 49. Схема уран-гелиевого метода определения абсолютного возраста горных пород

свинец-208. Актиноуран-235 ($^{235}_{92}\text{AcU}$) после семи α - и четырех β -распадов превращается в стабильный свинец-207.

Обычный или естественный свинец представляет собой смесь нескольких изотопов свинца: ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , являющихся дочерними продуктами соответствующих радиоактивных семейств. Такие изотопы называют *радиогенными*. Кроме того, в естественном свинце содержится и нерадиоактивный его изотоп ^{204}Pb . Напомним, что α -частица представляет собой ядро атома гелия (^4_2He). После вылета из ядра она довольно быстро замедляется, захватывает два электрона и таким образом превращается в обычный нейтральный атом гелия.

В 1905 г. Эрнст Резерфорд предложил для определения абсолютного возраста горных пород использовать радиоактивный распад урана и образование гелия. Соответствующие вычисления показали, что из 1 кг урана через 100 миллионов лет получается 13 г свинца и 2 г гелия. Через 2 миллиарда лет в породе, первоначально содержащей 1 кг урана, накапливается 225 г свинца и 35 г гелия. Через 4 миллиарда лет вследствие распада материнского продукта в породе, первоначально содержащей 1 кг урана, накапливается 400 г свинца и 60 г гелия, а урана остается только 0,5 кг. Таким образом, определив содержание в образце остаточного урана и накопившегося гелия, можно вычислить абсолютный возраст образца. При этом уже не требуется знать начальное содержание урана. Метод пригоден для

определения возраста горных пород порядка миллионов и миллиардов лет.

Содержание урана в пробе можно определить без большого труда и с достаточной точностью. Для определения содержания гелия кусок горной породы дробят в порошок, растворяют в кислоте и затем продолжительное время кипятят. Это позволяет извлечь гелий из образца. Измерения производятся объемным анализом или методом изотопного разбавления.

Насколько уран-гелиевый метод точен и достоверен? Содержание урана в образце определяется с приемлемой точностью. Количественное определение гелия оказывается несколько более затруднительным, однако тоже производится с достаточной точностью. Основным источником погрешности этого метода является утечка гелия в течение тех сотен миллионов и миллиардов лет, когда еще лежит в земле тот кусок горной породы, который в дальнейшем будет отобран ученым и назван образцом. Дело даже не в том, что иногда эта утечка оказывается значительной, а в том, что она неизвестна и не поддается контролю и учету. Именно поэтому этот метод в ряде случаев давал совершенно причудливые результаты и в конце концов был оставлен.

В 1907 г. Б. Болтвуд указал на то, что для определения возраста минералов можно воспользоваться накоплением в них радиогенного свинца. Таковую возможность представляет, например, пара ^{238}U — ^{206}Pb . При этом начальное содержание урана в образце неизвестно, однако знания его современного содержания, скорости распада и количества накопившегося стабильного свинца-206 оказывается достаточно для определения промежутка времени, протекшего от периода кристаллизации минерала до момента измерения. Этот вариант уран-свинцового метода очень похож на изложенный ранее уран-гелиевый метод и в значительной мере наделен теми же недостатками и поэтому имеет малую точность и достоверность. Широкого применения этот метод не получил. Между тем в результате работ ряда ученых выяснилось, что в уран-свинцовом методе определения абсолютного возраста имеются дополнительные возможности повышения точности и достоверности результатов измерений. Дело в том, что многие горные породы одновременно содержат уран-238, актиноуран-235, торий-232, а также их дочерние продукты, в том числе свинец-206, свинец-207 и свинец-208. Таким образом, открывается возможность определения абсолютного возраста данного об-

разца горной породы по двум или трем различным парам изотопов, например: ^{238}U — ^{206}Pb , ^{235}U — ^{207}Pb , ^{232}Th — ^{208}Pb . Такая возможность, разумеется, была использована.

Если указанные пары изотопов дают совпадающие значения абсолютного возраста образца, то результаты измерений можно считать вполне достоверными. В самом деле, чрезвычайно мало вероятно, чтобы близкое совпадение двух, а в особенности трех значений, найденных, по существу, различными методами, оказалось случайным.

Однако указанная методика имеет и серьезные неудобства. На практике из-за различного рода искажений полного совпадения абсолютного возраста, определенного по разным парам изотопов, обычно не получается. Какую же из найденных дат считать более правильной? Нужно ли в случае расхождения датировок отвергнуть все?

В 1956 г. Г. В. Везерилл разработал методику, с помощью которой эти трудности были в значительной мере преодолены. В ее основе лежит следующая идея: на основании того, что периоды полураспада ^{238}U , ^{235}U и всех дочерних продуктов известны, для различных промежутков времени рассчитывается накопление их конечных дочерних продуктов: стабильного свинца-206 и стабильного свинца-207. Далее для ряда значений возраста определяются отношения $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Затем строится график, в котором по оси абсцисс откладываются отношения масс изотопов $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, а по оси ординат $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. На этот график наносятся ряд точек, соответствующих различным значениям абсолютного возраста и соответственно разным изотопным отношениям масс изотопов свинца и урана (рис. 50). Соединив эти точки плавной линией, получают кривую, названную *конкордией* (согласием).

При построении этой кривой считается, что системы ^{238}U — ^{206}Pb и ^{235}U — ^{207}Pb являются закрытыми, т. е. предполагается, что в минерале во время его пребывания в грунте не было ни утечки, ни привноса свинца и урана. Кроме того, при построении этой кривой заранее вводятся поправки на содержание в пробе малых примесей первозданных изотопов свинца. Таким образом, эта кривая соответствует чистому, или идеальному, случаю.

Экспериментатор, определив соответствующими измерениями содержание в образце изотопов урана и свинца и введя поправку на примесь первозданных изотопов свинца, находит реальные отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Затем точку, соответствующую этим значениям, он наносит на график рис. 50. Если эта точка ложится на кривую конкор-

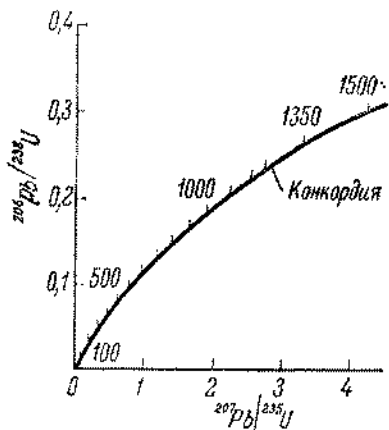


Рис. 50. Кривая конкордантных возрастов. По осям отложены отношения изотопов, а на кривой указан соответствующий им возраст образца в миллионах лет

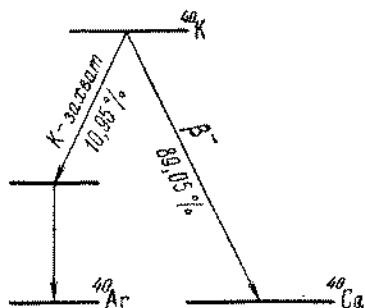


Рис. 51. Схема радиоактивного распада ^{40}K

дин, то поправки введены правильно, а утечки или привноса изотопов либо не было, либо они для исследуемых изотопов были одинаковыми. Если точка не ложится на кривую, то очевидно, что имеет место нарушение указанных выше условий и нужно искать причину этого. Таким образом, экспериментальная точка на рис. 50 показывает не только абсолютный возраст образца, но и степень достоверности его определения.

Приобретая таким образом значительно большую точность и достоверность этот усовершенствованный уран-свинцовый метод в дальнейшем получил широкое распространение и был успешно использован для многих важных исследований.

Калий-аргоновые часы. Калий довольно широко распространен в природе и входит в состав многих минералов. Естественная смесь изотопов калия состоит из двух стабильных его изотопов: ^{39}K (93,08 %) и ^{41}K (6,91 %), а также радиоактивного изотопа ^{40}K (0,0119 %). Период полураспада ^{40}K равен $1,31 \cdot 10^9$ лет. Поэтому его удобно использовать для измерения больших промежутков времени.

Радиоактивный распад ^{40}K происходит по разветвленной схеме и приводит к образованию двух различных стабильных изотопов. В результате β -распада образуется кальций-40, а в результате K-захвата — аргон-40 (рис. 51). Для того чтобы этот процесс использовать в качестве радиоактивных часов, нужно измерить содержание в образце

^{40}K и хотя бы одного из его дочерних продуктов. Какого же именно?

Во многих минералах содержится кальций. В естественной смеси изотопов кальция относительное содержание ^{40}Ca составляет 99,60 %. Таким образом, если в минерале наряду с калием содержится первозданный кальций, то добавка радиогенного ^{40}Ca за счет радиоактивного распада ^{40}K оказывается относительно небольшой. Поэтому количественное определение радиогенного ^{40}Ca получается очень не точным.

При распаде ^{40}K аргона образуется приблизительно в 10 раз меньше, чем кальция, однако обычно он не входит в состав минералов. Поэтому количественное определение радиогенного ^{40}Ar оказывается более точным, чем ^{40}Ca . Впрочем, возможно проникновение в тот или иной минерал небольшого количества воздушного аргона. Ведь в воздухе аргона достаточно много: около 1 %. К счастью, имеется способ определения содержания в образце этого постороннего аргона. Этот способ требует очень тонких измерений, но зато дает достаточно точные и надежные результаты. Он основан на том, что атмосферный аргон состоит из вполне определенной смеси изотопов: ^{36}Ar (0,337 %), ^{38}Ar (0,063 %) и ^{40}Ar (99,60 %). Разумеется, когда в пробу проникает воздушный аргон, то в ней оказываются все три эти изотопа.

Следовательно, определив содержание в пробе ^{36}Ar , можно сказать, сколько в нее проникло воздушного аргона, в том числе ^{40}Ar . Определив в дальнейшем содержание в образце ^{40}K и ^{40}Ar , из найденного количества аргона-40 исключают атмосферный аргон-40, а абсолютный возраст определяют из отношения количества радиогенного ^{40}Ar к количеству ^{40}K .

Таким образом, повторяется схема предыдущего типа радиоактивных часов, когда известно современное содержание материнского продукта, скорость его распада и измеряется количество накопившегося дочернего вещества. Ранее мы уже видели, что этого достаточно для определения абсолютного возраста, который в данном случае отсчитывается от эпохи кристаллизации минерала до момента измерения.

В настоящее время разработан ряд методов количественного определения этих изотопов. Погрешность соответствующих измерений составляет доли процента. Это дает возможность определять абсолютный возраст древних горных пород, равный сотням миллионов и миллиардам лет,

с погрешностью до десятков и даже единиц миллионов лет.

Очень важным и в то же время очень трудным является отсчет с помощью калий-аргоновых часов возраста молодых горных пород. Очень важным потому, что от этого зависит решение целого ряда существенных вопросов истории Земли, например, связанных с молодым вулканизмом, с первыми этапами развития жизни и т. д. Очень трудным потому, что для этого требуется измерять очень малое количество аргона-40 с чрезвычайно высокой точностью.

Верхняя возрастная граница калий-аргоновых часов еще недавно равнялась нескольким миллионам лет. Между тем техническая нижняя возрастная граница радиоуглеродных часов дотянута лишь до 60—70 тысяч лет, а принципиальная лежит около 100 тысяч лет. Таким образом, между нижней возрастной границей радиоуглеродных часов и верхней калий-аргоновых часов была довольно большая область, куда тянулись и не дотягивались руки ученых.

В недавнее время проникнуть в эту область все же удалось. В 1957 г. И. Ф. Эвериденом, Г. Куртисом и Р. В. Кистлером был определен абсолютный возраст некоторых вулканитов в интервале 1000—100 тысяч лет. В 1961 г. другая группа ученых использовала калий-аргоновые часы для определения абсолютного возраста найденных останков синантропа — нижнелейстоценового человекообразного существа. В 1965 г. Е. И. Гамильтон писал: «При дальнейшем улучшении аппаратуры станет возможным прямое сравнение между радиоуглеродным и калий-аргоновым методами». Ныне это уже удалось сделать.

Точность и достоверность показаний калий-аргоновых часов в значительной мере зависит от того, насколько правильно и полно учтены потери радиогенного аргона в процессе хранения образца в естественных условиях и при обработке пробы, а также добавка ^{40}Ar за счет проникновения в образец воздушного аргона. Эти вопросы в настоящее время достаточно полно изучены и разработаны способы учета и исключения различных искажений.

В Советском Союзе калий-аргоновый метод определения абсолютного возраста был развит Э. К. Герлингом и др. В последние годы им и его сотрудниками получены интересные результаты, связанные с определением возраста древнейших горных пород Земли.

Рубидий-стронциевые часы. Рубидий — довольно распространенный элемент, и содержащие его минералы встречаются во многих горных породах. Поэтому приме-

нение рубидий-стронциевого метода измерения времени во многих случаях оказывается очень удобным. Точность и достоверность результатов, получаемых с помощью рубидий-стронциевых часов, в значительной мере зависит от выполнения указанных выше требований. Многочисленные исследования показали, что в отношении рубидия и стронция большинство горных пород ведет себя как закрытые системы, если только не имеет места переплавление пород или прорыв в них расплавов других пород. Если же такие процессы имели место, то, разумеется, рубидий-стронциевый возраст будет относиться именно к этим периодам метаморфизма пород.

Естественный (природный) рубидий состоит в основном из двух изотопов: стабильного ^{86}Rb (72,15 %) и радиоактивного ^{87}Rb (27,85 %). Период полураспада рубидия-87 равен 47 миллиардам лет. Поэтому рубидий-стронциевые часы удобны для измерения больших промежутков времени.

При радиоактивном распаде рубидий-87 испускает β -частицу и превращается в стабильный стронций-87. Таким образом, для того чтобы этими часами определить промежуток времени от эпохи кристаллизации или метаморфизма минерала до настоящего момента, нужно измерить содержание в нем материнского изотопа рубидия-87 и дочернего продукта стронция-87. Кроме того, для того чтобы учесть содержание в исследуемом минерале стронция-87 нерадиогенного происхождения, нужно измерить количество других его изотопов (^{86}Sr , ^{88}Sr). По содержанию этих изотопов вычисляют количество нерадиогенного стронция-87 и затем в расчеты вводят соответствующую поправку.

В ряде работ абсолютный возраст одного и того же образца определялся разными методами, например: рубидий-стронциевым, калий-аргоновым, уран-свинцовым. Такое сопоставление в случае сходимости результатов между собой придает им большую достоверность. В настоящее время с помощью рубидий-стронциевых часов успешно и с хорошей точностью определен абсолютный возраст многих горных пород и различного типа метеоритов.

Трековые часы. Рассмотрим еще один очень интересный и важный вид радиоактивных часов для отсчета абсолютного возраста. Работа этих часов основана на том, что ядра некоторых тяжелых элементов, например урана, наряду с обычным радиоактивным распадом иногда самопроизвольно разваливаются на две приблизительно равные части, которые разлетаются в стороны с очень большой скоростью и ог-

ромной энергией (около 200 МэВ на один акт деления). Такой процесс назван ядерным делением.

Самопроизвольное ядерное деление обнаружено лишь у самых тяжелых элементов, причем и у них оно происходит крайне редко. Постоянная самопроизвольного деления урана-238 приблизительно равна $7 \cdot 10^{-17}$ год⁻¹. Таким образом, нужно около 10^{16} лет для того, чтобы половина имевшегося в начале вещества распалась в результате деления. Напомним, что при обычном радиоактивном распаде урана-238, сопровождающемся излучением α -частиц, половина его распадается за 4,5 миллиарда лет. Следовательно, в уране-238 на каждые два с лишним миллиона обычных α -распадов происходит лишь один акт самопроизвольного деления.

Поскольку этот процесс происходит равномерно и его можно четко выделить среди других, а скорость его протекания известна, то он может быть использован в качестве еще одного типа радиоактивных часов.

Уран вовсе не является редким элементом. Он довольно широко распространен в природе. Атомы урана в виде малой примеси вкраплены во многие различные минералы. При делении осколки ядер урана внедряются в минерал и на своем очень коротком пути в нем (всего несколько микрометров) разрушают кристаллы минерала. Следы этих миниатюрных взрывов называют треками, а метод измерения промежутков времени, основанный на подсчете числа актов самопроизвольного деления, — *трековыми часами*.

Для реализации этой идеи нужно определить в образце содержание урана, число образовавшихся треков, а также нуль-пункт, т. е. момент начала отсчета.

Оказалось, что при нагревании минералов, образовавшиеся в них треки заплывают и исчезают, причем в различных минералах это происходит при разной температуре, например в аргоните — вблизи 150 °С, в кальците — вблизи 400 °С, в кварцевом стекле — вблизи 700 °С, а в кварце — вблизи 1000—1100 °С. Накопление треков происходит после образования соответствующего минерала. Однако его трековая история стирается и начинается снова после прогрева до соответствующей температуры. Все это открывает различные и специфические возможности исследования интервалов времени этим методом.

Для подсчета числа уже совершившихся актов самопроизвольного деления урана в образце делается срез и шлиф. После его травления треки становятся хорошо видимыми в обычный микроскоп и число их подсчитывается глазом.

Содержание урана в образце определяется путем облучения его в ядерном реакторе потоком нейтронов и последующего подсчета числа вновь образовавшихся треков от вынужденного деления урана.

Таким образом, по крайней мере пока, этот метод в своей значительной части не автоматизирован и счет числа треков ведется не приборами, а глазами. Однако возможности этого метода обширны и интересны. Этот метод уже дал много важных результатов. Расскажем об одном из них, может быть, и не столь существенном для науки, но довольно наглядном.

Однажды археолог, раскапывая пещеру, нашёл в ней древний нож, сделанный из обсидиана (вулканического стекла). Лезвие этого ножа было оплавлено...

Когда-то, может быть тысячи лет назад, в пещере горел костер, а у костра сидело несколько мужчин и женщин. Вспыхнула ссора. Мелькнул нож. Кто-то с хрипом упал и разжавшись пальцы уронил нож на горячие угли... Впрочем, может быть, все было намного проще: владелец этого затупившегося ножа, решив, что проще сделать новый, чем исправлять тупой, сам швырнул его в костер.

Впрочем, исследователей интересовала не психология, а история: они хотели знать, когда горел этот костер?

На оплавленной части обсидианового ножа вся уран-трековая предыстория была стерта нагреванием. Трековый отсчет времени пошел снова тогда, когда костер погас. Число образовавшихся в единице объема треков равно

$$n = {}^{238}\text{Pu} \gamma,$$

где ${}^{238}\text{Pu}$ — содержание урана в объекте, γ — постоянная самопроизвольного деления урана-238. Определив соответствующие величины, исследователи нашли, что костер горел 3700 ± 900 лет назад.

Относительно большая погрешность результата датирования в данном случае связана с очень невыгодными условиями измерений. Период спонтанного деления урана очень велик, а измеряемый промежуток времени по сравнению с ним очень мал. При определении этим методом больших промежутков времени относительная погрешность результатов получается значительно меньше.

Таким образом, в настоящее время имеется довольно большой набор разнообразных методов геохронологии. В зависимости от характера решаемых задач, типа образцов и их возраста имеется возможность выбрать тот или иной.

Возраст горных пород, метеоритов и Земли

В XX веке для определения возраста Земли были применены различные виды радиоактивных часов. В основе этих определений лежит довольно простое и очевидное предположение о том, что земные горные породы сформировались на раннем этапе существования Земли, и, таким образом, возраст Земли несколько больше самых древних из них. Так, например, в работе А. Холмса по геохронологии Африки даны значения абсолютного возраста горных пород, определенного различными методами. Приведем некоторые из них: возраст галенита из Южной Родезии *) оказался равным 2,17 миллиарда лет, галенита из Западного Трансвааля — 2,30 миллиарда лет, моноцита из Южной Родезии — 2,6 миллиарда лет, галенита из Кокошо (Конго) — около 3,3 миллиарда лет.

В последние годы на нескольких континентах обнаружены крупные блоки древнейших пород, абсолютный возраст которых превышает 3 миллиарда лет. Например, в СССР на Украине в районе Днепропетровска была обнаружена порода, возраст которой составляет 3,2 миллиарда лет; на Кольском полуострове, в районе реки Воронойей — порода, имеющая абсолютный возраст 3,6 миллиарда лет. В. Р. Мак Грегор показал, что граниты из округа Готхоб (Западная Гренландия) имеют абсолютный возраст 3,70—3,75 миллиарда лет. Недавно было показано, что абсолютный возраст одной из древнейших горных пород Антарктиды (эндербитов) достигает $3,9 \pm 0,3$ миллиарда лет.

Возраст наиболее старых из известных нам земных минералов, разумеется, еще не является возрастом Земли. Однако земная кора не может быть моложе эпохи образования минералов, кристаллизовавшихся на определенном этапе ее развития. Таким образом, датирование древнейших минералов позволило установить, что абсолютный возраст земной коры — больше 4 миллиардов лет.

При датировании очень древних пород уран-свинцовым методом большое значение имеет возможно более точное знание первоначального изотопного состава свинца. Как же его определить? Один из способов основан на измерении изотопного состава свинца в рудах, очень бедных ураном и торием. Понятно, что в таких рудах примесь радиогенного свинца тоже будет небольшой.

Другой метод определения первоначального изотопного

*) С 1980 г. Зимбабве. (Примеч. ред.)

состава свинца построен на анализе образцов, возраст которых определен каким-нибудь другим методом. Знание возраста образца и содержания в нем урана и тория позволяет вычислить количество накопившегося радиогенного свинца, а сравнение с реальным содержанием дает возможность найти избыток отдельных изотопов. Этот избыток как раз и дает первоначальный изотопный состав свинца в данном образце.

Третий и наиболее совершенный метод определения первоначального состава свинца основан на исследовании изотопного состава метеоритов. В отличие от земных горных пород метеориты, прежде чем попасть на Землю, долгое время вели уединенное существование, препятствовавшее их загрязнению. Действительно, в железных метеоритах изотопные отношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ по сравнению с земными породами имеют наименьшие значения. Таким образом, оказалось, что для определения возраста Земли удобно воспользоваться «небесными камнями».

Напомним, что попадающие к нам на Землю метеориты бывают разной величины, различного химического и минералогического составов. Еще недавно их природа была совершенно не ясной, а появление окружалось различными легендами. Недаром на одном из метеоритов (упавшем 7 ноября 1942 г. в городе Энгисгейме на Верхнем Рейне) была сделана надпись: «Об этом камне многие знают много, каждый — что-нибудь, но никто не знает достаточно».

Ныне уже десятки метеоритов тщательно изучены, определен их химический и изотопный составы, радиоактивность и т. д. Эти исследования делают довольно достоверным предположение о том, что метеориты образовались в астероидном поясе нашей Солнечной системы путем дробления более крупных тел, возможно, некоей промежуточной планеты. Ряд исследований изотопного состава метеоритов показал, что *время формирования метеоритов и время формирования земной коры приблизительно совпадают*. Этот вывод очень важен. Ведь в метеоритах отсутствовали многие вторичные процессы, с которыми приходится считаться при определении абсолютного возраста земных горных пород. Поэтому, несмотря на некоторые специфические измерительные трудности, их возраст может быть определен с хорошей точностью и достоверностью.

В 1955—1956 гг. К. Паттерсон с сотрудниками определили уран-свинцовым методом абсолютный возраст большой группы метеоритов, а также ряда материалов земного происхождения. На основании этих, а также ряда других

исследований наиболее достоверным значением промежутка времени, отделяющего нас от периода формирования земной коры, считается значение $(4,55 \pm 0,07)$ миллиарда лет. Ряд соображений приводит к тому, что земная кора сформировалась приблизительно на 10^8 лет позже исходных метеоритных тел. Таким образом, по современным данным возраст Земли составляет $(4,6 \pm 0,1)$ миллиарда лет.

Возраст Луны

Каков возраст Луны? Еще недавно для ответа на этот вопрос можно было прибегнуть лишь к более или менее спекулятивным рассуждениям о происхождении Солнечной системы, Земли, Луны и планет. Ныне, после полета на Луну и возвращения с нее советских автоматических станций и американских ракет с астронавтами на борту, положение стало совсем иным. Ведь эти космические корабли доставили на Землю образцы лунных пород.

В июле 1968 г. пилотируемая людьми ракета «Аполлон-11» (США) доставила на Землю около 28 кг лунных пород. В сентябре 1970 г. автоматическая станция «Луна-16» (СССР) доставила на Землю около 100 г лунного грунта. В дальнейшем обе эти программы успешно продолжались. В декабре 1972 г. пилотируемый людьми «Аполлон-17» доставил на Землю около 113 кг лунных пород, отобранных в разных местах, а автоматическая станция «Луна-24» (август 1976 г., СССР) пробурила на Луне скважину глубиной около 2 м и доставила на Землю колонку отобранного из нее грунта. Понятно, что отбор такой колонки представляет особый интерес, так как позволяет изучить различные породы, а также их связь и развитие.

Добытые таким образом образцы лунных пород были исследованы несколькими группами ученых. По Б. Бова: «Возраст большинства этих пород составляет от 3 до 3,5 миллиарда лет. А возраст одного образца № 15415, привезенного экспедицией «Аполлона-15», оценен в 4,15 миллиарда лет. Это самый старый кусок мира, который когда-либо человек держал в руках. Он получил название «первородного образца». Если считать, что на формирование стабильной коры при затвердевании Луны ушло около миллиарда лет, то первородный образец убедительно доказывает, что возраст Луны, как и Земли, лежит в пределах от 4,5 до 5,5 миллиарда лет» *).

*) Бова Б. Новая астрономия.— М.: Мир, 1976.

Профессором Д. Вассербургом было показано, что возраст лунных камней составляет в среднем 3,65 миллиарда лет, а лунного мелкозернистого материала — 4,6 миллиарда лет *). Эти данные тем более интересны, что в настоящее время существует несколько гипотез происхождения Луны. Довольно близкое совпадение возраста наиболее древних пород Луны с возрастом наиболее древних земных пород является важным аргументом в пользу теории одновременного, а может быть, и совместного формирования Земли и Луны.

Возраст Солнечной системы должен быть больше промежутка времени, прошедшего от периода формирования Земли, на то время, которое потребовалось для конденсации Солнца. По оценке В. А. Фаулера этот процесс по космическим масштабам времени был, по-видимому, не очень длительным и составлял около 0,1 миллиарда лет. Таким образом, по Фаулеру возраст Солнечной системы равен $(4,7 \pm 0,1)$ миллиарда лет.

*) Каттерфельд Г., Шульц С. Породы лунных морей // Наука и жизнь.— 1971.— № 2.— С. 65.

Сколько лет Солнцу и звездам

Звезды светят; этот самый простой наблюдательный факт немедленно приводит к заключению, что они должны эволюционировать.

Р. Л. Сирс, Р. Р. Браунли

Как велика энергия Солнца и звезд

Можно ли определить возраст Солнца и других звезд? В состоянии ли мы узнать, старше Солнце, чем Земля, моложе ее или является ее сверстником? Всегда ли были Солнце и звезды такими же, как сейчас, всегда ли будут такими же? Были ли они горячее, станут ли холоднее? Меняются ли Солнце и звезды с течением времени? Развиваются ли они или всегда остаются неизменными?

Сколь долго излучают Солнце и другие звезды? Сколь долго они еще будут излучать?

Для ответа на все эти вопросы был использован энергетический подход. Очевидно, что если подсчитать запас энергии в Солнце и измерить скорость, с которой оно расходует энергию, то можно определить длительность его существования. Если определить, какую часть своего запаса энергии Солнце уже израсходовало, то можно сказать, сколь долго оно уже существует и сколько времени ему осталось существовать.

Сформулированную проблему можно уподобить такой задаче: в начальный момент в печке имеется A кг угля, который сгорает со скоростью v кг/ч. Если в настоящий момент в печи осталось угля B кг, то сколько времени печь уже горит и сколько времени будет еще гореть? Легко видеть, что задача с печью не сложная.

Увы, в отношении Солнца и звезд решение оказывается далеко не столь простым. Во-первых, нужно определить начальные и современные запасы энергии Солнца и звезд. Во-вторых, найти соответствующие скорости расхода энергии. Кроме того, нужно учесть, что в звездах есть несколько различных источников энергии. В зависимости от начальной массы и начального состава звезд в них протекают раз-

личные процессы и с разной скоростью. Наконец, масса, состав и состояние звезд по мере их старения все время меняются. При этом изменяются протекающие в них процессы и скорость, с которой они расходуют энергию.

Таким образом, для того чтобы ответить на поставленные в начале этой главы вопросы, нужно не только измерить ряд параметров небесных тел, но и понять, как происходит эволюция звезд. В настоящее время в решении этих вопросов достигнуты значительные успехи.

Какими средствами мы располагаем для исследования Солнца и звезд?

Солнце посылает нам тепло и свет или, выражаясь в научном отношении более строго, излучение различных видов, в том числе гамма- и рентгеновское излучение, видимый свет, радиоволны, а также нейтроны и нейтрино. Все заключения о строении Солнца, его возрасте, прошлом, настоящем и будущем нужно суметь сделать, исследуя это излучение.

Еще труднее определить возраст других звезд. Невооруженный человеческий глаз видит на небе лишь несколько тысяч самых ярких из них. Мощный современный телескоп в соединении с чувствительной фотографической пластинкой увеличивает число доступных наблюдению звезд до миллионов. Ничтожное количество электромагнитного излучения — вот все, что доходит к нам от звезд.

Достаточно ли этого для суждения об их свойствах, строении и возрасте? После того как были придуманы соответствующие методы исследования, оказалось возможным сказать: да, достаточно.

Самая близкая к нам звезда — это наше Солнце. Энергия Солнца проявляется во всем, что нас окружает. Жизнь и развитие растений тесно связаны с деятельностью Солнца. «Человек вправе величать себя сыном Солнца», — писал К. А. Тимирязев. «Пища только потому и является источником силы в нашем организме, — добавляет он, — что она не что иное, как консерв солнечных лучей».

В отдельных местах земного шара и поныне сохранились исполинские деревья... Ширина одного из них такова, что 30 человек должны взяться за руки, чтобы суметь охватить его у основания. Как известно, возраст дерева можно определить, подсчитав число колец на его срезе. Возраст одного из таких гигантов, недавно поваленного бурей, согласно подсчету числа колец на его срезе оказался равным нескольким тысячам лет. Каждое одиннадцатое кольцо этого дерева имеет несколько иную ширину, что соответ-

ствуется одиннадцатилетней периодичности пятен на Солнце. Кроме того, и это особенно интересно, на этом срезе можно видеть, что в продолжении тысячелетий кольца получались примерно одинаковые. Значит, за это время Солнце не изменилось и посылает на Землю одинаковое количество тепла и света.

Исследование развития жизни на Земле показывает, что уже несколько миллионов лет на ней живет человек, а органическая жизнь насчитывает более одного миллиарда лет. Между тем органическая жизнь, связанная с существованием сложных многоатомных молекулярных соединений, возможна только при определенных температурных условиях. Значит, уже по крайней мере миллиард лет Солнце излучает тепла и света приблизительно столько же, как и сейчас. Что касается имевших место на Земле периодов оледенения, то, по мнению ряда ученых, они объясняются не изменением интенсивности солнечного излучения, а изменением наклона земной оси или прохождением Солнечной системы через холодную туманность.

Земля перехватывает лишь около миллиардной части колоссального количества тепла и света, испускаемого солнечной поверхностью во все стороны, и эта часть обуславливает возможность жизни на Земле. Если расценить попадающую на Землю энергию Солнца всего по одной копейке за киловатт-час, то окажется, что Земля получает ее каждую секунду на полмиллиарда рублей. Есть звезды, излучающие в тысячи раз больше энергии, чем наше Солнце. К нам от них доходит так мало энергии лишь потому, что они расположены от нас очень далеко.

Откуда берется энергия Солнца и звезд

Откуда же берется эта колоссальная энергия Солнца, способного расходовать ее в течение огромного времени столь расточительно? Может быть, Солнце горит?

Если бы Солнце состояло из самого лучшего донецкого угля и получало бы для горения в достаточном количестве кислород, то оно при таком расходовании энергии сгорело бы за несколько тысяч лет. Но достаточного для горения количества кислорода Солнцу взять неоткуда, да и к тому же Солнце слишком горячо для того, чтобы оно могло гореть. Горение есть химическая реакция соединения с кислородом, а при таких высоких температурах, которые имеют место на Солнце, не может быть химических соединений.

Такое огромное расходование энергии Солнцем уже дав-

но обратило на себя внимание ученых. Первыми были предложены методы определения возраста Солнца, основанные на подсчете его энергетических ресурсов.

По предположениям Кельвина, первоначальный запас тепловой энергии Солнца был в 10—100 миллионов раз больше, чем то количество тепла, которое оно расходует ежегодно в настоящее время. Отсюда наибольший возраст Солнца получается равным 100—500 миллионам лет. Нужно отметить, что весь этот расчет имеет довольно приблизительный характер, а полученная величина по сравнению с современными данными дает значительно заниженный возраст Солнца.

По метеоритной гипотезе энергия Солнца поддерживается за счет падения на его поверхность метеоритов, энергия движения которых при ударе переходит в тепло. По расчету достаточно для этого число метеоритов оказывается таким большим, что вследствие их падения масса Солнца должна была бы заметно увеличиться. Между тем на самом деле этого не наблюдается. Кроме того, если бы энергия Солнца черпалась за счет энергии падающих метеоритов, то поверхность Солнца была бы горячее внутренних его частей. Это привело бы к бурному испарению вещества Солнца в пространстве, разрушению Солнца, что также не соответствует действительности. Таким образом, метеоритная гипотеза поддержания энергии Солнца оказывается несостоятельной.

Вследствие действия сил притяжения происходит постепенное сжатие Солнца, а при сжатии тела, как известно, нагреваются. В 1854 г. Г. Гельмгольцем была высказана так называемая контракционная гипотеза, согласно которой энергия Солнца обязана его сжатию. Однако расчеты показали, что если бы Солнце некогда было бесконечно большим, а затем сжалось до современных размеров, то и в этом случае энергии от его сжатия могло бы хватить для поддержания его энергетического расхода всего лишь на 50 миллионов лет. Этот возраст для Солнца ничтожно мал. Таким образом, очевидно, что одного сжатия для поддержания энергии Солнца недостаточно.

При естественном радиоактивном распаде различных веществ, например урана или радия, выделяется весьма значительная энергия. Один грамм радия за время его превращения в свинец излучает энергию, способную поднять 1 тонну на высоту 685 км. Некоторые ученые предлагали для объяснения источника энергии Солнца использовать естественный радиоактивный распад урана.

Однако по расчетам оказалось, что если бы источником энергии Солнца служил радиоактивный распад, то для поддержания своего современного расхода энергии Солнце должно было бы целиком состоять из урана. Между тем доказано, что Солнце на одну треть по массе состоит из водорода, гелия содержит еще больше, а тяжелых элементов на Солнце относительно немного. Другие звезды тоже содержат относительно небольшое число тяжелых элементов.

Естественный радиоактивный распад урана происходит медленно и независимо от внешних условий, между тем как интенсивность излучения звезд весьма сильно зависит от температуры в их недрах. Существуют очень горячие звезды, излучающие в десятки тысяч раз больше нашего Солнца.

Следовательно, ни баланс энергии звезд, ни зависимость их излучения от температуры не соответствуют предположению о поддержании энергии за счет естественного радиоактивного распада. Поэтому предположение о том, что источником энергии Солнца и звезд является естественный радиоактивный распад урана или других радиоактивных веществ, также оказывается несостоятельным.

Итак, мы видим, что ни сжатие Солнца, ни падение на него метеоритов, ни одна из химических реакций (например, сгорание угля), ни естественный радиоактивный распад урана или других радиоактивных веществ не в состоянии объяснить происхождение энергетических ресурсов Солнца. Доказательство этого является определенным успехом, хотя и негативным. Ведь если мы что-нибудь ищем, знание того, где не нужно искать, облегчает поиски.

В чем же разгадка происхождения энергетических ресурсов Солнца и звезд?

В течение последних десятилетий ученые открыли и изучили сначала теоретически, а затем и практически, совершенно новый класс источников энергии — ядерные реакции. Оказалось, что два типа этих реакций обладают огромной теплотворной способностью и являются «цепными», т. е. способными сами себя поддерживать. Одна из них основана на делении тяжелых элементов, например урана. Другая реакция, так называемая термоядерная, основана на синтезе легких элементов, например гелия из водорода.

В технике качество горючего принято оценивать по его теплоте сгорания. Удельной теплотой сгорания называют количество теплоты, которое получается при сгорании 1 кг данного вида топлива. Так, например, удельная теплота сгорания пороха равна 5000 ккал/кг, угля — 7000—7500 ккал/кг. Во время ядерной реакции деления урана

выделяется $75 \cdot 10^9$ ккал на 1 кг прореагировавшего урана. При термоядерной реакции синтеза гелия из водорода выделяется $150 \cdot 10^9$ ккал на 1 кг прореагировавшего водорода, что в $20 \cdot 10^6$ раз больше удельной теплоты сгорания угля.

По своей теплоте сгорания эти реакции могли бы служить для поддержания энергетических ресурсов звезд. Посмотрим, могут ли они иметь место в действительности.

Солнце и звезды в основном состоят из легких элементов — водорода, гелия и некоторых других, а тяжелых элементов в них очень мало. Таким образом, в отношении наличия «горючего» звездные условия соответствуют протеканию термоядерных реакций синтеза.

Процесс развития звезды в настоящее время представляется следующим образом: вначале огромное темное газовое скопление медленно сжимается под действием сил тяготения. По мере сжатия скопления температура и давление в его недрах все более увеличиваются — создаются условия для интенсивного протекания ядерных реакций. Когда разгораются ядерные реакции синтеза вещества, то выделяется огромная энергия и температура скопления резко увеличивается. При этом скопление становится самосветящимся, т. е. рождается как звезда. В этом процессе первоначальное сжатие небесного тела играет роль «запуска» ядерного источника энергии звезды.

В различных звездах имеют место различные ядерные реакции, а в одной и той же звезде в процессе ее развития одни ядерные реакции сменяют другие. Сначала идет реакция «сгорания» дейтерия. При этом температура звезды увеличивается, давление внутри нее повышается и сжатие звезды замедляется или приостанавливается вплоть до выгорания дейтерия. Следующим этапом эволюции звезды является развитие в ней ядерных реакций синтеза гелия из водорода. Именно эти ядерные реакции имеют основное энергетическое значение для нашего Солнца и многих других звезд. При их протекании четыре ядра атомов водорода путем ряда последовательных превращений образуют ядро атома гелия. Таким образом, в огромных и мощных «нечах», работающих в недрах Солнца и звезд, «топливом» служит водород, а в результате его «сгорания» получается гелий.

После того как значительная часть водорода будет израсходована и, таким образом, этот источник энергии исчерпан, звезда снова сжимается, а температура вещества в ее недрах и его плотность еще более увеличиваются. Это еще один кардинальный этап в жизни звезды. Теперь в ней начинает протекать реакция синтеза гелия, приводящая к

образованию еще более тяжелых элементов. Средний молекулярный вес вещества звезды увеличивается. Она становится менее прозрачной. Температура ее недр еще более повышается, а ее оболочка разбухает. При этом звезда превращается в красный гигант.

На этом эволюция звезд не заканчивается. Так как на всех предыдущих этапах своей жизни они щедро разбрасывали частицы и излучение, то с течением времени масса их уменьшается, а состав изменяется. Большинство из них превращается в небольшие, очень плотные и слабо светящиеся космические тела — так называемые «карлики».

В нашем Солнце, как мы уже говорили, протекает реакция синтеза гелия из водорода, и оно находится где-то около середины этого этапа своего существования. Таким образом, для того чтобы определить его возраст, нужно измерить относительное содержание в нем водорода и гелия.

Как это сделать?

Определение состава и возраста Солнца и звезд

На первый взгляд может показаться, что для определения состава Солнца или звезды необходимо добыть хотя бы немного их вещества. Однако это не так. Состав того или иного небесного тела можно определить, наблюдая с помощью специальных приборов приходящий к нам от него свет. Этот метод называется спектральным анализом и имеет большое значение в астрономии.

Суть этого метода можно уяснить следующим образом. Поставим перед электрической лампой непрозрачную преграду с узкой щелью, за щелью — стеклянную призму, а несколько поодаль — белый экран. В электрической лампе светится накаленная твердая металлическая нить. Вырезанный щелью узкий пучок белого света, пройдя сквозь призму, разлагается на составные цвета и дает на экране красивое цветное изображение, состоящее из участков различного цвета, непрерывно переходящих друг в друга, — это так называемый непрерывный световой спектр, похожий на радуго. Вид спектра накаленного твердого тела зависит не от его состава, а только от температуры тела.

Иное положение имеет место при свечении веществ в газообразном состоянии. При свечении газов каждый из них светится особым, только ему одному свойственным светом. При разложении этого света с помощью призмы получается

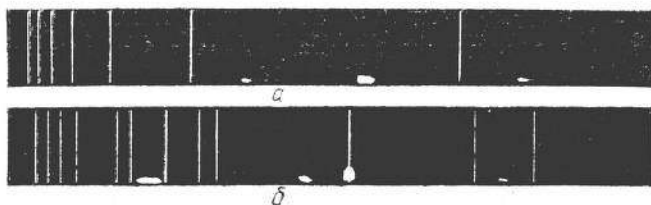


Рис. 52. Линейчатые спектры водорода (а) и гелия (б)

набор цветных линий, или линейчатый спектр, характерный для каждого данного газа (рис. 52). Таково, например, свечение неона, аргона и других веществ в газоразрядных трубках, или так называемых лампах холодного света.

Спектральный анализ основан на том, что каждое данное вещество можно отличить от всех остальных по спектру его излучения. При спектральном анализе смеси нескольких веществ по относительной яркости отдельных свойственных каждому веществу линий можно определить относительное содержание той или иной примеси. При этом точность измерений такова, что позволяет определить наличие малой примеси, даже если она составляет всего одну стотысячную долю от общего количества вещества. Таким образом, спектральный анализ является не только качественным, но и точным количественным методом исследования состава смеси.

Направляя на небо телескопы, астрономы исследуют характер движения звезд и состав излучаемого ими света. По характеру движения небесных тел определяют размеры звезд, их массу и т. д. По составу света, излучаемого небесными телами, с помощью спектрального анализа определяется химический состав звезд. Относительное содержание водорода и гелия в исследуемой звезде определяется путем сравнения яркости спектров этих веществ.

Поскольку развитие звезды сопровождается непрерывным превращением внутри нее водорода в гелий, то чем старше звезда, тем меньше в ее составе водорода и больше гелия. Знание их относительного содержания позволяет вычислить возраст звезды. Однако этот расчет совсем не прост, потому что в процессе эволюции звезд их состав изменяется, а масса уменьшается. Между тем скорость, с которой в звезде идет превращение водорода в гелий, зависит от ее массы и состава. Более того, в зависимости от начальной массы и начального состава эти изменения протекают с разной скоростью и несколько различными путями. Таким образом, для того чтобы правильно определить возраст

звезды по наблюдаемым величинам — светимости, массе и составу, нужно в некоторой мере восстановить историю звезды. Именно это делает все расчеты довольно сложными, а их результат не очень точным.

Тем не менее для многих звезд соответствующие измерения и расчеты были произведены. По данным А. Б. Северного в Солнце содержится водорода 38 %, гелия 59 %, остальных элементов 3 %, в том числе углерода и азота около 1 %. В 1960 г. Д. Ламбер на основании данных о массе, светимости и составе Солнца, а также детальных расчетов предполагаемой его эволюции получил значение возраста Солнца, равное $12 \cdot 10^9$ лет.

При изучении истории развития небесных тел нет ни необходимости, ни возможности следить за какой-нибудь одной звездой от ее рождения до ее старости. Вместо этого можно изучить много звезд, находящихся на различных этапах своего развития. В результате таких исследований удалось выяснить не только настоящее, но также прошлое и будущее звезд и, в частности, нашего Солнца.

Вначале Солнце очень расточительно тратило массу и энергию и сравнительно быстро перешло к своему современному состоянию, характеризующемуся более спокойным и ровным существованием, при котором происходят лишь крайне медленные изменения его светимости, температуры и массы. В этом уже «зрелом» возрасте Солнце просуществует еще много миллиардов лет.

Затем вследствие накопления большого количества гелия прозрачность Солнца уменьшится и соответственно уменьшится его теплоотдача. Это приведет к еще большему разогреванию Солнца. К этому времени запасы водородного «горючего» в Солнце почти иссякнут, поэтому после сравнительно непродолжительного разгорания Солнца начнется относительно быстрое его угасание. Впрочем, все это случится с нашим Солнцем не скоро, не меньше чем через десяток миллиардов лет.

Встречаются такие звезды, в которых содержание водорода много больше, чем в нашем Солнце, а также и такие, в которых водорода очень мало. В. А. Амбарцумян, Б. А. Воронцов-Вельяминов и Б. В. Кукаркин показали, что в Галактике имеются молодые звезды, например ряд сверхгигантов, возраст которых не превышает всего одного или десяти миллионов лет, а также и старые звезды, возраст которых много больше возраста нашего Солнца.

Наша Галактика представляет собой гигантское скопление звезд, связанных между собой силами притяжения

и таким образом объединенных в общую систему. Расстояния, отделяющие нас от Солнца и других звезд, огромны. Поэтому для их измерения астрономы ввели специфические единицы длины. Расстояние от Земли до Солнца получило название: *астрономическая единица длины*. Как известно, 1 а. е. = 149,6 млн. км. Расстояние, которое свет проходит за один год, называется *световым годом*: 1 св. год = $9,46 \times 10^{13}$ км $\approx 10^{13}$ км. Расстояние, на котором радиус земной орбиты виден под углом в 1 секунду названо *секундным параллаксом* или сокращенно — *парсек* (пк). Таким образом, 1 пк = 3,26 св. года = $3,085 \cdot 10^{13}$ км.

Наша Галактика имеет форму очень плоского диска. В ней содержится около 10^{13} звезд. Солнце — одна из них. Вся эта система медленно вращается, однако не как твердое тело, а скорее как тело полужидкое, вязкое. Угловая скорость вращения Галактики убывает от ее центра к периферии так, что в 8 килопарсеках от центра период обращения составляет около 212 миллионов лет, а в районе Солнца, т. е. на расстоянии 10 килопарсеков от центра, — 275 млн. лет. Именно этот период обычно называют галактическим годом.

Очевидно, что возраст Галактики следует определять по самым старым из входящих в нее звезд. В 1961 г. Г. Арп исследовал ряд наиболее старых звезд. Для старейшего рассеянного скопления NGC 188 он получил значение возраста, равное $16 \cdot 10^9$ лет, а у одного из старейших шаровых скоплений M5 возраст оказался равным $20 \cdot 10^9$ лет. По оценкам Ф. Хойла и др. возраст некоторых близких к Солнцу звезд: δ Эридана и μ Геркулеса А, составляет $(10-15) \times 10^9$ лет.

В настоящее время возраст Галактики удалось определить и другими методами, и при этом получились несколько иные результаты. Рассмотрение этих методов и сравнение полученных с их помощью результатов представляет большой интерес и приведено далее.

Космохронология

Мы не только предполагаем, но уже знаем, что стадия расширения Вселенной длится много миллиардов лет и когда-то Вселенная была совсем другой, в ней не было ни галактик, ни квазаров, а существовали только плазма и излучение с высокой температурой.

В. Л. Гинзбург

Возраст тяжелых элементов

Элементы тяжелее свинца, например торий, уран и т. д., принято называть тяжелыми. Определение возраста тяжелых элементов представляет в высшей степени интересную задачу, потому что ее решение приближает нас к пониманию строения мира и его развития. Суть дела заключается в том, что в настоящее время ни на Земле, ни на Солнце нет условий для образования тяжелых элементов, в то же время эти вещества на них есть и с течением времени количество их убывает в результате радиоактивного распада. Значит, некогда они образовались. Когда, где и как? В результате единого акта или многих? Шло ли их образование непрерывно или прерывисто?

По Г. Гамову и др. образование тяжелых элементов произошло следующим образом: некогда существовало грандиозное скопление вещества — илема, в недрах которого произошел взрыв. В результате этого взрыва развились огромные температура и давление. При этом очень бурно протекали ядерные реакции, которые и привели к синтезу различных, в том числе и тяжелых элементов. Взрыв был относительно кратковременным, и поэтому вызванное им быстрое расширение скопления привело к охлаждению вещества. Таким образом, синтез элементов был прерван и полученный состав вещества зафиксирован.

Если недра скопления уподобить «кипящему котлу», заполненному илемом, то взрыв, создав сверхвысокие давления и температуру, относительно быстро «сварил» этот илем так, что получились элементы разной атомной массы,

а затем разорвал «котел» и разбросал «сварившееся» в нем вещество.

По другой теории, развитой Дж. Бербиджем и др., образование различных элементов происходит в недрах некоторых звезд в результате восьми типов ядерных процессов. Легкие элементы образуются при температуре в десятки миллионов градусов и плотности около 10^4 г/см³, тяжелые — при температуре в несколько миллиардов градусов и плотности, доходящей до 10^{11} г/см³. По Ф. Хойлу и Дж. Бербиджу столь высокая температура и плотность создаются в недрах сверхновых звезд при их катастрофическом сжатии и последующем взрыве. По Ф. Хойлу, В. Фаулеру и др. *) образование тяжелых элементов происходит в сверхновых звездах путем серии последовательных и быстрых захватов нейтронов. Как известно, атомные ядра состоят из нейтронов и протонов и оказываются устойчивыми лишь при определенном соотношении между числом тех и других. Легкие ядра наиболее устойчивы, когда число нейтронов равно числу протонов, тяжелые — при некотором избытке нейтронов. Если при последовательных захватах нейтронов образуется большой их избыток, то ядра оказываются неустойчивыми к β -распаду, при котором нейтрон внутри ядра превращается в протон и испускаются электрон и антинейтрино. Таким образом, при β -распаде атомный номер изотопа увеличивается и его ядро может захватить и удержать еще один или несколько нейтронов. Предполагается, что так, т. е. путем последовательного захвата нейтронов, создаются различные изотопы вплоть до самых тяжелых: урана, тория и заураиновых элементов.

Во время вспышки сверхновая звезда не только производит тяжелые элементы, но и щедро разбрасывает их во все стороны. Наше Солнце, Земля и те тела, из которых образовались метеориты, в свое время получили некоторую порцию этих тяжелых элементов. В Галактике вспышки сверхновых звезд происходят приблизительно один раз в сто лет. Таким образом, Солнце и Солнечная система при своем зарождении и формировании могли получить тяжелые элементы от одной или нескольких сверхновых звезд. Задача определения возраста тяжелых элементов сводится к нахождению промежутка времени, отделяющего нас от этих космических событий.

*) Фаулер В. А. Резерфорд и ядерная космохронология // Современные проблемы ядерной физики. — М.: Атомиздат, 1963.

Для получения ответа на этот вопрос были использованы изотопы урана ^{235}U и ^{238}U . Периоды их полураспада и современное отношение масс этих изотопов было измерено. Если бы еще было известно и начальное отношение масс этих изотопов, то этого было бы достаточно для определения промежутка времени, отделяющего нас от периода их образования. В начале нашего века Э. Резерфорд для определения возраста тяжелых элементов воспользовался известными тогда (не совсем точными) значениями периодов полураспада ^{235}U и ^{238}U , а также современного отношения их масс в естественной смеси изотопов урана. При этом он предположил, что начальные массы этих изотопов были одинаковыми. Рассчитанный им на основании этого предположения промежуток времени, который требуется для того, чтобы отношение масс $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ снизилось от начального (равного единице) до современного, составил 3,4 миллиарда лет. Таким образом, эта величина оказалась меньше возраста Земли! Подстановка современных (достаточно точных и достоверных) значений периодов полураспада изотопов урана и отношения масс изотопов $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ не очень сильно изменила полученный Резерфордом результат.

В этом расчете наиболее уязвимым местом является предположение о равенстве начальных масс ^{235}U и ^{238}U . Р. Фаулер отказался от него и предложил оригинальный метод определения начального отношения масс изотопов урана, основанный на довольно простой и почти очевидной идее. Согласно этой идее масса того или иного тяжелого изотопа, образующегося в сверхновой звезде при нейтронном синтезе, зависит не только от скоростей синтеза и распада этого изотопа, но и от скоростей образования и распада его прародителей и от их числа. В самом деле, если наряду с данным изотопом, например ^{238}U , образуются и более тяжелые, имеющие атомные массы, равные 242, 246 и т. д., которые при радиоактивном распаде превращаются в ^{238}U , то его масса увеличится, и тем значительно, чем больше таких прародителей.

Соответствующие расчеты показали, что *прародительский фактор* распространенности для урана-238 (включая непосредственное образование ^{238}U) составляет 3,1; для урана-235 он равен 6, а для тория-232 — 5,75. Далее было учтено, что скорость образования ядер с нечетными атомными массами и их стабильность несколько меньше, чем те же параметры четных ядер. Кроме того, были приняты во внимание и некоторые другие добавочные факторы, влияющие на распространенность изотопов. После того как все это

было сделано, Фаулер и Хойл получили, что относительная начальная распространенность изотопов урана и тория составляет: $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = ^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 1,65 \pm 0,15$.

Для этих же изотопов в настоящее время отношения их распространенности равняются: $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,00723$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 3,8 \pm 0,3$. Так как периоды полураспада всех этих изотопов известны, то нетрудно найти, что 4,7 миллиарда лет назад, т. е. в период образования Солнечной системы, эти же отношения равнялись: для урана $0,37 \pm 0,03$, для тория $2,3 \pm 0,2$.

Для расчета промежутка времени, прошедшего от начала синтеза тяжелых элементов до периода образования Солнечной системы, используются соответствующие отношения масс изотопов (начальные и для 4,7 миллиарда лет), а также учитывается ряд добавочных факторов, таких, например, как влияние на эти отношения тяжелых элементов первоначального состава сверхновой звезды, т. е. ее состава до вспышки, выброс материи звездами в процессе их формирования, который несколько изменяет их состав, и т. д.

Расчеты, проведенные с поправками на эти добавочные факторы, дали по обоим отношениям (урановому и ториевому) одинаковые значения: $(7,7 \pm 2) \cdot 10^9$ лет. Таким образом, для начала ядерного синтеза в сверхновых звездах нашей Галактики получается возраст $(7,7 + 4,7) \cdot 10^9 = (12,4 \pm 2) \cdot 10^9$ лет.

В последнее десятилетие эти вопросы активно разрабатывались. Были уточнены прежние значения и исследовано еще несколько радиоактивных веществ. По ним был определен возраст наиболее древних элементов, который для пары уран—торий составил: $(2,4 + 4,7) \cdot 10^9 = 7,1 \cdot 10^9$ лет; для пары рений — осмий: $(3,5 + 4,7) \cdot 10^9 = 8,2 \cdot 10^9$ лет и т. д.

Однако этот промежуток времени еще не является возрастом Вселенной. Ведь до того, как та или иная звезда вспыхнула как сверхновая, произвела тяжелые элементы и выбросила их в космос, в частности и в ту его область, где формировалась наша Солнечная система, — до этого должна была образоваться и пройти некоторый путь развития сама сверхновая. Кроме того, скорее всего наша Солнечная система получила тяжелые элементы не от одной, а от многих сверхновых звезд. Между тем они взрывались на разных этапах развития Вселенной (и продолжают время от времени взрываться и в нашу эпоху). Нетрудно видеть, что для расчета возраста Вселенной важно знать, какова была частота взрывов сверхновых звезд: постоянной в течение всего времени существования Вселенной, более вы-

сокой на ранних или поздних этапах ее развития и т. д.

По Д. Шрамму *) учет всех этих вариантов дает значения возраста Вселенной в интервале от 7 до 15 миллиардов лет при наиболее вероятном его значении около 10 миллиардов лет. Насколько обоснован этот результат? Желанную ясность могут принести лишь новые факты и новые теории. О них мы и расскажем далее.

Модели мира

Рассмотренные ранее радиоактивные методы определения абсолютного возраста материалов органического и неорганического происхождения позволили ученым датировать важнейшие этапы развития Вселенной и таким образом углубить наше понимание протекающих в ней процессов. Так как соответствующие работы были выполнены современными учеными и к тому же жителями Земли, то в этих исследованиях отсчет времени ведется от современности назад, в глубь веков и тысячелетий, а объектами исследования являются этапы развития человеческой культуры, последовательность развития различных форм жизни на Земле, хронология формирования лика Земли, возраст Земли и Солнца.

В дальнейшем ученые вышли за пределы Земли и Солнечной системы. Используя те же радиоактивные методы, они определили возраст химических элементов, звезд и нашей Галактики. Однако наша Галактика является лишь одной из многих звездных систем, составляющих Вселенную. Ныне известно много небесных тел, имеющих примерно такую же структуру, как наша Галактика, а еще больше — значительно от нее отличающихся. За последнее столетие доступный нашим исследованиям мир необычайно расширился, а понимание его углубилось. При этом стало еще более ясно, сколь недостаточны наши знания о строении Вселенной. Между тем определение промежутков времени, отделяющих нас от важнейших этапов развития мира, является одним из существенных способов его изучения.

Для того чтобы понять, в каком мире мы живем: бесконечном или конечном, стационарном или нестационарном, ученые создали модели Вселенной, т. е. более или менее упрощенные ее схемы. Этих моделей было предложено

*) Шрамм Д. Возраст элементов // УФН.— 1976.— Т. 118.— № 4.

несколько. При этом физических идей оказалось достаточно для того, чтобы их построить, а астрофизических данных слишком мало для того, чтобы отдать решительное предпочтение какой-либо одной из них.

Все современные модели Вселенной построены на основе космологического уравнения Эйнштейна. Это уравнение содержит члены, характеризующие силы взаимодействия вещества, и члены, описывающие геометрию мира. В уравнение входит ряд параметров: средняя плотность вещества Вселенной; гравитационная постоянная, характеризующая силы притяжения; космологический член, который на языке классической механики можно интерпретировать как характеристику сил отталкивания, и др. Некоторые из них, например гравитационная постоянная, известны с достаточно хорошей точностью; другие, например средняя плотность вещества Вселенной, в настоящее время определены лишь приближенно. Между тем от их значения существенно зависит структура мира и характер его изменений с течением времени.

При построении любой модели неизбежно делаются допущения, упрощающие решение задачи: некоторые из характеристик модели классифицируются как главные и исследуются их изменения, другие характеристики с большим или меньшим на то основанием принимаются постоянными, третьи отбрасываются.

На основании имевшихся экспериментальных астрономических данных А. Эйнштейн посчитал, что Вселенная «в большом» однородна и изотропна, т. е. распределение в ней звезд и галактик таково, что средняя плотность вещества в больших ее участках, охватывающих многие галактики, одинакова и это справедливо для любых направлений.

В 1917 г. А. Эйнштейн и в 1916—1917 гг. В. де-Ситтер нашли такое решение космологического уравнения, которое отвечало условию стационарности Вселенной, т. е. неизменности в среднем всех основных ее параметров: массы, плотности и объема (разумеется, это не исключает всевозможных движений, совершающихся внутри такой системы). Объем и радиус R этой Вселенной постоянны, она не имеет ни начала, ни конца и должна существовать бесконечно долгое время (рис. 53а). Тогда эта точка зрения представлялась наиболее естественной.

Остановимся еще на одной особенности модели мира А. Эйнштейна. Согласно общей теории относительности все физические тела искривляют пространство, и тем больше, чем больше их масса; это искривление убывает с увеличе-

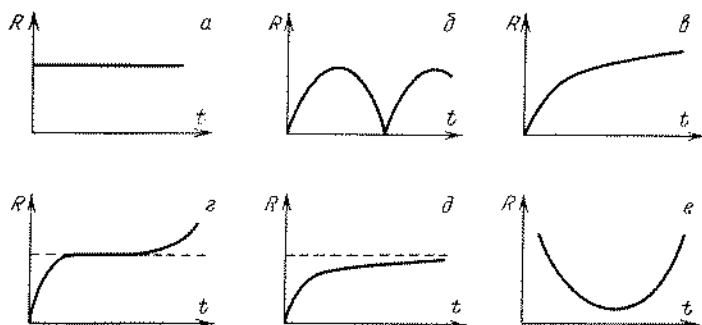


Рис. 53 Модели Вселенной: *a* — стационарный мир А. Эйнштейна, *b* — пульсирующий закрытый мир, *c* — открытый мир, который неограниченно расширяется, *d* — модель мира Г. Лемстра, *e* — модель мира, скорость расширения которого постепенно уменьшается, *f* — модель мира, который сначала сжимается, а затем расширяется

нием расстояния от соответствующего тела. Так, например, луч света от звезды, проходя вблизи Солнца, несколько искривляется. Как известно, этот эффект действительно наблюдается.

Для его наблюдения на фотографии звездного неба, сделанной во время солнечного затмения, выбирается звезда, изображение которой расположено вблизи диска Солнца, и определяется ее положение относительно других звезд, экспонированных на этой же фотопленке. Затем положение этой же звезды относительно других звезд определяется по фотоснимкам, сделанным при другом положении Солнца. Смещение изображения указанной звезды относительно других звезд как раз и характеризует искривление луча света.

Если в космосе длина пути электромагнитного сигнала (например, луча света) очень велика, то суммарное искривление его траектории тоже окажется большим. Из этого следует, что при некоторой длине пути в результате искривления луч света, описав гигантскую дугу, должен вернуться в ту же точку, из которой он вышел. Именно это расстояние и определяет размеры сферического стационарного мира А. Эйнштейна. Таким образом, этот мир замкнут, хотя у него нет границ, и любой сигнал, испущенный внутри него, не может выйти за его пределы.

Представить себе это положение удобнее всего с помощью аналогии, предложенной в свое время А. Эддингтоном. Если двумерный жучок может двигаться только по горизонталям, то на плоскости для него все естественно и, двигаясь все время в одном направлении, он может прийти

до ее границы (если она есть). Если же на этой плоскости есть возвышение, то двумерный жучок, дойдя до него, обнаружит кривизну своего пространства. В самом деле, идя все вперед и все по горизонтали, он в то же время свернет вбок, и звездочка, лежащая на его плоскости, которая светила прямо на него, теперь окажется справа или слева.

Оказавшись на поверхности шара и двигаясь все прямо и все вперед, двумерный жучок в конце концов придет в ту же точку, из которой он вышел, и отметит, что его пространство кривое, замкнутое, но не имеет границ. Сходным образом обстоит дело для трехмерных существ, живущих в трехмерном пространстве, имеющем положительную кривизну.

Таким образом, у стационарного замкнутого мира А. Эйнштейна нет границ в пространстве и времени, но существуют определенные размеры. При радиусе такой Вселенной, равном 10^{28} см, средняя плотность ее вещества должна быть равной 10^{-29} г/см³, а полная масса $2 \cdot 10^{56}$ г. Эта масса в 10^{23} раз больше массы Солнца и в 10^{12} раз больше массы нашей Галактики. Таким образом, стационарный мир А. Эйнштейна должен содержать около 10^{12} галактик.

Прошло лишь несколько лет со времени разработки этой модели — и стационарный мир А. Эйнштейна был подвергнут серьезной критике. В 1922 г. А. А. Фридман (1888—1925) проанализировал уравнение Эйнштейна и показал, что стационарный мир А. Эйнштейна является лишь частным решением космологического уравнения, а в более общем случае это уравнение приводит к моделям мира, изменяющимся с течением времени. А. А. Фридман дал *группу* решений уравнения А. Эйнштейна и получил при этом ряд различных моделей Вселенной. Рассматривая уравнения А. Эйнштейна с космологическим членом, равным нулю, т. е. без сил отталкивания, А. А. Фридман показал, что в этом случае получаются только нестационарные решения. Это означает, что фридмановские миры должны либо расширяться, либо сжиматься. При этом решающее значение для поведения мира имеет средняя плотность его вещества.

Если средняя плотность вещества больше некоторой величины, которую называют «критической плотностью», то мир сферичен и имеет положительную кривизну. Такой мир некогда должен был быть сверхплотным и занимать очень малый объем. Затем этот мир расширяется и достигает некоторого предельного объема, после чего начинается все убыстряющееся его сжатие, которое затем должно сменить

ся расширением. Это пульсирующий мир (рис. 53б). Так же как и стационарная модель А. Эйнштейна, этот мир является закрытым, так как, хотя у него и нет границ, его объем ограничен.

Если же средняя плотность вещества Вселенной меньше критической, то от некоторого сверхплотного состояния с малым объемом мир расширяется неограниченно (рис. 53в). Геометрия этой модели тоже неевклидова, т. е. пространство имеет кривизну. Однако в данном случае кривизна пространства отрицательная. Для того чтобы представить себе такое пространство, опять же удобно воспользоваться двумерной аналогией: в двумерном плоском мире положительную кривизну пространства можно представить как поверхность сферы, а отрицательную — как поверхность гиперболоида вращения. Согласно этой модели мир является открытым, с течением времени его объем неограниченно возрастает.

Рассмотрим еще несколько наиболее интересных моделей мира. В 1931 г. Г. Леметр предложил модель мира с космологическим слагаемым, не равным нулю. Напомним, что при некотором, специально подобранном значении этого космологического слагаемого он получил стационарную модель мира. По ряду соображений Леметр посчитал, что значение космологического слагаемого намного больше значения, принятого в свое время Эйнштейном. Такой выбор параметров модели привел к тому, что мир Леметра от начального сверхплотного состояния с малым объемом сначала быстро расширяется и достигает размеров стационарного мира Эйнштейна. Затем скорость расширения резко уменьшается и происходит почти что остановка расширения (рис. 53г), после чего скорость расширения снова увеличивается.

Не правда ли, какой причудливый мир? Однако есть ли у нас основания полагать, что наш мир такой, а не другой?

В 1932 г. А. Эйнштейн и В. де-Ситтер рассмотрели модель мира, в котором средняя плотность вещества равна критической, а космологический член равен нулю. Такой мир от начального сверхплотного состояния с малым объемом расширяется сначала быстро, а потом все медленнее и медленнее, так что радиус мира стремится к некоторому конечному значению (рис. 53д).

Выбрав некоторые другие значения тех же основных параметров, можно построить еще целый ряд моделей мира. Например, пульсирующий мир, сжимающийся от

конечного радиуса до некоторого минимального, а затем снова расширяющийся (рис. 53e), и т. д.

В каком же мире мы живем? Недостаточное знание некоторых основных параметров космологического уравнения (средней плотности вещества Вселенной и др.) пока еще не позволяет сделать однозначный выбор между различными моделями мира, между тем, как мы уже говорили, для каждой из них структура мира, характер его развития и возраст существенно различны. В одних моделях, например стационарной или пульсирующей, возраст мира бесконечен, в других — с начальным сверхплотным состоянием и различным образом расширяющихся — возраст мира имеет конечную величину, однако различную для разных моделей.

Таким образом, если бы удалось определить возраст нашего мира, то это дало бы возможность узнать, каков он. Точно так же, если бы каким-либо путем удалось определить другие важные параметры нашего мира, то можно было бы обоснованно выбрать одну из его моделей, а это позволило бы вычислить возраст мира. Во всяком случае очевидно, что обоснованный выбор между всеми этими моделями может быть произведен лишь на основе дополнительных экспериментальных фактов и дальнейшего усовершенствования теории. Далее мы увидим, что последующие годы принесли значительные и даже довольно неожиданные успехи в обоих направлениях.

Красное смещение, расширение мира и его возраст

В 20—30-х годах нашего века астрофизика обогатилась новыми чрезвычайно интересными и важными фактами, существенными для суждения о структуре нашего мира. Однако прежде чем рассмотреть эти факты и те выводы, которые из них следуют, условимся о нескольких вещах. Во-первых, так как все экспериментальные факты получены учеными при изучении доступной нашим исследованиям части Вселенной, то здесь и далее, когда говорится о Вселенной, имеется в виду именно эта ее часть. Во-вторых, описанные ниже экспериментальные факты представляют чрезвычайный интерес, и из них были сделаны очень важные выводы относительно строения космоса, эволюции космических тел и промежутков времени, отделяющих нас от кардинальных этапов этой эволюции. Именно поэтому

важно оценить степень однозначности и достоверности этих результатов, а для этого необходимо детально и строго рассмотреть их экспериментальную основу. Нужно посмотреть, выдержит ли груз капитальных выводов вся цепь умозаключений, достаточно ли надежно каждое из звеньев этой цепи. Однако если сомнения в надежности экспериментальных основ отпадут, то выводы придется принять, какими бы удивительными они ни казались.

Выбрав ту или иную модель мира, мы тем самым прием и определенную шкалу времени для важнейших этапов его развития.

Теперь рассмотрим эти экспериментальные факты. То, что все небесные тела имеют собственные движения, было известно давно. Неожиданным оказался характер движения далеких небесных тел: звезд и галактик. Измерения показали, что все они *движутся в направлении от нас*. Еще более удивительной оказалась скорость движения этих небесных тел. Э. Хаббл обнаружил, что *чем дальше они от нас находятся, тем больше их скорость*.

Скорость движения светящихся космических тел астрономы определяют с помощью эффекта Доплера. Напомним, что этот эффект заключается в том, что при движении тел частота колебаний, воспринимаемых детектором, отличается от частоты колебаний, испускаемых источником. Причем при их взаимном удалении наблюдается уменьшение частоты. Если речь идет о видимом свете, то уменьшение частоты электромагнитных колебаний означает сдвиг в длинноволновую, т. е. красную, часть спектра. Поэтому в этом случае говорят о красном смещении спектра.

Ныне измерение частоты электромагнитных колебаний производится с большой точностью, а различные спектры от неподвижных источников тщательно изучены. Это позволяет с относительной небольшими искажениями измерять красное смещение спектральных линий, получаемых от далеких космических объектов: звезд и галактик (рис. 54). Поэтому удастся достаточно точно определять и скорость движения небесных тел.

Таким образом, тот экспериментальный факт, что все наблюдаемые галактики удаляются от Земли, не вызывает сомнений. Однако из этого вовсе не следует, что наша Солнечная система или Земля занимают особое, выделенное положение. Если на пленку воздушного шарика нанести метки, а затем его постепенно раздувать, то расстояние между каждой меткой и всеми остальными будет увеличиваться, и это справедливо для любой из них. Таким обра-

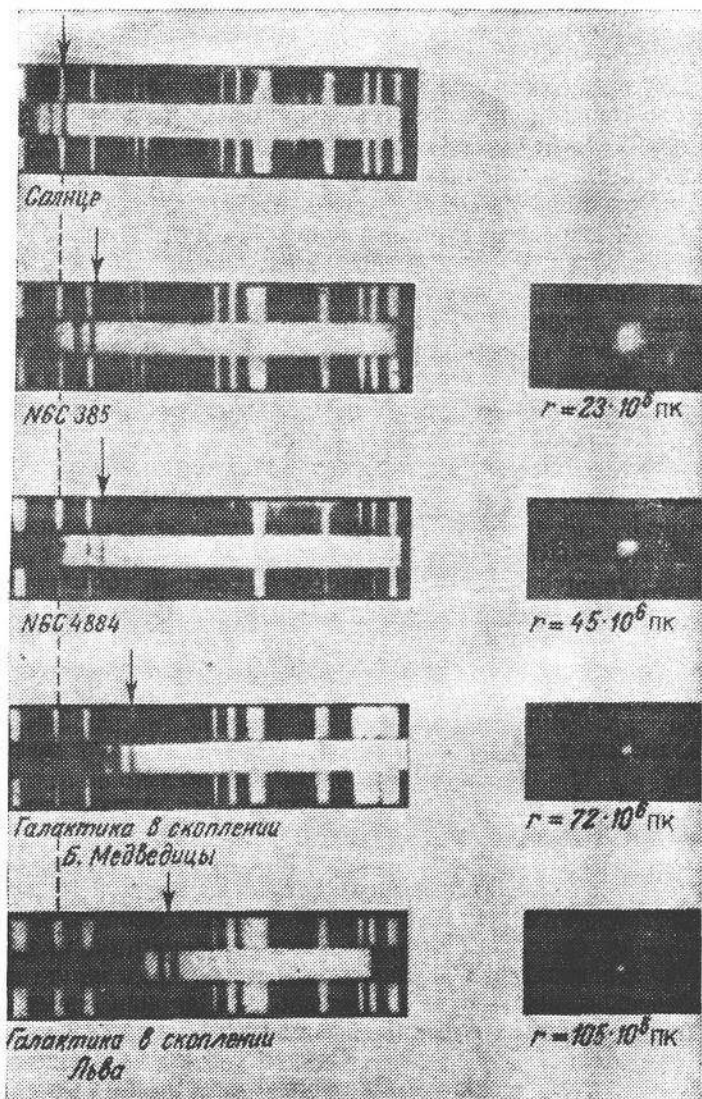


Рис. 54. Красное смещение в спектрах далеких галактик. Слева сверху приведен спектр Солнца, ниже приведены спектры различных галактик, причем на каждом из них расстояние между штриховой линией и стрелкой указывает смещение линий спектра. Справа даны фотографии тех же галактик и под каждой из них указано расстояние от нее до Земли

зом, видимое с Земли разбегание галактик следует интерпретировать как общее расширение Вселенной.

Наблюдаемое ныне расширение Вселенной позволяет сразу отбросить некоторые модели мира, но еще не дает возможности однозначного выбора; ведь имеется несколько существенно различных расширяющихся моделей.

Дальнейший прогресс в этой области был достигнут при изучении движения очень удаленных небесных тел. Исследуя эти объекты, Хаббл обнаружил, что их скорость пропорциональна расстоянию от Земли. Эта зависимость носит название закона Хаббла и выражается в виде $v = Hr$, где v — скорость движения космического тела, r — его расстояние от Земли, H — коэффициент пропорциональности между этими величинами, который называют постоянной Хаббла. Из этого закона следует, что некогда Вселенная имела очень малый объем и соответственно сверхвысокую плотность. Из него же можно определить промежуток времени, который отделяет нас от этого состояния Вселенной.

В 1929—1931 гг. соответствующие расчеты были сделаны, и при этом произошел огромный конфуз. Получилось, что на основании измерений расстояний от Земли до ряда галактик и определения скоростей движения этих галактик постоянная Хаббла равна $H = 1,8 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$, а обратная величина этой постоянной $1/H = 1,8 \cdot 10^9$ лет. Таким образом, определенный по разбеганию галактик возраст Вселенной составил лишь около 2 миллиардов лет и оказался меньше возраста Земли! Это свидетельствовало о наличии каких-то ошибок либо в постановке задачи, либо в измерениях, а может быть, и в том и в другом.

Мы уже говорили о том, что при измерении скоростей даже очень удаленных небесных тел была достигнута хорошая точность. Между тем определение расстояний до космических тел связано с более серьезными трудностями, не вполне преодоленными и в настоящее время. Представьте себе следующую неудобную ситуацию: вам нужно перевести статью с хинди на русский, а хинди вы не знаете и хинди-русского словаря у вас нет. Однако у вас есть хинди-английский, англо-французский, франко-немецкий и немецко-русский словари. Располагая таким арсеналом словарей, перевод сделать можно. Разумеется, он будет не очень точным, и тем более неточным, чем больше промежуточных звеньев. С аналогичной ситуацией сталкиваются астрономы при определении расстояний до очень удаленных небесных тел.

Расстояния до ближайших к нам звезд астрономы опре-

делили методом параллакса. Этот метод заключается в следующем: произведя наблюдения данной звезды из двух различных пунктов A и C (рис. 55), мысленно строят треугольник AOC , в вершине которого находится исследуемая звезда O , а основанием (базой) служит прямая AC , соединяющая пункты наблюдения. Определив $\angle AOB$, который называют параллактическим углом или просто параллаксом, и заранее зная длину базы, можно вычислить искомое расстояние BO .

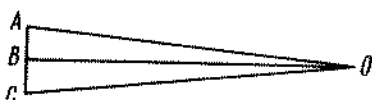


Рис. 55. Параллактический треугольник для определения расстояния

Так как звезды расположены далеко от Земли, то их параллакс очень мал. Между тем для успеха этих измерений он должен быть определен с большой точностью. В этом и заключается основная трудность этих измерений. Астрономам древнего мира метод параллакса был известен. Однако из-за низкой точности измерений определить расстояния до звезд они не смогли.

Коперник тоже пытался определить расстояния до звезд методом параллакса и воспользовался для этого достаточно большой базой — диаметром земной орбиты (300 млн. км). Для этого он произвел два измерения звезды из одного и того же пункта с интервалом в полгода. Однако обнаружить параллакс ему не удалось. Унаследовав от древних авторов ошибочное представление о том, что все звезды удалены от нас на одно и то же расстояние, он из отрицательного результата своих измерений заключил, что все звезды удалены от нас на столь большое расстояние, что их параллакс обнаружить нельзя.

В 1838 г. Фридрих Бессель, производя наблюдения поочередно с противоположных пунктов земной орбиты (т. е. с интервалом в полгода), обнаружил небольшое смещение положения звезды 61 Лебеда относительно других звезд. Тщательными измерениями он определил годичный параллакс этой звезды, т. е. угол, под которым из нее виден радиус земной орбиты (рис. 56). Этот угол оказался равным $1/3$ угловой секунды, из чего следует, что она расположена в 700 000 раз дальше от Земли, чем Солнце, т. е. на расстоянии 10^{14} км, или 11 световых лет.

В 1839 г. Т. Гендерсон измерил годичный параллакс звезды α Центавра, который оказался равным $1''$. Таким образом, эта звезда (одна из ближайших к нам) находится от Земли на расстоянии около 4 световых лет. В следующем

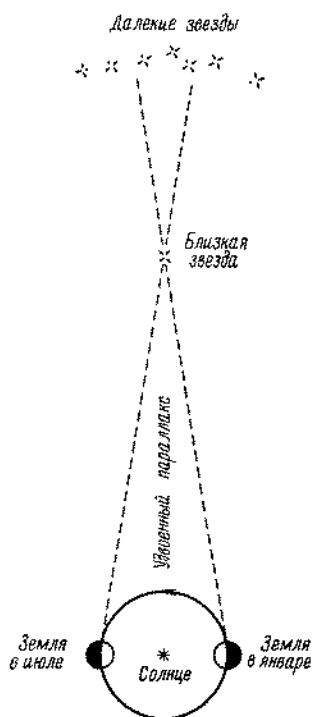


Рис. 56. Схема для определения годового параллакса звезды

уже незначительной. Между тем множество галактик удалено от нас на расстояниях в миллионы и миллиарды световых лет.

Для определения расстояний, превышающих сотни световых лет, были разработаны различные *фотометрические* методы, основанные на сравнении видимой и истинной яркости источников света. Суть этих методов легко уяснить из следующего примера: представьте себе, что в пункте наблюдения освещенность, созданная некоторым источником света, равна $1/4$ люкса, и известно, что этот источник представляет собой 100-свечовую электрическую лампу. Нетрудно рассчитать, что он находится на расстоянии 20 м. Ведь этот же источник на расстоянии 1 м создал бы освещенность в 100 люкс, а сила света точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Видимая яркость звезд измеряется в пункте наблюдения.

году В. Я. Струве из наблюдений, сделанных в Пулковской обсерватории, определил параллакс значительно более далекой звезды Веги.

В настоящее время измерены параллаксы сотен звезд, однако лишь таких, которые удалены от нас не более чем на несколько сот световых лет. Параллаксы более далеких звезд столь малы, что современными методами их измерить не удастся. Несколько сот световых лет (10^{15} — 10^{16} км) — это огромное расстояние по сравнению с размерами нашей Земли, радиус которой равен примерно 6000 км. Даже по сравнению с размерами Солнечной системы, диаметр которой составляет около 10^{10} км, это тоже огромное расстояние. Однако по сравнению с размерами нашей Галактики, большая полуось которой равна приблизительно 85 000 световых лет, верхняя граница метода параллаксов представляется

Их истинная яркость нам заранее не известна. Для определения истинной яркости небесных тел удалось использовать свойства особого класса переменных звезд: цефеид. В 1912 г. Г. Ливитт открыла зависимость между их видимым блеском и периодом пульсаций. Оказалось, что чем больше период, тем больше яркость цефеиды. Если бы мы знали истинную яркость хотя бы одной цефеиды, то по отношению их периодов смогли бы рассчитать истинную яркость всех остальных. Таким образом, здесь возникает проблема нуля-пункта фотометрической шкалы расстояний, т. е. привязки ее к другой, в которой абсолютные расстояния известны. В дальнейшем путем определения параллаксов нескольких цефеид такую привязку осуществить удалось. После этого *цефеидный метод* позволил увеличить шкалу расстояний, доступных определению, до нескольких сот тысяч световых лет.

Когда астрономы захотели проникнуть в глубь космоса еще дальше, то метод цефеид оказался непригодным, потому что в очень удаленных галактиках различить цефеиды уже не удается. Тогда Э. Хаббл предложил для определения расстояний *метод ярчайших звезд*. Этот метод основан на том, что в каждой галактике есть звезды разного типа. Однако звезды одного и того же типа, членами какой бы галактики они ни являлись, имеют приблизительно одинаковые свойства: массу, яркость и т. д. Для каждой галактики видимый блеск наиболее яркой звезды определяется как среднее значение из измерений нескольких наиболее ярких звезд. Далее предполагается, что в разных галактиках средняя яркость наиболее ярких звезд одинакова. Тогда сравнение их видимой яркости дает шкалу относительных расстояний. Далее, так же как и в предыдущем случае, возникла проблема нуля-пункта, т. е. привязки этой шкалы к другой, в которой абсолютные расстояния известны. Для калибровки метода ярчайших звезд был использован цефеидный метод. Верхней границей метода ярчайших звезд является такое расстояние, на котором в галактиках еще удастся различить отдельные звезды.

Для того чтобы в измерении космических расстояний продвинуться еще дальше,— а это представляет исключительно большой интерес,— был разработан еще один фотометрический метод. Этот метод заключается в сравнении интегральной яркости самих галактик. Есть галактики, имеющие разную структуру, и они разделены на разные типы. Метод основан на предположении о том, что галактики одного и того же типа и структуры имеют и одинако-

вую светимость. Разумеется, это справедливо лишь приближенно.

Этот метод определения расстояний — тоже относительный, а для его калибровки был использован метод ярчайших звезд. После того как это было сделано, доступную нашим исследованиям область Вселенной удалось расширить до миллиардов световых лет.

В последующие десятилетия астрономами была проделана громадная работа по усовершенствованию методов измерения больших расстояний и изучению свойств многих сотен галактик. При этом выяснилась необходимость учета некоторых добавочных факторов и исправления шкалы больших расстояний.

В 1949—1950 гг. с помощью 508-сантиметрового телескопа обсерватории Маунт-Паломар были проведены повторные и более широкие исследования далеких астрономических объектов. В результате этих измерений значение постоянной Хаббла было существенно снижено. Таким образом, промежуток времени от «первичного взрыва» до наших дней, или возраст Метагалактики, оказался равным не 1,8 миллиарда лет, а 12—13 миллиардам лет.

Тем не менее в 1971 г. аналогичная работа была принята еще раз. Дело в том, что полученные ранее значения вызывали некоторые сомнения. Между тем в это время уже были найдены пути для более обоснованного и точного определения «опорных» расстояний. Полученное в результате этой работы А. Сэндэжем *) более точное значение постоянной Хаббла, составляет: $H = (53 \pm 5) \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$, или $(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}$. Напомним, что $1 \text{ Мпк} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$, а $1 \text{ год} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ с}$. Если сделать довольно естественное предположение о том, что темп хаббловского расширения и в прошлом был таким же, как сейчас, то промежуток времени от большого взрыва до современности, т. е. возраст Вселенной, оказывается равным $18 \pm 1,6$ миллиарда лет.

Однако пока это лишь предположение, и не исключено, что под действием гравитационных сил темп расширения постепенно уменьшается. Значит, раньше расширение шло быстрее. Если это так, то возраст Вселенной меньше и составляет лишь около 9—10 миллиардов лет. Впрочем, по ряду соображений величина 18 миллиардов лет считается более вероятной и достоверной.

Тем не менее не исключены и другие варианты эволюции

*) Sandage A. *Astrophys. J.*— 1970.— Т. 162.— С. 841.

нашего мира. Возможно, что в прошлом был период сжатия Вселенной, который затем сменился расширением. Может быть это произойдет и в будущем. Наблюдаемое ныне расширение Вселенной отнюдь не исключает все эти возможности. Следовательно, для однозначного выбора модели мира и его временной шкалы нужны дополнительные экспериментальные факты. Недавно их удалось обнаружить.

Реликтовое излучение и возраст мира

Иногда невольно приходится подслушать чужой разговор. В автобусе, в метрополитене вы заняты своими мыслями или читаете книгу (т. е. заняты мыслями чужими), а чей-то разговор лезет вам в уши и вы не можете его не слышать. В большинстве случаев он вам не нужен, мешает, но вдруг может случиться, что этот подслушанный разговор оказывается важнее вашей книги и в нем содержится ответ на то, о чем вы думали месяцами или годами.

В 1965 г. телефонной компанией Белла была изготовлена антенна, соединенная с очень чувствительной радиотехнической измерительной аппаратурой. Все устройство было настроено на работу при длине волны 7,35 см. Когда инженеры испытывали эту систему, то обнаружилось, что она воспринимает какой-то «шум». Разумеется, сначала подозрение пало на радиотехнические приборы: в них искали дефекты, их проверяли и перепроверяли, но никаким их улучшением «шум» устранить не удалось. Затем стали искать по всей округе внешние источники помех, например электроаппаратуру, способную искрить, давать высокочастотные колебания и т. д. При столь высокой чувствительности всего устройства помехой могли служить и источники, расположенные довольно далеко. Однако скоро удалось доказать, что они не при чем, а принимаемые сигналы имеют *внеземное* происхождение.

После того как это было установлено, соответствующие работы были признаны настолько интересными и важными, что была предпринята специальная серия исследований этого излучения. Чтобы понять природу принимаемых сигналов, измерения были проведены и на других длинах волн, причем на каждой из них измерялась интенсивность излучения. Таким образом был получен *спектр* измеряемого излучения (рис. 57). Оказалось, что по своей форме он очень близок к тому спектру, который соответствует излучению нагретого тела. Напомним, что тепловое излучение давно

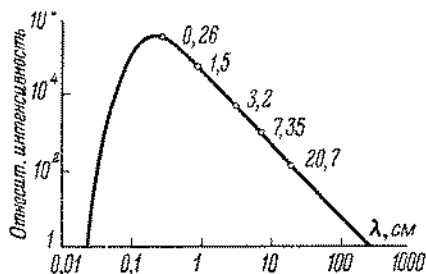


Рис. 57. Спектр реликтового излучения; кружки — экспериментальные значения интенсивности излучения, сплошная кривая — спектр равновесного (черного) излучения при температуре 3 К.

известно и хорошо изучено. Различные характеристики излучения черного тела описываются законамн Планка, Стефана — Больцмана и др., которые позволяют для любой температуры нагретого тела вычислить его спектр и, наоборот, по спектру определить температуру излучающего тела. Именно так в свое время и была определена температура поверхности Солнца и звезд.

В данном случае оказалось, что исследуемое излучение соответствует температуре около 3 К, т. е. приблизительно -270°C . Далее оказалось, что это излучение идет к нам с разных сторон приблизительно с одинаковой интенсивностью, т. е. что оно изотропно.

Какова же природа этого излучения? Откуда оно? По современным взглядам происхождение этого излучения представляется так: некогда Вселенная была очень плотной и очень горячей и состояла из электронов, протонов, ядер легких элементов (в основном гелия), а также из электромагнитного излучения различной энергии (например, радиотехнического, светового, рентгеновского диапазонов). Такое состояние материи называется *плазмой*.

При очень высокой температуре и очень высокой плотности плазма для электромагнитного излучения непрозрачна. Таким образом, электромагнитное излучение, участвуя в различных процессах, происходящих внутри сгустка плазмы, выйти из этого сгустка не может. Однако сверхплотное состояние сгустка плазмы неустойчиво и этот сгусток с большой скоростью расширяется, при этом он, наоборот, охлаждается. Когда его температура снижается до 3000—4000 К, а плотность до 10^{-20} г/см³, то в нем активно идет процесс объединения электронов и протонов и образуются атомы водорода, гелия и т. д. Когда этот процесс продвигается достаточно далеко, т. е. охватывает значительную часть скопления, то оно становится для электро-

магнитного излучения прозрачным и электромагнитное излучение вырывается из него.

Таким образом, на определенном этапе существования сверхплотной горячей Вселенной, при ее расширении, происходит «отрыв» электромагнитного излучения от ее горячего ядра и начинается путешествие этого излучения по просторам расширяющейся Вселенной.

Так как происхождение этого излучения связано с самым ранним этапом существования Вселенной, то его называют *реликтовым излучением*. Расчет показал, что для того, чтобы температура реликтового излучения от начальной снизилась до наблюдаемой ныне и соответствующей 2,7 К, должно было пройти около 10 миллиардов лет.

Так были подслушаны шумы и шорохи Вселенной, от которых сначала так упорно пытались отделаться, а потом так тщательно изучали. Их исследование убедительно показало, что наш мир был в сверхплотном и горячем состоянии, а затем расширился и остыл. Причем от сверхплотного горячего состояния мира до наших дней прошло около 10 миллиардов лет.

Итак, мы располагаем несколькими методами для суждения о возрасте Вселенной. Однако каждый из них основан на цепи связанных между собой заключений и каждый содержит хотя бы одно слабое звено. Например, в методе, основанном на анализе расширения Вселенной, столь изящном и глубоком, слабым местом является определение очень больших расстояний. До сих пор они измеряются весьма не точно.

В методе, основанном на изучении тяжелых радиоактивных элементов, слабым местом является отнюдь не определение их возраста, а неопределенность характера эволюции сверхновых звезд и частота их взрывов в далеком прошлом.

Между тем в последние годы был разработан еще один метод определения возраста Вселенной. Он основан на изучении Шаровых звездных скоплений. Его идея проста и остроумна и заключается в следующем:

поскольку можно считать, что все звезды данного Шарового скопления находятся от нас приблизительно на одинаковом расстоянии, образовались из одного и того же материала и примерно в одно и то же время;

поскольку характер эволюции звезд уже довольно хорошо изучен и промежутки времени, которые звезды тратят на прохождение отдельных этапов своего развития, приблизительно известны;

поскольку с помощью спектрального анализа можно определить состав звезд и их поверхностную температуру, а зная, что они находятся на определенном расстоянии, найти также их светимость и массу;

то, таким образом, можно определить, на каком этапе своего развития находится большинство звезд данного Шарового скопления, а это, в соответствии с тем, что изложено выше, дает возможность найти средний возраст данного Шарового скопления.

И. Ибен и Р. Руд, пользуясь этим методом, показали, что возраст Шаровых скоплений составляет около 13 ± 3 миллиарда лет. Если посчитать, что они образовались примерно в течение 1 миллиарда лет после большого взрыва, то от него нас отделяет около 14 миллиардов лет.

Чрезвычайно интересно сопоставить между собой возраст Вселенной, полученный описанными выше столь различными методами. Напомним, что он составляет:

1) по скорости расширения Вселенной — около 18 млрд. лет;

2) по возрасту тяжелых элементов с учетом периода образования Солнечной системы и периода образования сверхновых звезд — около 10 млрд. лет;

3) по длительности существования реликтового излучения — около 10 млрд. лет;

4) по длительности существования Шаровых звездных скоплений, с учетом периода их образования — около 14 млрд. лет.

Если учесть трудность и сложность задачи, погрешности определения указанных значений и то, что они найдены существенно различными способами, то совпадение их друг с другом нужно признать вполне удовлетворительным. Таким образом, возраст Вселенной составляет: 10—18 миллиардов лет, а его наиболее вероятное значение 13—15 миллиардов лет.

Масштабы пространства и времени

Каким маленьким, сколь кратковременным представлялся мир нашим отдаленным предкам!

Для дикарей пространство замыкалось видимыми очертаниями моря и гор. Счета времени у них не было. Один путешественник рассказывал, что для обозначения чисел, выходящих за пределы одного-двух десятков, дикари ерошили волосы, показывая этим, что предметов много. Ту-

земцы племен Бакаири (в Бразилии) уверяли путешественника фон ден Штейнена, что их деды присутствовали при сотворении мира.

Древним грекам мир уже не представлялся столь маленьким. Они были смелыми морскими путешественниками и имели торговые и культурные связи со многими народами, населявшими берега Средиземного моря. Древнегреческому ученому Эратосфену с помощью солнечных часов удалось приблизительно определить длину земной окружности. Архимед в своей книге «Псаммит» («Исчисление песчинок») пишет о том, что, по мнению Аристарха Самосского (III век до н. э.), звезды и Солнце неподвижны, Земля вращается вокруг Солнца по окружности, а расстояние от Земли до звезд бесконечно большое.

Впрочем, в древности эти идеи не получили развития, были оставлены и забыты.

Во II веке до н. э. Гиппарх измерил угол, под которым видна тень, отбрасываемая Землей на Луну во время лунного затмения. Зная диаметр Земли, он таким образом довольно точно определил расстояние от Земли до Луны.

Птолемей (II век до н. э.) аналогичным способом определил расстояние от Земли до Солнца, причем, довольно неточно: полученное им значение в 20 раз меньше современного. Птолемей считал, что Земля неподвижна и является центром мира, а Солнце и звезды вращаются вокруг нее. Эта геоцентрическая система мира служила опорой религии и просуществовала около полутора тысяч лет.

Согласно Библии Вселенная состоит из круглой плоской Земли, накрытой сверху твердым куполообразным небесным сводом, под которым движутся облака и небесные светила. Идея развития Земли, Солнца и звезд, их жизни, молодости и старения совершенно чужда авторам Библии. Все религии сходятся на том, что мир был некогда сотворен, и при этом называют до смешного короткий срок в 6—9 тысяч лет, якобы отделяющий нас от этого божественного акта.

Грандиозным прогрессом знаний человека о Вселенной явилась замена системы мира Птолемея системой Коперника (1543 г.). По системе Коперника Земля заняла свое скромное место во Вселенной лишь как одна из планет, вращающихся вокруг Солнца.

Горячий последователь идей Коперника Джордано Бруно (1548—1600) в своей книге «О бесконечности Вселенной в мирах» с глубоким поэтическим жаром писал: «В безмерном лоне бесконечной Вселенной возникают, развиваются,

уничтожаются и снова рождаются бесчисленные миры... Существуют бесчисленные солища, бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солища».

Еще больше расширилось представление о Вселенной после того, как в 30-х годах XIX века удалось определить расстояния до звезд. Сначала это было сделано методом параллакса. Таким образом удалось измерить расстояния до звезд, отстоящих от Земли не более чем на несколько десятков или сотен световых лет. В дальнейшем различными фотометрическими методами были определены расстояния до звезд, отстоящих от Земли значительно дальше.

Наше Солище является членом большого звездного семейства, состоящего из сотен миллиардов звезд и называемого Галактикой. Наша Галактика похожа на очень плоский диск, который вращается как полужидкое тело. Период обращения Солнца вокруг ядра Галактики — галактический год — равняется 275 миллионам лет.

Наша Галактика не является единственной; на огромных расстояниях от нее расположены другие острова Вселенной, также состоящие из многих миллиардов звезд. Например, спиральная туманность в созвездии Андромеды удалена от нас на 1,5 миллиарда световых лет. Известно много других галактик, расположенных от Земли еще дальше.

Напомним, что свет за 1 с проходит 300 000 км, а за год — 10^{13} км. Расстояние 150 000 000 км, отделяющее Солище от Земли, свет проходит за $8\frac{1}{3}$ минуты. Размеры нашей Солнечной системы таковы, что свету для того, чтобы пройти ее от одного края до другого, нужно 11 часов. Ближайшие от нас звезды (Проксима, Альфа в созвездии Центавра) находятся приблизительно на расстоянии четырех световых лет. Поперечник нашей Галактики составляет 85 000 световых лет. Ближайшая к нам галактика (Магеллановы Облака) отстоит от нас на 100 000 световых лет, а наиболее далекие из еще доступных для наблюдений на 5-метровом рефлекторе находятся от Земли на расстоянии около 3 миллиардов световых лет.

В начале 60-х годов были открыты квазары. Самый далекий из известных нам ныне квазаров находится от нас на расстоянии около 8 миллиардов световых лет. Таковы в настоящее время размеры доступной нашим исследованиям части Вселенной.

Возраст Вселенной в настоящее время определен несколькими существенно различными методами. Приблизи-

тельное совпадение полученных значений вселяет уверенность в их достоверности. Наиболее вероятным значением длительности существования Вселенной считается 13—15 миллиардов лет.

Возраст Земли известен нам значительно точнее и достовернее. Он определен уран-свинцовым методом и равен $4,6 \pm 0,1$ миллиарда лет. Поскольку мы — земляне, то нас интересует более подробная хронология Земли. Ученые этому вопросу уделили много внимания и установили, что в первые несколько миллиардов лет ее существования произошла кристаллизация минералов и образовалась земная кора. Затем сформировался современный лик Земли с его материками, горными цепями, океанами и морями. Более 1 миллиарда лет назад на Земле возникла жизнь. Сначала появились простейшие ее формы, потом развились более сложные. Несколько миллионов лет назад на Земле появились обезьянолюди, у которых мозг был чуть больше, чем у обезьян, и которые делали примитивные орудия. Археологи нашли останки этих существ и эти их орудия, а физики радиоактивными методами абсолютной хронологии определили возраст этих находок.

Теми же методами удалось установить, что несколько сот тысяч лет назад на Земле уже были люди, у которых мозг был значительно больше обезьяньего, и что они делали орудия чуть лучше своих предшественников. В эти времена прогресс человеческой культуры шел крайне медленно. Лишь около 100 тысяч лет назад люди научились делать простейшие деревянные орудия; около 25—50 тысяч лет назад — обрабатывать камень и около 6 тысяч лет назад — обрабатывать металл.

Потом прогресс человеческой культуры пошел все более быстрым темпом, подобно внезапно распрямляющейся туго скрученной пружине. Лишь около 3000 лет назад люди научились обрабатывать железо, а за последние несколько сот лет создали мощную науку и технику. Астрономией люди начали заниматься лишь около 5000 лет назад. Первые телескопы были построены в начале XVII века в Голландии Гансом Линперсгеймом и др. В 1610 г. Галилей опубликовал результаты исследований Луны, полученные с помощью разработанного и построенного им телескопа. Таким образом, менее 400 лет отделяет нас от начала телескопической астрономии, а ныне, вырвавшись за пределы Земли, люди уже осваивают космос.

Всего несколько сот солнечных лет, меньше одной галактической минуты, принадлежит астрономической

Хронологическая таблица

Событие, процесс	Возраст		
	в солнечных годах	в галактических годах	число поколений от современности
Наиболее вероятное значение возраста Вселенной	13—15 млрд.		
Возраст Солнечной системы	4,7 млрд.	17,1	—
Возраст Земли	4,6 млрд.	16,7	—
Образование твердой земной коры и появление материков и океанов	1,5 млрд.	5,5	—
Появление простейших живых существ в тепловатых водах земных океанов	Более 1 млрд.	Более 3,6	—
Жизнь сосредоточена в океанах, населенных археоциатами (существа, средние между губками и кораллами) и трилобитами (ракообразные)	500—800 млн.	1,8—2,9	—
Появление в океанах первых рыб. Растения, а за ними и животные начинают переселяться на сушу. Путь от первичного комка живой протоплазмы до человека пройден больше чем наполовину	400 млн.	1,5	—
Жизнь завоевала сушу. На земле стоит длительное лето. Бурный расцвет гигантских папоротниковых лесов и земноводных животных	300 млн.	1,1	—

Событие, процесс	Возраст		
	в солнечных годах	в галактических годах	число поколений от современности
Наступил период оледенения. На Землю нахлынула зима, длившаяся 25 миллионов лет. Гигантские леса и многие виды животных вымерли. Выжили виды, более других способные к изменениям	200 млн.	0,7	—
На Земле снова жаркое лето. Развиваются и достигают могущества разнообразные пресмыкающиеся. Эти гигантские ящеры населяют сушу, воду и воздух	100 млн.	0,4	—
Период геологической активности. Трескаются, сдвигаются и раздвигаются матерки и образуется современный лик Земли. Ящеры вымерли. Властелинами Земли стали теплокровные животные: млекопитающие на суше, птицы в воздухе	50 млн.	0,2	—
Ледниковые периоды. На Землю волнами наступает холод, сменяющийся потеплением. На Земле появился обезьяночеловек	Несколько млн.	3—5 дней	70 000—100 000
Эпоха древней человеческой культуры, когда люди умели делать только простейшие деревянные орудия	100—125 тыс.	3—4 часа	3 000—4 000
Эпоха грубой обработки камня	25—50 тыс.	50—100 минут	800—1 700
Эпоха тонкой обработки камня	12—25 тыс.	25—50 минут	400—800
Начало века меди	6000 тыс.	12 минут	200
Появление астрономии	5 тыс.	10 минут	170
Начало века железа	3 тыс.	6 минут	100
Начало телескопической астрономии	менее 400	41 секунда	13

науке в длинной истории Земли и Вселенной, но за это время люди проникли в сокровенные тайны природы. Находясь на маленькой планете, принадлежащей средней звезде — Солнцу, люди сумели исследовать звезды не только своей Галактики, но и многих других островов Вселенной.

Недавно обнаружен и исследован квазар, у которого красное смещение его спектра составляет 222,3 %. Луч света, вышедший из этого квазара, прежде чем достигнуть Земли, двигался 8 миллиардов лет. Когда он начал свое движение к нам, еще не было ни Земли, ни Солнечной системы. Когда этот луч уже прошел более 0,999 части своего пути к Земле, на ней только появились первые люди. Пока свет от далекого квазара совершал оставшуюся тысячную часть своего пути, успело смениться около ста тысяч поколений людей, появился современный человек, который построил тот мощный телескоп и изготовил ту фотопластинку, с помощью которых этот сигнал от квазара был отмечен, изучен и понят.

В приводимой здесь хронологической таблице для наглядности параллельно даны три вида летосчисления: в солнечных годах, в галактических годах и по числу человеческих поколений, считая, что галактический год равен 275 миллионам лет, а в среднем на одно человеческое поколение приходится 30 лет. Эта хронологическая таблица показывает, насколько широки ныне наши представления о мире. Ведь наше время, быть может, больше, чем какое-либо другое, насыщено фундаментальными научными открытиями и достижениями в области техники. Доступный исследованиям мир стал шире, и границы знаний продолжают раздвигаться на наших глазах. Выясняются тончайшие свойства элементарных частиц; становится понятнее строение небесных тел, механизм их образования, история развития.

Измерение времени прямо или косвенно участвует в решении этих проблем, причем особенности техники измерения времени таковы, что прогресс целого ряда областей знания в некоторой мере способствует ее совершенствованию, а отдельные этапы ее развития переплетаются с величайшими открытиями, на которых основаны наши представления о строении вещества и строении Вселенной.

Между тем ученым достаточно ясно, что нерешенных загадок природы много больше, чем решенных, и, быть может, в исследовании протяженности и длительности вещей сделан только первый шаг.

Каким будет следующий?..

Приложения

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения (нормальное)	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе	$e/m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k_B = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Фарадея	$F = 96,48456 \cdot 10^3 \text{ Кл/моль}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($P_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 273,15 \text{ К}$)	$V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$

МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЙ

Множитель	Приставка		Множитель	Приставка	
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
10^{18}	эксо	Э	10^{-1}	деци	д
10^{15}	пета	П	10^{-2}	санטי	с
10^{12}	тера	Т	10^{-3}	милли	м
10^9	гига	Г	10^{-6}	микро	мк
10^6	мега	М	10^{-9}	наво	н
10^3	кило	к	10^{-12}	пико	п
10^2	гекто	г	10^{-15}	фемто	ф
10^1	дека	да	10^{-18}	атто	а

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ И ИХ СВЯЗЬ С ВНЕСИСТЕМНЫМИ ЕДИНИЦАМИ

Д л и н а

Метр (м) представляет собой расстояние, проходимое в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299\,792\,458$ долю секунды;

1 а. е. (астрономическая единица) = $1,49598 \cdot 10^{11}$ м,

1 св. год (световой год) = $9,4605 \cdot 10^{15}$ м,

1 пк (парсек) = $3,0857 \cdot 10^{16}$ м.

В р е м я

Секунда (с) равна $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

1 мин (минута) = 60 с,

1 ч (час) = 3600 с,

1 сут (сутки) = 86 400 с.

М а с с а

Килограмм (кг) равен массе международного прототипа килограмма;

1 т (тонна) = 10^3 кг,

1 а. е. м. (атомная единица массы) = $1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг.

Т е м п е р а т у р а (термодинамическая)

Кельвин (К) равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды;

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273,15.$$

К о л и ч е с т в о в е щ е с т в а

Моль (моль) равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг.

С и л а э л е к т р и ч е с к о г о т о к а

Ампер (А) равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н,

Дополнительные единицы

Плоский угол

Радян (рад) равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу;

$$1^\circ \text{ (угл. градус)} = (\pi/180) \text{ рад.}$$

$$1' \text{ (угл. минута)} = (\pi/10800) \text{ рад.}$$

$$1'' \text{ (угл. секунда)} = (\pi/648000) \text{ рад.}$$

Телесный угол

Стерadian (ср) равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

ПЕРЕВОД Внесистемных единиц в единицы СИ

Наименование величины	Единица и ее связь с единицей СИ
Длина	$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$
Частота вращения	$1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$
Сила	$1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$
	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
Давление	$1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$
	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$
	$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ Па}$
	$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98\,066,5 \text{ Па}$
	$1 \text{ мм рт. ст. (Торр)} = 133,322 \text{ Па}$
Жесткость	$1 \text{ дин/см} = 10^{-3} \text{ Н/м}$
Динамическая вязкость	$1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Кинематическая вязкость	$1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Поверхностное натяжение	$1 \text{ дин/см} = 10^{-3} \text{ Н/м}$
Импульс силы	$1 \text{ дин} \cdot \text{с} = 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}$
Момент силы	$1 \text{ дин} \cdot \text{см} = 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}$
	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Работа, энергия	$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Дж}$
	$1 \text{ л. с.} \cdot \text{ч} = 2,65 \cdot 10^6 \text{ Дж}$
Мощность, поток энергии	$1 \text{ эрг/с} = 10^{-7} \text{ Вт}$
	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 9,81 \text{ Вт}$
	$1 \text{ л. с.} = 736 \text{ Вт}$
Количество теплоты (теплота)	$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
	$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$
Удельная теплота	$1 \text{ эрг/г} = 10^{-4} \text{ Дж/кг}$
	$1 \text{ кал/г} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
Молярная теплота.	$1 \text{ эрг/моль} = 10^{-7} \text{ Дж/моль}$
	$1 \text{ кал/моль} = 4,19 \text{ Дж/моль}$

Наименование величины	Единица и ее связь с единицей СИ
Теплоемкость, энтропия	1 эрг/К = 10^{-7} Дж/К 1 кал/К = 4,19 Дж/К
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	1 эрг/(г·К) = 10^{-4} Дж/(кг·К) 1 кал/(г·К) = 4,19·10 ⁸ Дж/(кг·К)
Молярная теплоемкость, молярная энтропия	1 эрг/(моль·К) = 10^{-7} Дж/(моль·К) 1 кал/(моль·К) = 4,19 Дж/(моль·К)
Тепловой поток	1 эрг/с = 10^{-7} Вт 1 кал/с = 4,19 Вт
Плотность теплового потока	1 эрг/(с·см ²) = 10^{-3} Вт/м ² 1 кал/(с·см ²) = 4,19·10 ⁴ Вт/м ²
Теплопроводность	1 эрг/(с·см·К) = 10^{-5} Вт/(м·К) 1 кал/(с·см·К) = 4,19·10 ² Вт/(м·К)
Коэффициент теплопередачи	1 эрг/(с·см ² ·К) = 10^{-3} Вт/(м ² ·К) 1 кал/(с·см ² ·К) = 4,19·10 ⁴ Вт/(м ² ·К)
Сила электрического тока	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10/с А = 3,34·10 ⁻¹⁰ А, где с = 3·10 ¹⁰ см/с
Плотность электрического тока	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁵ /с А/м ² = = 3,34·10 ⁻⁹ А/м ²
Количество электричества (электрический заряд)	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10/с Кл = = 3,34·10 ⁻¹⁰ Кл 1 А·ч = 3600 Кл
Пространственная плотность электрического заряда	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁷ /с Кл/м ³ = = 3,34·10 ⁻⁴ Кл/м ³
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁻⁸ с В = 300 В
Напряженность электрического поля	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁻⁶ с В/м = = 3·10 ⁴ В/м
Электрическое сопротивление	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁻⁹ с ² Ом = = 8,99·10 ¹¹ Ом
Удельное электрическое сопротивление	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁻¹¹ с ² Ом·м = = 8,99·10 ⁹ Ом·м
Электрическая проводимость	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁹ /с ² См = = 1,11·10 ⁻¹² См
Удельная электрическая проводимость	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ¹¹ /с ² См/м = = 1,11·10 ⁻¹⁰ См/м
Электрическая емкость	1 см = 1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁹ /с ² Ф = = 1,11·10 ⁻¹² Ф
Диэлектрическая проницаемость	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ¹¹ /(4πс ²) Ф/м = = 8,85·10 ⁻¹² Ф/м
Поток электрического смещения	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10/(4πс) Кл = = 2,65·10 ⁻¹¹ Кл
Электрическое смещение	1 ед. СГС (СГСЭ) = 10 ⁹ /(4πс) Кл/м ² = = 2,65·10 ⁻⁷ Кл/м ²

Наименование величины	Единица и ее связь с единицей СИ
Магнитный поток (поток магнитной индукции)	1 Мкс = 1 ед. СГС (СГСМ) = 10^{-8} Вб
Магнитная индукция (плотность магнитного потока)	1 Гс = 1 ед. СГС (СГСМ) = 10^{-4} Тл
Индуктивность	1 см = 1 ед. СГС (СГСМ) = 10^{-9} Гн
Магнитная проницаемость	1 ед. СГС (СГСМ) = $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = = $12,6 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Напряженность магнитного поля	1 Э = 1 ед. СГС (СГСМ) = $10^3/(4\pi)$ А/м = = 79,6 А/м
Светимость	1 радфот = 1 лм/см ² = 10^4 лм/м ²
Освещенность	1 фот = 1 лм/см ² = 10^4 лк
Яркость	1 стильб = 1 кд/см ² = 10^4 кд/м ²
Энергетическая сила света (сила излучения)	1 эрг/(с·ср) = 10^{-7} Вт/ср
Энергетическая светимость (излучательность)	1 эрг/(с·см ²) = 10^{-3} Вт/м ²
Энергетическая освещенность (облученность)	1 эрг/(с·см ²) = 10^{-3} Вт/м ²
Энергетическая яркость (лучистость)	1 эрг/(с·ср·см ²) = 10^{-3} Вт/(ср·м ²)

Оглавление

Предисловие к четвертому изданию	3
Из предисловия к третьему изданию	5

Глава первая

Время и календарь

Счет дней в году	7
Каким должен быть всемирный календарь	16
Эры и эпохи	22

Глава вторая.

Как измеряли время в древности

Солнечные часы	25
Песочные, огненные и водяные часы	29

Глава третья

Механические колесные и маятниковые часы

Колесо вместо песка, огня и воды	34
Маятник — сердце современных часов	36
Как регулируют часы. Весы времени. ППЧ и микроскоп времени	41

Глава четвертая

Местное время. Часовые пояса и лик Земли

Время и место. Как можно найти или потерять день	45
Где начинается новый год	47
Точное время и ориентация в открытом море	52
Формирование поверхности Земли. Плавающие матернки	57

Глава пятая

Получение, хранение и передача точного времени

Получение моментов точного времени	63
Хранение времени. Маятниковые и кварцевые часы	68
Молекулярные часы	72
Атомно-лучевые цезиевые часы	77

Часы с квантовым генератором	80
Передача точного времени	84
Куда же плывут материи	87

Глава шестая

Единица времени и эталон времени

Часы — вращающаяся вокруг своей оси Земля	90
Поиски лучшего эталона времени	92
Неравномерность вращения Земли	94
Новый эталон времени — атомные часы	97

Глава седьмая

Изучение очень быстрых процессов

Электронные секундомеры	102
Запись очень быстрых процессов осциллографами	105

Глава восьмая

Как управляют временем

Специальная киносъемка и специальная фотография	109
Трансформация времени электронно-оптическим преобразователем	119

Глава девятая

*Изучение атомных и ядерных процессов,
протекающих за миллионные, миллиардные
и биллионные доли секунды*

Длительность некоторых ядерных процессов	123
Быстродействующие приборы с осциллографами	127
Метод запаздывающих совпадений	129
Сверхбыстрый фотозатвор и период релаксации молекул	131
Измерение среднего времени жизни возбужденного состояния ядра лития-7	136

Глава десятая

Расширение понятия времени

Время в классической механике	138
Некоторые трудности классической механики	140
Время в специальной теории относительности	147
Среднее время жизни мюона и его энергия	159

Глава одиннадцатая

Измерение больших промежутков времени

Путешествие в прошлое	165
Относительная и абсолютная геохронология	171
Радиоуглеродный метод датирования событий	174

Уточнение радиоуглеродного метода	179
Границы радиоуглеродного метода	182
Некоторые применения радиоуглеродных часов. Датирование почв и теоретические модели круговорота углерода	187

Глава двенадцатая

Возраст горных пород, Земли и Луны

Первые попытки определения возраста Земли	193
Радиоактивные часы для отсчета миллионов и миллиардов лет	195
Возраст горных пород, метеоритов и Земли	206
Возраст Луны	208

Глава тринадцатая

Сколько лет Солнцу и звездам

Как велика энергия Солнца и звезд	210
Откуда берется энергия Солнца и звезд	212
Определение состава и возраста Солнца и звезд	216

Глава четырнадцатая

Космохронология

Возраст тяжелых элементов	220
Модели мира	224
Красное смещение, расширение мира и его возраст	229
Реликтовое излучение и возраст мира	237
Масштабы пространства и времени	240

Приложения	247
----------------------	-----

Фридрих Самуилович Завельский
Время и его измерение

Редактор *Н. А. Михалина*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *С. Я. Шкляр*
Корректоры *Т. С. Вайсберг, Л. С. Сомова*

ИБ № 32399

Сдано в набор 05.11.86. Подписано к печати
13.05.87. Т-12117. Формат 84×108/32. Бумага
тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 13,44. Усл. кр.-отт. 13,86. Уч.-изд. л.
14,28. Тираж 80000 экз. Заказ № 3275. Цена 45 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудо-
вого Красного Знамени МПО «Первая Образцовая
типография» имени А. А. Жданова Союзполиграф-
прома при Государственном комитете СССР по де-
лам издательств, полиграфии и книжной торговли
113054 Москва М-54, Валовая, 28

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ в 1988 году

АЛЕНИЦЫН А. Г., БУТИКОВ Е. И., КОНДРАТЬЕВ А. С.
Краткий физико-математический справочник. — 1 р. 40 к.

(Аннотированный план 1988 г., п. 125.)

Охватывает все разделы современных начальных курсов физики и математики. Содержит определения основных понятий, физических и математических величин, формулировки физических законов, математических аксиом и теорем, важнейшие формулы. Основное назначение — помочь читателю быстро найти или восстановить в памяти необходимую информацию. Наличие сведений как по физике, так и по математике, приведенных в согласованную систему, создает удобство в практическом применении справочника, например при решении задач.

Для широкого круга читателей — учащихся и преподавателей средней школы, профессионально-технических училищ, техникумов, слушателей подготовительных отделений вузов, а также студентов педагогических и технических вузов.

Предварительные заказы принимаются магазинами Книготорга, распространяющими литературу данной тематики.

