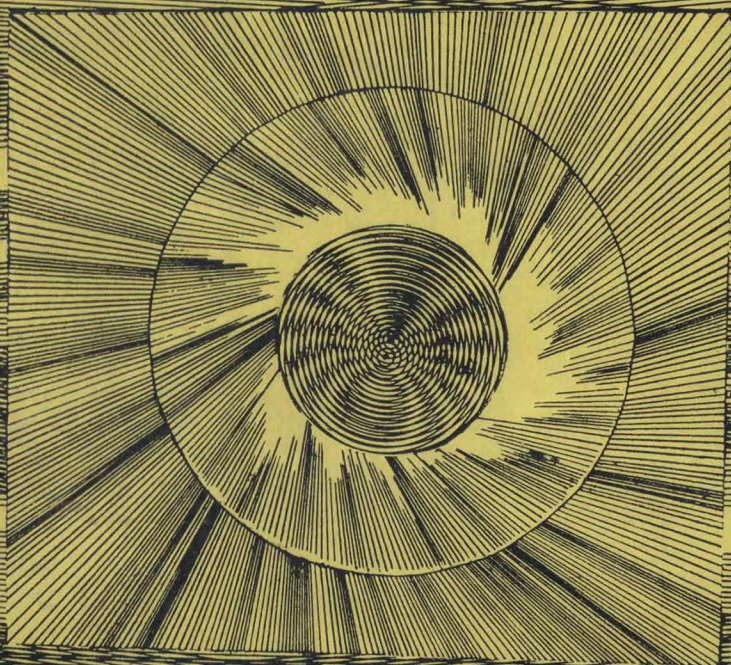


В МИРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ



# ВРЕМЯ И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА





ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«МИР»

*LE TEMPS  
ET LA PENSÉE  
PHYSIQUE  
CONTEMPORAINE*

*Rédigé sous  
la direction de*

*J. L. RIGAL*

*Professeur à la Faculté  
des Sciences de Besançon*

*DUNOD  
PARIS 1968*

# ВРЕМЯ И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Перевод с французского  
канд. физ.-мат. наук

Г. А. ЗАЙЦЕВА

Под редакцией и с предисловием  
д-ра физ.-мат наук проф

Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКОГО

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
МОСКВА 1970



- Время и современная физика.** Сб. статей.  
B81 Пер. с франц. канд. физ.-мат. наук Г. А. Зайцева, под ред. и с предисл. д-ра физ.-мат. наук проф. Д. А. Франк-Каменецкого, М., «Мир», 1970.

152 стр. с илл.

Книга, написанная коллективом французских ученых, знакомит читателя с развитием физических представлений о времени, с тем, каким образом время входит в физические теории и измеряется на практике, какие проблемы, связанные с понятием времени, возникают при переходе от одной физической теории к другой. Книга доступна и интересна широкому кругу читателей — преподавателям вузов и научным работникам, инженерам, философам и студентам.

2-3-2  
151-70 —

530

Предисловие к русскому изданию . . . . .	7
Введение . . . . .	20
Предисловие . . . . .	23
<b>Часть I. Время классической физики . . . . .</b>	<b>25</b>
Измерение времени. <i>Жан-Луи Кан</i> . . . . .	29
Время классической механики. <i>Поль Жермен</i> . . . . .	40
Астрономическое время. <i>Жан Делейе</i> . . . . .	54
Атомные или молекулярные часы. <i>Бернар Каньяк</i> . . . . .	64
Передача времени. <i>Бернар Деко</i> . . . . .	80
Возраст небесных тел <i>Мишель Хенон</i> . . . . .	87
<b>Часть II. Пространство и время . . . . .</b>	<b>93</b>
Несколько старых парадоксов. <i>Пьер Костабель</i> . . . . .	94
На путях к открытию пространства-времени. <i>Луи Марио</i> . . . . .	102
Принцип относительности и физическая эквивалентность пространства и времени. <i>Оливье Коста де Борегар</i> . . . . .	109
<b>Часть III. Время и информация в вероятностной физике</b>	<b>123</b>
Второй принцип науки о времени. <i>Оливье Коста де Борегар</i>	125
<b>Часть IV. Время в микрофизике . . . . .</b>	<b>139</b>
Время в новейшей физике. <i>Робер Ленньюе</i> . . . . .	140

## Сборник статей

## ВРЕМЯ И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Редактор *Т. Шилейко*Художник *Ю. Соостер*Художественный редактор *Ю. Максимов*Технический редактор *Н. Турсукова*

Сдано в производство 21/VIII 1969 г. Подписано к печати 8/XII 1969 г.  
 Бумага № 2 84×108<sup>1/32</sup> .2,33. бум. л. печ. усл. л. -7,98 Уч.изд. л. 7,49 Изд.  
 № 12/5268 Цена 35 коп. Зак. 545.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома Комитета по печати при  
 Совете Министров СССР. Ярославль, ул. Свободы, 97.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Значение физики для современного человечества отнюдь не исчерпывается тем могуществом, которое она дала ему в руки. Физика — великое орудие познания мира и преобразования его. Преобразование невозможно без познания, но познание мира важно и само по себе — для формирования общего мировоззрения. Наши представления о мире непрерывно углубляются в связи с развитием науки.

Однако новые научные идеи не сразу воспринимаются во всей их полноте. Рождаемые обычно в сложной математической форме, они лишь постепенно раскрывают нам свое общее мировоззренческое значение. Даже специалисты, владеющие математическим аппаратом, не всегда сразу и не всегда правильно улавливают глубокий смысл, скрытый за математическими формулами, хотя эти формулы они используют в повседневной работе над конкретными задачами. Вот почему особенно полезны такого рода научно-популярные книги, как та, что вы держите в руках. Здесь специалисты по разным разделам теоретической и прикладной физики говорят о мировоззренческих аспектах своей науки.

Выбрана, правда, определенная тема, а именно проблема времени, но ведь это одна из центральных проблем нашего общего мировоззрения. Все мы подвластны неминуемому течению времени, с ним связаны наши самые глубокие личные переживания: бренность жизни, невозвратимость прошедшего, неповторимое настоящее, неизвестное будущее. Еще в древнейшем библейском сказании об Иисусе Навине выражено не только стремление остановить время, но и вполне определенное представление о сущности времени: чтобы остановить время, надо остановить Солнце. Писатели и поэты, выражая свое мироощущение, немаловажное место в нем отводили и отводят

времени. Недаром Анна Ахматова дала название «Бег времени» книге, суммирующей и подводящей итог всему ее многолетнему творчеству. Древнегреческий философ Зенон Элейский оставил нам в наследство несколько глубоких парадоксов, касающихся проблемы времени и связанной с ней проблемы движения. Интересное обсуждение парадоксов Зенона читатель найдет во второй части этой книги. Ими же вдохновлена изящная, но не особенно ясная по смыслу стихотворная строфа Поля Валери, взятая в качестве эпиграфа к соответствующей главе. Напомним, что те же парадоксы заинтересовали и Пушкина, посвятившего им остроумное стихотворение «Движение» («Движенья нет, сказал мудрец брадатый...»).

В течение долгого периода физическая наука брала понятие времени за исходное, всецело предоставляя анализ самого этого понятия философии. Замечательная особенность новой физики XX века состоит в том, что она сумела подвергнуть физическому и математическому анализу свойства реального времени и пространства. Тем самым нанесен последний неотвратимый удар по идеалистическим и метафизическим воззрениям об априорности времени. Время — форма существования материи, обладающая вполне определенными свойствами, познать которые может только научное исследование. Результаты такого исследования приобретают не только физическое, но и широкое философское значение. Они проясняют логическую структуру основных понятий человеческого мышления. Они входят важной составной частью в наше общее мировоззрение, миропонимание, а в дальнейшем, когда мы к ним привыкаем, — даже и в мироощущение. Именно этим свойствам реального времени и посвящена настоящая книга.

Подобного рода методы и результаты конкретных наук, приобретающие общее философское значение, называют иногда эпистемологическими, читатель встретит этот термин в данной книге. Мы сохранили его в переводе, хотя он редко применяется в нашей литературе. Он представляется нам полезным, поскольку не перекрывается никаким другим известным нам термином. Иногда смешивают эпистемологию с гносеологией (теорией познания), хотя по существу они в некотором смысле противоположны. Кратко можно сказать, что гносеология — вклад философии в конкретные науки, а эпистемоло-

гия — вклад конкретных наук в философию. Говоря точнее, гносеология применяет идеи и методы философии для обоснования путей познания природы конкретными науками, в то время как эпистемология использует методы и результаты конкретных наук для логического анализа их основных понятий, для включения их в систему общего философского мировоззрения.

Посмотрим теперь, как эта идейная направленность книги осуществлена в отдельных ее главах, написанных разными авторами. Первая часть книги представляет в основном обзор методов измерения времени в их историческом развитии. Здесь в общедоступной форме дано много интересных и ценных сведений, касающихся экспериментальной науки и даже техники измерений. Мы все настолько зависим от времени, что просто обязаны представлять себе, как оно измеряется. Но эта часть книги имеет прямое отношение и к вопросу об общих свойствах реального времени. В составляющих ее главах разные авторы с разных точек зрения демонстрируют читателю одно основное положение: *дайте нам процесс, протекающий равномерно во времени, и мы сможем измерить время*. Но что значит «равномерно во времени?» Чтобы ответить на этот вопрос, надо определить, что же мы принимаем за «бег времени». Равномерно ли вращается наша Земля? Можно ли ручаться за равномерность хода каких бы то ни было часов? Ответ на эти вопросы дается в наиболее глубокой по содержанию, но и самой трудной статье, которую написал крупнейший французский механик Поль Жермен. Мы позволим себе пояснить основную его идею в более доступной форме. Законы классической механики Ньютона исходят из понятий равномерного движения и ускорения. Но если мы будем измерять время часами, которые то спешат, то отстают, равномерное движение покажется нам неравномерным, а все ускорения окажутся измеренными неправильно. Значит, в законах Ньютона по существу содержится определение равномерности хода времени. Закон инерции можно выразить следующим образом: равномерной считается такая система отсчета времени, в которой при отсутствии сил тела движутся с постоянной скоростью. Если же действуют силы, то необходимо обратиться ко второму закону Ньютона. Жермен по свойственной математикам склонности к обобщению выражает второй закон Ньютона в

несколько абстрактной форме. Но смысл не изменится, если мы вернемся к простейшей формулировке: сила равна массе, умноженной на ускорение. Равномерной при этом окажется система отсчета времени, в которой масса остается постоянной, если определять ее как силу, деленную на ускорение. Немедленно возникает еще ряд вопросов: как определять силу; как быть с часами, которые идут с равномерным ускорением или замедлением,— но эти вопросы уже вполне конкретны, а принципиальные основы выбора равномерной системы отсчета времени достаточно полно выяснены в первой части книги.

Вторая часть книги посвящена идеям Эйнштейна и Минковского, приведшим к своеобразному слиянию времени и пространства в единое четырехмерное многообразие. Не углубляясь в изложение теории относительности, авторы в простой и понятной форме излагают те ее следствия, которые непосредственно относятся к проблеме времени. В интересной статье Пьер Костабель развивает идею о том, что единство времени и пространства может быть выведено уже из общих соображений диалектики непрерывного и дискретного и ее проявлений в свойствах движения в связи с древнейшими парадоксами Зенона. Из остального содержания второй части книги отметим два вопроса: «снаряд Ланжевена» и световой конус. Первый связан с сокращением времени при быстром движении. В 1911 году Ланжевен впервые заметил, что человек, летящий в снаряде Жюль Верна (или в ракете) со скоростью, близкой к скорости света, должен постареть меньше, чем его сверстник (или брат-близнец) на Земле. В дальнейшем это следствие теории относительности получило широкую известность под названием парадокса близнецов. Парадокс, на который первым обратил внимание Бергсон, заключается в кажущемся противоречии с принципом относительности. Ведь согласно этому принципу, системы отсчета равноправны — можно было бы описывать процесс в системе отсчета, в которой ракета неподвижна, а движется Земля. Разрешение парадокса, строго говоря, лежит вне области специальной теории относительности, имеющей дело только с инерциальными (равномерно движущимися) системами. Из этой теории видно, что сравнить возраст близнецов можно только, когда они окажутся в одной точке пространства, — только тогда имеет смысл понятие одновременности. Между

тем; чтобы близнецы встретились, ракета должна вернуться обратно, то есть рано или поздно изменить направление движения, испытав тем самым ускорение. Система отсчета, связанная с ракетой, теперь не инерциальна, и переход к ней требует обращения не к специальной, а к общей теории относительности. Согласно общей теории относительности, переход к ускоренно движущейся системе отсчета эквивалентен появлению поля тяготения (гравитации), а это поле в свою очередь изменяет ход времени. Расчет показывает, что эффект скорости в одной системе отсчета в точности совпадает с эффектом тяготения в другой, так что парадокс снимается. Можно, впрочем, заметить, что общая теория относительности появилась лишь через пять лет после того, как Ланжевен сделал свое замечание. В течение этого времени парадокс был неразрешим, и Бергсон (хотя он и был философом-идеалистом) по тогдашнему состоянию науки не делал никакой ошибки, находя противоречие в рассуждениях Ланжевена.

Мы хотим обратить внимание читателя на прекрасное изложение во второй части книги вопроса о световом конусе. Он связан с важнейшей проблемой однонаправленности времени, для которой Эддингтон ввел наглядный и изящный термин «стрела времени», получивший широкое распространение как в физической, так и в философской литературе. Следует отметить, что в отличие от всех предыдущих вопросов, достаточно ясных, вопрос о стреле времени и тесно связанной с ней необратимости еще ждет своего окончательного решения.

Третья часть книги посвящена одному из подходов к этой проблеме — его можно назвать статистическим. Математическим орудием здесь служит понятие вероятности, основные физические идеи берутся из статистической термодинамики или из теории информации. Необратимость времени трактуется с термодинамических позиций. Основная идея проста, ее можно пояснить таким шуточным примером. Жена вашего знакомого уехала на дачу; после этого вы дважды его посетили, но не можете вспомнить, какой из визитов был раньше и какой позже. Однако вы соображаете, что один раз в квартире еще был порядок, другой раз — хаос. Вывод ясен — порядок был раньше, а хаос воцарился позже. Физики придумали количественную меру беспорядка — энтропию. Большая систе-



Ма при отсутствии внешних организующих сил (в нашем примере — женской руки) развивается во времени так, что энтропия возрастает. Сторонники статистического подхода считают, что только возрастанием беспорядка и задается направление времени... Элементарные процессы полагаются полностью обратимыми; необратимость возникает от сочетания большого числа элементарных взаимодействий. Подобные воззрения представляют несомненный интерес, но правильность их отнюдь не доказана современной наукой. Это область трудных, далеко еще не решенных вопросов, лежащих на переднем крае научного исследования.

Прежде всего возникает очень общий вопрос: сводится однонаправленность времени только к необратимости физических процессов или однозначное направление (стрела) времени имеет более широкий смысл? Следующий, более конкретный вопрос: проявляется необратимость только в макроскопическом масштабе или она свойственна и элементарным процессам? Эти вопросы в настоящей книге по существу даже не поставлены. В мир микроявлений вводит читателя последняя, четвертая часть книги — но только вводит. Под «новой» физикой здесь имеется в виду квантовая механика — физика микромира в ее первоначальных основах. Вероятностный характер физических законов приобретает в этой области более глубокий смысл, чем в макроскопической статистике, о которой шла речь в третьей части. В обоих случаях эти непривычные для нашего мышления представления дают повод для субъективистских ошибок. В макрофизике такие ошибки связаны с понятием информации, в микрофизике — со значением процесса измерения и его влиянием на состояние системы.

Начнем с более общего вопроса — понятия условной вероятности и теоремы Байеса. Мы позволим себе пояснить эту теорему на примере, как нам кажется, более наглядном, чем приводимый в тексте. Вероятность того, что человек закончит свою жизнь тем или иным образом, зависит от его основной профессии. Пусть мы имеем медицинские карточки большого числа людей, на которых указано, как произошла их смерть. Отберем карточки людей, которые погибли при автомобильной катастрофе. Разделив их число на общее число карточек, мы получим вероятность смерти при автомобильной аварии  $B(C_a)$ .

Если на карточках указана еще и основная профессия, то мы можем отобрать карточки автоводителей. Пусть и этих карточек достаточно много. Тогда внутри последней выборки мы можем сделать ту же операцию, что и вначале: разделить число водителей, умерших при аварии, на общее число водителей. Мы получим вероятность смерти человека в автомобильной аварии при условии, что его основная профессия — водитель. Это и есть условная вероятность. Она обозначается как  $V(C_a|P_v)$ . Естественно ожидать, что для автоводителей вероятность смерти при автомобильной аварии окажется больше, чем для людей вообще:  $V(C_a|P_v) > V(C_a)$ . Но сейчас нас интересует другое: если человек погиб при автомобильной аварии, то какова вероятность, что он водитель. По принятой системе она должна обозначаться как  $V(P_v|C_a)$ . Чтобы найти эту условную вероятность, мы должны сделать следующую выборку. Сначала отберем карточки людей, погибших при автомобильной катастрофе, а потом уже только среди них — карточки автоводителей. При этой выборке попутно мы узнаем и полную вероятность того, что любой человек по основной профессии водитель  $V(P_v)$ .

Мы делали выборки сначала по одному признаку, затем по другому. Можно сделать выборку сразу по двум признакам: отобрать из всей массы карточек только принадлежащие автоводителям, погибшим при аварии. Разделив их на общее число карточек, получим вероятность, определенную по двум признакам — профессии и смерти  $V(P_v, C_a) \equiv V(C_a, P_v)$ . Для тех, кто любит математику, заметим, что из выкладок, которые мы произвели, непосредственно следует

$$V(P_v, C_a) = V(P_v) \cdot V(C_a|P_v) = V(C_a) \cdot V(P_v|C_a).$$

Эта формула содержит в скрытом виде теорему Байеса. Вспомним теперь, что мы говорили об основных профессиях, — по условию они несовместимы (автоводитель не может одновременно иметь и другую основную профессию). При этом

$$V(C_a) = \sum V(C_a|P),$$

где знак  $\sum$  означает суммирование по всем профессиям. Отсюда и из предыдущей формулы получаем

$$V(P_v|C_a) = \frac{V(P_v) V(C_a|P_v)}{\sum V(C_a|P)}.$$

Это и есть окончательная формула Байеса. В третьей части книги Коста де Борегар рассматривает эту формулу как способ восстановления причин по следствиям. В статистическом смысле профессия может рассматриваться как причина, смерть при аварии — как следствие. Условные вероятности ( $C_a|P$ ) достаточны для статистического предсказания следствий по причинам. Но полного набора этих вероятностей еще не достаточно для статистического разыскания причины (профессии) по следствию (смерти при аварии). Нужна еще вероятность  $B(P_b)$ .

Необязательно разбираться в формуле и ее выводе; читатель, не склонный к математике, может в них и не вникать. Важен прежде всего вероятностный характер причинности, непривычный для нашего повседневного мышления, но лежащий в основе статистической и квантовой физики. Замечательно, что, имея дело с такой статистической причинностью, нельзя просто поменять местами причину и следствие:

$$B(P_b | C_a) \neq B(C_a | P_b).$$

В этом связь теоремы Байеса с проблемой необратимости времени.

Нам представляется важным и еще один аспект понятия условной вероятности. Есть большой соблазн сказать: пока мы не знали ничего об этом человеке, вероятность его смерти при аварии «была»  $B(C_a)$ . После того как мы узнали, что он автоводитель, вероятность «увеличилась» и стала  $B(C_a|P_b)$ . В квантовой физике в результате процесса измерения меняются условные вероятности, и это часто интерпретируют как изменение состояния системы. Такова и сама традиционная терминология. Говорят о вероятностях «a priori» и «a posteriori», то есть «до того» и «после того», как мы получили дополнительные сведения. Это первый из каналов, по которым в вероятностную физику просачиваются субъективистские ошибки. Второй канал связан с модным сейчас термином «информация», невольно наводящим на мысль о субъекте, воспринимающем эту информацию. Теория информации установила тесную аналогию между энтропией и информацией. Поэтому все статистические представления, в том числе и связанные с проблемой времени, можно излагать на языке теории информации. Однако при таком расширенном понимании информация уже полностью теряет

связь с субъектом. Когда об этом забывают, возникают прискорбные ошибки.

Идея о связи между направлением времени и нарастанием беспорядка в привычном нам по масштабам макромиире, принадлежащая одному из классиков физической науки — Людвигу Больцману, безусловно заслуживает внимания. Но развитие науки дает все больше свидетельств тому, что однонаправленность и необратимость времени проявляется и в явлениях совершенно иной природы и масштаба. Обратимся к мегамиру — процессам громадных космических масштабов, — мы увидим, как необратимость проявляется в твердо установленном современной наукой факте разбегания галактик, который теория интерпретирует как расширение реального физического пространства. Если бы необратимость была присуща только мегамиру, то можно было бы предположить, что направление времени задается именно этим космологическим расширением. Но подобные взгляды опровергаются проявлениями необратимости на совершенно других уровнях существования материи. Таков один из фундаментальнейших физических процессов — излучение волн. Исходные уравнения этого процесса симметричны по отношению к перемене знака времени. Однако решение их содержит две волны: расходящуюся и сходящуюся, причем последняя отбрасывается, исходя из соображений о направлении времени. В электродинамике этому отвечает описание поля движущихся зарядов посредством запаздывающих, а не опережающих потенциалов<sup>1</sup>. Аналогичные соображения, называемые иногда принципом причинности, используются и при выводе весьма важных в электродинамике сплошных сред соотношений Крамерса—Кронига. Принцип причинности понимается здесь в том смысле, что причина должна предшествовать следствию; в таком понимании принцип причинности утверждает необратимость времени и определяет его направление. Аналогичные соображения относятся и к спонтанному (самопроизвольному) испусканию частиц при радиоактивном распаде и распадах элементарных частиц. В квантовой теории испускание частиц описывается точно так же, как и излучение волн.

---

<sup>1</sup> Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теория поля, изд. 4-е, Физматгиз, стр. 197.

Необратимость и направленность времени заключены здесь не в уравнениях, а в начальных условиях. Но речь идет о начальных условиях весьма общего характера. В мегамире они означают направление космологической эволюции от плотного к разреженному, в микромире — отсутствие полей или частиц на бесконечности. Если бы наш мир был перенасыщен легкими частицами, такими, как электроны и нейтрино, то место радиоактивного бета-распада занимал бы обратный процесс синтеза радиоактивных ядер. Нет никаких оснований считать, что при этом время текло бы вспять. Достаточно рассмотреть следующий мысленный эксперимент. Образец радиоактивного вещества окружим оболочкой, поглощающей легкие частицы (хотя бы только электроны), и проследим за направлением распада. Оно однозначно укажет направление времени. Поглощающая оболочка нужна только для того, чтобы создать пустоту. Сторонники статистического понимания необратимости скажут, что это макроскопический опыт и что радиоактивный распад приводит к более вероятному состоянию (возрастанию энтропии). Но ведь подобные эксперименты можно проводить и с отдельными атомами или элементарными частицами. Если считать начальным состоянием атомное ядро, нейтрон или мезон, а конечным — электрон и нейтрино, то вопрос о направлении времени будет решен. В нашем реальном мире, состоящем в основном из пустоты, не нужна и поглощающая оболочка.

Многие физики считают, однако, что существенные свойства мира должны быть следствиями основных уравнений теории, а не начальных условий, которые представляются им чем-то второстепенным и несущественным. Отсюда — то значение, которое приписывают вопросу симметрии элементарных физических законов по отношению к обращению знака времени ( $T$ -симметрия). Этот вид симметрии тесно связан с симметрией по отношению к зеркальному отражению ( $P$ -симметрия) и к замене частиц на античастицы ( $C$ -симметрия). Согласно очень общей  $CPT$ -теореме, все физические закономерности должны быть симметричны относительно тройной операции: замены частиц на античастицы ( $C$ ), зеркального отражения ( $P$ ) и перемены знака времени ( $T$ ). Открытие в 1964 году аномального типа распада  $K$ -мезонов, в котором нарушается  $CP$ -симметрия, с точки зрения  $CPT$ -теоремы должно

интерпретироваться как нарушение симметрии по отношению к перемене знака времени. Некоторые склонны связывать это с необратимостью времени. Так, видный английский физик Г. Месси еще до обнаружения нарушения симметрии по времени писал: «Предположение о наличии такой симметрии — основа термодинамики»<sup>1</sup>.

На первый взгляд это замечание кажется странным: как же в термодинамике, в которой торжествует именно необратимость, можно требовать обратимости от элементарных процессов? На самом деле точка зрения Месси не столь уже беспочвенна. Диалектика природы такова, что обратимость микропроцессов рождает при сочетании громадного их числа свою противоположность — необратимость макропроцессов. Некоторые специальные положения термодинамики — принцип детального равновесия и соотношения Онзагера — действительно выводятся из обратимости элементарных процессов. Можно было думать, как это и полагал Месси, что необратимость в малом изменит как-то существенно характер необратимости в большом. Однако дальнейшее развитие науки не дало пока поддержки подобным взглядам. Уже пять лет известны нарушения *CP*-симметрии, но никаких макроскопических следствий из них не выявлено. Вопросы симметрии в гораздо большей степени связаны (хотя и не тождественны) с инвариантностью и отделением свойств объекта от свойств системы отсчета<sup>2</sup>.

Уравнения классической механики содержат время только во второй степени и, следовательно, заведомо симметричны по отношению к перемене его знака. И тем не менее на основе этих уравнений строится статистическая термодинамика, утверждающая необратимость времени. Выше мы приводили примеры процессов, где направление времени задается начальными условиями независимо от симметрии самих уравнений. Перемена же знака времени сводится просто к обращению всех направлений движения. Но ведь направление времени определяется вовсе не тем, движется частица слева направо или справа налево.

Анализ физических следствий перемены знака времени на простых классических примерах читатель может най-

---

<sup>1</sup> Г. Месси, Новая эра в физике, изд. 2-е, Атомиздат, 1965, стр. 223.

<sup>2</sup> См. статью автора настоящего предисловия «Инвариантность в современной физике», «Природа», № 10, 1966.

ти в блестящей заметке Л. Шиффа<sup>1</sup>. Результаты на первый взгляд неожиданны. Известно, что существуют двух-полюсные магниты и отдельные электрические заряды, но никто не наблюдал ни отдельных магнитных полюсов (монопольей), ни двух электрических полюсов у элементарной частицы. Так вот, оказывается, что симметрия по времени как раз запрещает существование магнитных монопольей и элементарных электрических диполей. Открытие нарушений *CP*-симметрии вдохновило физиков на поиски электрического дипольного момента у элементарных частиц. Если он существует, то очень мал. Несмотря на чудеса экспериментального искусства и тонкие ухищрения, придуманные теоретиками, положительных результатов пока нет. Вот к каким далеким от первоначальной постановки вопросам привела нас проблема необратимости.

Приходится прийти к выводу, что, по-видимому, направленность и симметрия времени — совершенно разные вещи. Симметрия по отношению к перемене знака — количественное свойство времени, характеризующее время как меру движения. Направленность же и связанная с ней необратимость — качественное свойство, определяющее последовательность временных интервалов независимо от их длительности. Выражаясь математически, можно сказать, что направление от прошлого к будущему задается абсолютной величиной (модулем) времени  $|t|$ . Для пространства давно различают метрические и топологические (качественные) свойства. Становится ясной важность разграничения и для свойств времени<sup>2</sup>. При переходе к четырехмерному пространству-времени оно сохраняется, ибо, как подробно объяснено во второй части книги, для времениподобных интервалов, лежащих внутри светового конуса, может быть определен порядок следования событий.

В некоторой связи с *CPT*-теоремой находятся представления о том, что замена частиц на античастицы отвечает обращению направления времени. Иногда эту мысль выражают так: в антимире время должно течь назад. Как понимать это обращение времени? Движение античастицы действительно можно заменить движением

---

<sup>1</sup> УФН, 86, вып. 4, 1965, стр. 756.

<sup>2</sup> З. Аугустынек, Топологические и групповые свойства времени, Материалы к симпозиуму «Диалектика и современное естествознание», вып. 4, изд-во «Мысль», 1966, стр. 155.



частицы в обратном направлении. Однако (мы уже подробно обсуждали это) обращение направлений всех скоростей отнюдь не равнозначно изменению порядка событий во времени. Как остроумно заметил Фред Хойл<sup>1</sup>, в антимире «...антияйца по-прежнему будут разбиваться и не будут собираться сами собой». Поэтому едва ли можно согласиться с космологическими гипотезами, использующими идею об обратном течении времени в антимире.

Как видим, современная физика имеет много точек соприкосновения с проблемой стрелы времени. Можно считать очевидным, что направление времени задается не одним каким-либо физическим процессом (скажем, разбеганием галактик или возрастанием энтропии): направленность — общее свойство времени как такового, имеющее много разных конкретных проявлений. Чему научило нас развитие физики элементарных частиц — это пониманию коренного различия между количественными и качественными свойствами времени: перемена знака времени как физической переменной не имеет ничего общего с превращением будущего в прошлое, с изменением порядка событий.

Мы подробно остановились на вопросе о направленности (стреле) времени потому, что в тексте книги он освещен несколько односторонне. В остальном физические аспекты проблемы времени отражены достаточно полно и на доброкачественном научном уровне.

Все авторы, статьи которых вы прочтете, — физики, а не философы. Ценность книги — в излагаемых ими физических представлениях, имеющих широкое мировоззренческое значение. В отдельных местах мы позволили себе в переводе сделать небольшие сокращения — там, где авторы делают поверхностные и случайные экскурсы в область философских вопросов.

Книга не претендует на философский анализ проблемы времени в целом. По этому вопросу можно рекомендовать содержательные работы Я. Ф. Аскина<sup>2</sup> и А. М. Мостепаненко<sup>3</sup>, в которых дан также и обширный критический обзор литературы.

*Д. А. Франк-Каменецкий*

---

<sup>1</sup> Ф. Хойл, Галактики, ядра и квазары, изд-во «Мир», 1968, стр. 69.

<sup>2</sup> Я. Ф. Аскин, Проблема времени, изд-во «Мысль», 1966.

<sup>3</sup> А. М. Мостепаненко, Проблема универсальности основных свойств пространства и времени, изд-во «Наука», Л., 1969.

## ВВЕДЕНИЕ

Наука и научное мышление играют все возрастающую роль в современной культуре, все более глубоко пронизывают ее. Благодаря многочисленным применениям достижений науки в области техники наука и научное мышление проникают повсеместно и в нашу повседневную жизнь.

Может ли каждый, кто готов приложить минимальные необходимые усилия, понять структуру и сущность великих научных положений настолько, чтобы уяснить их значение и узнать точные пределы их применимости?

Научное познание и научное мышление, конечно, специфичны, и нельзя требовать, чтобы читатель, прочитав несколько страниц, овладел теми интеллектуальными орудиями, которые были созданы в результате труда многих поколений ученых и потребовали упорных усилий величайших гениев. Без глубокого знания языка науки по существу не может быть и речи о том, чтобы понять ту или иную научную дисциплину, — подобно тому как невозможно постигнуть все богатство философских трудов или литературных произведений без знания языка мыслителя или писателя. Более того, чтобы глубоко изучить данную научную проблему, нужен еще достаточный опыт.

Но все люди, даже и не являющиеся учеными, постоянно сталкиваются с научными фактами и потому должны понимать сущность научных идей. В свою очередь наука не должна быть доступной лишь посвященным и чуждаться повседневной действительности, которой она обязана своим возникновением и которой она глубоко созвучна. Мы хотим помочь читателю познакомиться с направлениями мышления, которые представляют интерес, выходящий за рамки узких областей знания. Живя в бурном мире вместе со всеми людьми, по мере своих та-

лантов, со всей долей ответственности ученые принимают активное участие в его делах, поэтому между учеными и их современниками не должно быть никаких барьеров.

Данная книга ставит своей задачей как можно отчетливее выявить фундаментальные научные положения и уточнить то, что хотят сказать, но, может быть, в еще большей степени то, чего не хотят сказать авторы, употребляя такие выражения, как «Земля обращается вокруг Солнца», «вирус — живое существо», «Вселенная конечна», «время течет». Или, например, в настоящем коллективном труде (его коллективный характер подчеркивает то обстоятельство, что понятие времени имеет самое непосредственное отношение к основам современного физического мышления): «время является статистической реальностью» или «время, информация, наши действия и наша жизнь чрезвычайно тесно связаны между собой».

Из своих сугубо специальных трудов и из исследований, которые они проводят ныне, авторы попытались извлечь сущность разрабатываемых ими понятий. Во всех статьях чисто технические детали сведены к минимуму: деревья не должны скрывать леса.

Эта задача, разумеется, очень трудная! Но для того, чтобы преодолеть технологические аспекты, необходимо приложить какие-то усилия. Ведь истинная культура невозможна, если отсутствуют технические инструменты, если нет единого точного языка, позволяющего верно передавать мысли. Вместе с тем невозможно требовать, чтобы читатель усвоил все без труда. В подобном случае диалог был бы лишен истины и глубины. Мы стремились лишь к тому, чтобы свести усилия читателя к минимуму. С этой целью мы подбирали наглядные примеры и следили, чтобы изложение не выходило за рамки простейшей математики.

Писать энциклопедию мы не собирались. Напротив, мы ограничились рассмотрением некоторых основных вопросов, некоторых центральных идей. Таким образом, читатель найдет в данной книге не исчерпывающее изложение научных фактов, а ряд независимых статей о фундаментальных направлениях научных исследований.

Мы надеемся, что наши общие усилия помогут преодолеть барьер между теми, кто в разных специальных областях создает культурные ценности — достояние всего человечества. Ведь культура в конечном счете есть не что

иное, как собрание ценностей, которыми мы должны непрерывно обмениваться между собой во имя общего лучшего будущего. Для обмена идеями нужен общий язык, без которого нас ожидает не плодотворный диалог, а обмен монологами, непонимание и недоразумения. В результате длительного, происходившего на протяжении всей истории человечества обмена идеями было, в частности, выработано понятие о времени, понятие, которое является предметом этой работы. Процессу становления и развития этого понятия посвящен настоящий коллективный труд.

*Жан-Луи Ригаль*

*Андре Лихнерович*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория относительности, квантовая механика и теория информации — три научных направления, столь важные для современной физики, по существу имеющей вероятностную основу, — привели к полному преобразованию понятия времени, тесно связанного с понятием жизни.

Существует ли какая-нибудь связь между четвертым измерением эйнштейновского пространства — времени и параметром  $t$  классической механики?

Можно ли сохранить некоторую симметрию между пространством и временем, квантуя только пространство?

Различны ли понятия времени для вещей и для людей? На первый взгляд, казалось бы, теория информации и современная физика утверждают, что, поскольку наша жизнь идет от прошлого к будущему, то пропорционально истекшему времени возрастают наши знания, а следовательно, и наша способность к действиям.

Допустимо ли говорить о времени в молекулярном масштабе, если квантовая механика учит нас, что речь может идти лишь о понятии чисто статистическом?

Как согласовать показания различных часов и перейти от космического времени, где основными являются понятия начального момента и длительности, к человеческому масштабу времени, тесно связанному с нашими возможностями получать информацию или обмениваться ею через физические каналы — наши органы чувств? Как перейти от повседневного времени ко времени элементарных частиц и их систем, где статистический аспект проявляется во все большей степени?

Наша книга не может разрешить все эти проблемы, относящиеся к разряду самых сложных для современной физической мысли (о последнем говорит тот факт, что за работы, связанные с «отражением времени», Янг и Ли недавно были удостоены Нобелевской премии).

Мы попытались не только затронуть вопросы, стоящие перед физикой сегодняшнего дня, но и предугадать решения, которые нам может дать физика будущего.

Отметим еще, что тесное взаимодействие отраслей знания, сфокусированное в понятии времени, потребовало совместных усилий более чем десяти авторов на протяжении более пяти лет. Я приношу им благодарность за эту трудоемкую работу над общей темой.

*Жан-Луи Ригаль*

## ВРЕМЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Человечество далеко не сразу осознало, сколь глубоко влияют на наше поведение понятия времени и длительности. Наши возможности движения, изменения, развития, воспитания, весь опыт, из которого в конечном счете складывается наша жизнь, тесно связаны с истекшим промежутком времени. А время, предоставленное человеку или коллективу, является точной мерой его будущих возможностей — мы яснее увидим это по мере перехода от одной части к другой. Не преувеличивая, можно сказать, что жизнь и время тесно связаны между собой.

Если трудно сформулировать понятие времени, то еще труднее выделить понятие всеобщего, объективного времени, протекающего одинаково для всех физических систем, независимо от наблюдателя. Первое научное изучение движения мы приписываем Галилею, умершему в 1642 году, в том самом году, когда родился Ньютон, его истинный последователь. Изучив, в частности, два вида движений, о которых мы будем говорить позднее, Галилей попытался связать их с изохронностью движений маятника, открытой им же.

Не идёт ли время по-разному для того, кто звонит по телефону своей любимой, и для того, кто ждет вызова на переговорной станции? Для того, кто говорит, и для того, кто слушает? Для хирурга, выполняющего сложную операцию, и для родственников оперируемого, ожидающих исхода операции? Для молодых и для пожилых? Для терпеливого и нетерпеливого человека? И если иногда нам кажется, что время течет то быстрее, то медленнее, разве, изучая окружающий нас мир, мы не обнаруживаем регулярных и периодических движений, над которыми человек не властен, например движений небесных тел, смены времен года и физиологических периодов?



Идею о времени, которое является и объективным и равномерно текущим, дала науке астрономия. Триумф этого понятия в конечном итоге стал триумфом классической механики.

Для измерения длинных и коротких промежутков времени человек использовал два метода. Самое удивительное, как это хорошо показывает Жан-Луи Кан в первой статье, то, что уже первые экспериментальные исследования предвосхищают результаты и выводы современной науки.

Первый метод предполагает существование не только непрерывных, но и равномерных движений: если изучается тело, частица или более сложная система, скорость которой постоянна, то, чтобы установить зависимость между временем и пройденным путем, достаточно определить их положение. Так понятия времени сводятся к пространственным понятиям. Однако, как только техника измерения позволила выполнять опыты достаточно точно, возникла очередная трудность: различные используемые часы — Земля, Луна, Солнце, звезды — показывают различную продолжительность для одного и того же отрезка времени. Необходимо отказаться либо от понятия всеобщего времени — каждые часы показывают собственное время, — либо от возможности существования равномерных движений.

Существуют ли вообще равномерные движения? На этот вопрос классическая механика отвечает отрицательно, так как на тело всегда действуют силы, например сила всемирного тяготения. Но механика позволяет — исходя только из уравнений Ньютона — рассчитать пространственное поведение любой системы, если известны ее форма и начальное состояние. Положение частицы является функцией от параметра  $t$ , так что можно определить время по тому положению, которое занимает частица в данный момент. Если она не описывает точно рассчитанной траектории, значит, анализ движения был проведен неправильно. Триумф такого взгляда нашел выражение в утверждении Лапласа: «Разум, который в данный момент познал бы все силы природы и взаимное расположение составляющих ее тел, если бы далее он был способен анализировать эти данные, если бы он объединил в одной системе уравнений движения самых больших тел пространства и движение самого легкого атома, — то для

такого разума ничто не было бы неизвестным и будущее, как и прошлое, ясно предстало бы перед его взором».

Определение траекторий, а следовательно, и определение времени прохождения — задачи огромной трудности. Предсказание движения четырех-пяти частиц, на которые действует только сила ньютоновского взаимного притяжения, — уже проблема, недоступная для существующих в настоящее время способов вычислений. Наблюдатель должен с бесконечной точностью знать бесконечное число параметров, а это невозможно.

Подобные трудности можно обойти двояким путем: с одной стороны, статистическая механика анализирует наиболее вероятное (среднее) поведение множества частиц. Если число участвующих объектов достаточно велико, то анализ, который был малоэффективен и невозможен из-за трудностей вычислений, снова становится возможным, так как вступает в силу закон больших чисел. Однако при этом понятие времени искажается и приобретает статистический оттенок. В дальнейшем это соображение будет проиллюстрировано двумя примерами.

С другой стороны, существуют тела, которые в такой степени изолированы, что учесть действующие на них силы относительно легко. В принципе это относится к планетам и звездам. Жан Делейе в своей статье подробно анализирует такой вид движений, показывает все возрастающую степень точности измерения времени в небесной механике и выявляет трудности расчета любой траектории из-за того, что бесконечно быстрых сигналов не существует. Критические размышления по поводу первого метода измерения времени приводят к серьезным проблемам, которыми занимается современная физика. Решение этих проблем достигается ценой радикального изменения точки зрения, что в свою очередь приводит к другим методологическим трудностям.

Второй метод заключается в использовании периодических явлений и явлений, предполагаемых периодически. Промежутки времени, которые можно определить подобным путем, кратны элементарному промежутку, соответствующему одной пульсации. В этом и состоит первая трудность, присущая каждому опыту, в котором приходится сталкиваться с квантованием (впрочем, квантование имеет место при любом опыте и любом измерении).

Однако мы не знаем, существуют ли строго периодические явления или поиск их столь же бесполезен, как и поиск равномерного движения. Конечно, если сама система, как и остальная часть Вселенной, может тождественно воспроизводиться, то ее развитие будет строго периодическим. Такое полное воспроизведение, к сожалению, противоречит второму началу термодинамики. Более того, если бы подобная возможность существовала, во Вселенной все повторялось бы и никакая память не могла бы запечатлеть число истекших периодов — любой счет, в том числе и счет времени, оказался бы невозможным. Понятие периодического движения всего лишь предельное понятие: усилия часовщиков направлены на построение периодического механизма, который был бы способен функционировать с наибольшей возможной степенью точности. Не было такого расхождения между часами, которое нельзя было бы объяснить неточностью механизма. Указанный экспериментальный вывод был возведен до уровня принципа — принципа существования всемирного времени, которое может быть определено либо первым, либо вторым методом.

Остается только объединить эти два метода (что возможно лишь при помощи механики, объясняющей все движения на основе общих законов) и проанализировать трудности, возникающие из-за переноса результатов измерения из одной точки в другую или из одной системы в другую. Итак, снова возникают трудности вследствие того, что не существует бесконечно быстрых сигналов.

Жан-Луи Кан рассказывает о первых шагах человека, пытающегося определить и измерить время. Уже на этой стадии выявляются трудности как для первого, так и для второго метода измерения времени. За проблемами, по виду чисто техническими, скрываются трудности методологического порядка.

Две статьи, взаимно дополняющие друг друга, посвящены классической механике, первой единой теории природы, и соответственно ньютоновскому времени, которое определяет механика. Атомные или молекулярные часы приводят к квантованному времени: и здесь трудность технического порядка (неточность хода вследствие износа часов) на самом деле оказывается методологической.

Измерять время совершенно бесполезно, если невозможно его передавать. Бернар Деко в своей статье гово-

рит о том, что отсутствие бесконечно быстрых сигналов ведет к трудностям, которые неразрешимы в той же степени, как и предыдущие.

Статья о возрасте небесных тел на первый взгляд не имеет отношения к нашей теме. Однако она приводит к статистическому анализу, иллюстрируя возможности, которые мы должны использовать при исследовании настолько сложных систем, что их невозможно изучать с помощью какого-либо иного метода.

При определении начального состояния, от которого нужно отсчитывать время, возникают большие трудности космологического порядка; в нашей работе мы их не касаемся.

ЖАН-ЛУИ КАН

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Наши предки гораздо чаще пользовались шпагой и плугом, чем часами, — о времени и пространстве они судили по своим действиям. Древние евреи, так же как Гомер и Гесиод, различали лишь два момента дня: утро и вечер. Персы делили день на пять частей: от зари до восхода солнца — время жертвоприношения, с восхода солнца до полудня — световой день, с полудня до заката солнца, с заката до появления звезд и время чтения молитв, продолжавшееся до ночи. Римляне времен Варрона<sup>1</sup> различали семь периодов: они постоянно воевали и потому делили ночь на четыре времени бодрствования, определяемые по перемещению звезд.

Вавилонские и египетские жрецы приоткрыли первые тайны времени. В храмах древнего Египта в строжайшем секрете изучались движения звезд, траектории Солнца и Луны; солнечные часы и клепсидры<sup>2</sup> указывали, когда надо выполнять религиозные обряды. Но это было лишь вопросом религии, уделом посвященных. Впрочем, в то время инструментов вообще было очень мало. Среди раскопок трехтысячелетней давности было найдено лишь около пятидесяти клепсидров и солнечных часов. В боль-

---

<sup>1</sup> Варрон Марк Тернеций (116—27 г. до н. э.) — римский писатель и ученый. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Клепсидра — вид водяных часов. — *Прим. перев.*

шинстве случаев тени, отбрасываемой предметами, было достаточно, чтобы судить о наступлении времени приема пищи.

Ассирийцы и вавилоняне верили в зависимость человеческой судьбы от положения светил; необходимость точного определения местонахождения светил и точного измерения времени в значительной степени способствовала научному детерминизму. По свидетельству Страбона<sup>1</sup>, в Вавилоне существовала каста философов-халдеев, занимавшихся главным образом астрономией, и некоторые из них составляли гороскопы, хотя эта профессия не пользовалась большой популярностью.

Кроме понятий «год», «месяц», «день», халдеям удалось создать почти абстрактное понятие промежутка времени. По шестидесятеричной системе, применявшейся в Месопотамии, дни были разделены на двойные часы, двойной час в свою очередь — на 60 двойных минут, а каждая двойная минута — на 60 двойных секунд.

Для египетских жрецов и день и ночь состояли из 12 часов, но, используя лишь примитивную арифметику, они не смогли продвинуться дальше этого в науке о времени. Слишком сложная письменность лишь увеличивала возможность ошибок; к тому же тогда умели умножать и делить лишь на два. Очень расплывчатыми были понятия об арифметической и геометрической прогрессиях. Более того, египетская арифметика имела конкретный, почти качественный характер. Она целиком зависела от предметов, которые подлежали подсчету, и не прибегала к абстракциям.

В III веке до н. э. александрийские врачи научились считать пульс при помощи клепсидры; так человек измерил длительность порядка одной секунды. Это измерение основано на простом подсчете периодов явления, которое не было непрерывным.

До X века жрецы и монахи гораздо больше заботились о вечности, чем о времени. Время они узнавали по солнечным или водяным часам примитивной конструкции, а для регулирования ритма их жизни в большинстве случаев вполне достаточно было сосчитать число пропетых псалмов или сгоревших свеч.

---

<sup>1</sup> Страбон (род. около 63 г. до н. э. — умер около 20 г. н. э.) — крупнейший древнегреческий ученый и историк. — *Прим. ред.*

Но начиная с X века западные христиане снова открыли для себя античную науку. Совершенствование механических часов привело к созданию маятниковых часов, ставших первым действительно научным инструментом для измерения промежутков времени.

В средние века были сконструированы часы с горизонтальным маятником, качания которого отсчитывали промежутки времени. Но механизмы, приводившие в движение маятники, были сложными, и законы их движения в то время не поддавались научному объяснению.

Галилей (1564—1642) первый показал, что два маятника, один со свинцовым, а другой — с пробковым шариком, имеют одинаковый период колебаний, не зависящий от амплитуды, по крайней мере для малых амплитуд.

Последователи Галилея, и в первую очередь Гюйгенс, применили законы колебания маятника для создания маятниковых часов. Дальнейшие сложные усовершенствования таких часов несколько не касались основных исходных положений. Так как ускорение силы тяжести в данном месте постоянно, из этого следует, что, пока колебания имеют одинаковую амплитуду, свободный маятник совершает равномерные колебания. И если энергия маятника поддерживается постоянной, то он совершает колебания с одинаковой амплитудой, а следовательно, и с одинаковым периодом.

Точность механизмов маятниковых часов была достаточной для измерения близких между собой промежутков времени и для простейших астрономических наблюдений.

После Гюйгенса механические часы были значительно усовершенствованы и, как мы увидим в дальнейшем, создавались все более точные часы: кварцевые, молекулярные, атомные.

Итак, все попытки человека дать количественное определение понятию времени сводятся к двум совершенно противоположным подходам. Первый связан с непрерывными и по предположению равномерно протекающими явлениями, такими, как движение небесных тел или вращение Земли, а второй — с подсчетом числа качаний маятниковых часов или предполагаемых одинаковыми периодов, таких, как биение человеческого сердца, колебания кварцевого кристалла и т. д.

Хотя эти два метода приводят к совершенно различной технике измерения и исходят из различных принципов, они не могут быть полностью независимыми. В противном случае исчезло бы само понятие о времени. Поэтому очень важно уточнить их исходные положения и затронуть сложные проблемы их согласования.

*Измерение времени с помощью движений,  
скорость которых предполагается постоянной*

Древние астрономы считали движения светил линейными и равномерными, то есть в неявном виде принимался постулат о том, что небесные тела перемещаются с постоянной скоростью. Аналогичное предположение делалось по отношению к таким механизмам, как водяные часы, где непрерывное течение воды рассматривалось как равномерное, то есть как течение с постоянной скоростью.

Самым примитивным механизмом для измерения перемещения солнечной тени был гномон, состоявший из вертикально воткнутого каменного бруска.

Более усовершенствованный инструмент — так называемый полус — состоял из вогнутой полусферы большого диаметра, вогнутость которой была направлена к небу. Маленький шарик, помещенный в ее центре, преграждал путь солнечному свету, и его тень отбрасывалась на внутреннюю поверхность полусферы. Таким образом движение Солнца отображалось на этой поверхности. Создание подобного инструмента не было связано с какими-либо математическими познаниями, а сам инструмент был задуман просто как указатель солнечного движения. Внутреннюю поверхность раз и навсегда градуировали, исходя из равномерного перемещения тени. Градуировка не зависела от времени года. Преимуществами полоса перед гномоном были равномерность наблюдаемого движения и абсолютная градуировка. Последняя модель полоса имела указатель, ориентированный на полюс. Полоса, отображавший небесную сферу, был простейшим видом солнечных часов.

В 262 г. до н. э., когда римляне захватили Сицилию, Архимед погиб в Сиракузах, а Катан, как и Сиракузы, пал, римский полководец Валериус Мессала захватил солнечные часы Архимеда и приказал установить их в Риме. И лишь через 99 лет заметили, что часы непригодны



для Рима, они были сконструированы для положения Катана по отношению к Полярной звезде. Так впервые возник вопрос о передаче времени.

Астрономическими измерениями занимались не только вавилоняне, но и египтяне. Самым точным методом измерения у них был метод с использованием меркета — пальмового стержня, расщепленного в более широкой своей части. Наблюдатель и его помощник вставляли друг против друга по линии север — юг, так что первый видел Полярную звезду над головой второго; закрыв один глаз, наблюдатель смотрел другим сквозь щель на нить со свинцовым шариком, подвешенную на линейке, которую помощник держал таким образом, чтобы линия нити продолжалась на деревянную отметку. Меркет указывал время в том случае, когда определенные звезды пересекали вертикальную линию.

Такие измерения, естественно, очень ненадежны. Инструменты были выполнены без соблюдения единых строгих правил, так что сравнить их между собой было невозможно. Изменение роста и относительных положений наблюдателей меняло, в частности, все измерения.

Впоследствии вместо того, чтобы определять время по звездам, движения которых предполагались постоянными и точными, стали изготавливать инструменты, использующие такие равномерные и непрерывные явления, которые легко воспроизвести в земных условиях, но продолжительность которых, естественно, ограничена. Клепсидра — градуированный цилиндрический сосуд, в который стекает вода из резервуара; его использовали вавилоняне, греки и египтяне. Этот инструмент наглядно иллюстрирует успехи и трудности техники подобных приборов: в то время как в астрономии изучались предполагавшиеся равномерными изменения положения, в клепсидах старались осуществить такое изменение масс, чтобы последние линейно зависели от времени.

Клепсидры, найденные в Египте, выполнены в форме усеченного конуса. Так египтяне старались компенсировать уменьшение расхода воды в результате непрерывного уменьшения давления. Но такая компенсация не была достаточно точной для равномерного понижения уровня воды. Поскольку расположение отметок на найденных клепсидах предполагает наличие такой равномерности, измерения египтян были очень неточны. Во всех приве-

денных примерах ученые стремились установить соответствие между отрезками пространства и промежутками времени: но когда отрезки пространства оказывались равными, соответствующие им промежутки времени не были равны между собой.

В то время как большие промежутки времени измерялись при астрономических наблюдениях, клепсидры служили для «сохранения» малых отрезков времени, начиная с самых коротких периодов. И наоборот, клепсидры, используемые для астрономических измерений, позволяли определить промежуток времени между двумя наблюдениями, осуществленными с помощью меркета. Таким образом, клепсидры — это первые образцы хранителей времени, подобных нашим современным часам.

В заключение подчеркнем следующую мысль: астрономы и физики пытались обосновать измерение времени, исходя из предположения о существовании постоянной скорости, с тем чтобы измерение времени можно было сводить к измерению непрерывно протекающих явлений. Между тем во Вселенной не существует постоянной скорости<sup>1</sup>. Наличие движения с постоянной скоростью предполагало бы существование Вселенной без сил, а следовательно, пустой. Можно было бы попытаться использовать собственное движение звезд, но постоянство такого движения лишь приближенное; кроме того, соответствующие масштабы времени были бы непригодны для практического использования.

### *Измерение времени с помощью явлений, предполагаемых периодическими*

В неявном виде мы уже показали, что можно измерять время с помощью либо непрерывных, либо прерывистых движений. В случае непрерывного движения сначала делается конечное число отметок, затем производится интерполяция между ними. Второй способ состоит в подсчете событий, происходящих одно за другим в условиях, по-видимому, тождественных: период по опре-

---

<sup>1</sup> Здесь речь идет о скорости движения тел, а не о скорости передачи световых и радио-сигналов, которая в пустом пространстве строго постоянна. В пределе при очень больших (релятивистских) энергиях скорость частиц вещества стремится к тому же постоянному значению.— *Прим. перев.*

делению рассматривается как промежуток между двумя такими событиями  $E_1$  и  $E_2$ . Если  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  — три события такого типа, то продолжительность  $E_1E_3$  равна сумме времен  $E_1E_2 + E_2E_3$ .

Этот способ не дает указания, как определять моменты времени, заключенные между  $E_1$  и  $E_2$  или между  $E_2$  и  $E_3$ . Поэтому мы, вообще говоря, находимся в области прерывности.

На практике все измерения производятся обычно при помощи сконструированных инженерами механизмов, для которых физик, абстрагируясь от способов подсчета, может использовать понятие непрерывного действия, по крайней мере с макроскопической точки зрения. Хронометрист должен определить момент, когда маятник изменяет направление движения, и точность этого определения всегда будет оставаться проблемой. Однако астрономы древности отсчитывали относительно большие периоды, они должны были также довольно точно определять начальные моменты этих периодов.

Проследим за тенью, отбрасываемой гномоном  $GG'$  в течение дня, отмечая крайние точки  $O_1, O_2 \dots O_3, O_4$ , как показано на рис. 1. Тень перемещается противоположно движению Солнца, то есть с запада на восток. Самая длинная при восходе, тень укорачивается по мере поднятия Солнца, а затем постепенно удлиняется вплоть до захода светила. Из рис. 1 видно, что кривая, на которой отмечены точки  $O_1, O_2, O_3$  и  $O_4$ , симметрична относительно направления  $GM$  самой короткой тени, соответствующей полудню. Проведем это наблюдение спустя несколько дней и получим новую кривую  $O'_1 O'_2 O'_3 O'_4$ . Мы видим, что новое направление наименьшей тени  $GM'$  совпадает с направлением  $GM$ . Это общее направление самой короткой тени называется полуденной линией. На плитах вокруг гномона зубилом были высечены окружности и градусы. Самая короткая тень в году указывала на летнее солнцестояние, самая длинная — на зимнее солнцестояние. Гномон позволял определить продолжительность года, а следовательно, установить связь между солнечной мерой длительности и временем, измеренным в годах. Мгновения счета были определены достаточно хорошо.

На заре развития науки люди различали три вида периодичности. Во-первых, год, определяемый сменой

метеорологических явлений (холода, тепла), а также периодами сельскохозяйственной деятельности. Затем день, определяемый чередованием дня и ночи, или более точно — восхода и захода Солнца. Наконец, явления, менее существенные для повседневной жизни, такие, например,

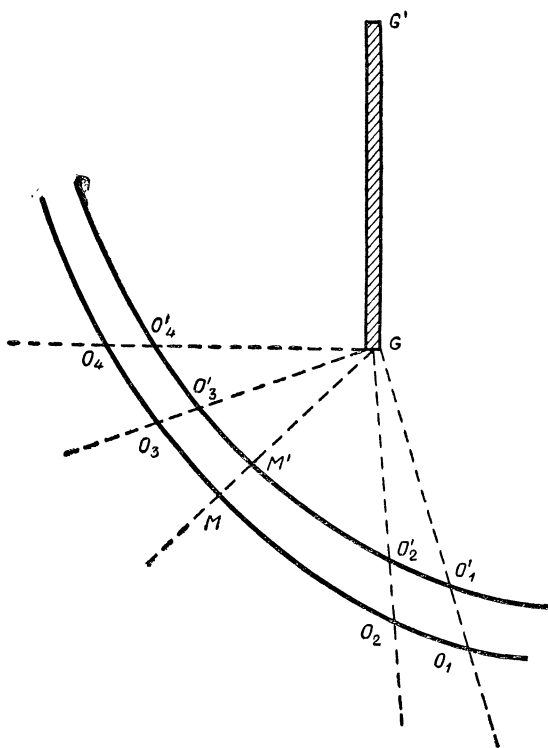


Рис. I.

как изменение внешнего вида Луны, привели к появлению понятия о лунном месяце. Но эти виды периодичности оказались несоизмеримыми, что повлекло за собой почти непреодолимые трудности практического порядка: ни год, ни лунный месяц не содержат целого числа дней.

Вавилоняне при попытке согласовать солнечный и лунный год столкнулись с большими трудностями. Солнечный год насчитывает почти 12 лунных месяцев, но

только почти. Понятие лунного года, состоящего из 12 лунных месяцев, оказалось приемлемым; но тогда становилось непригодным измерение времени в течение многих лет, измерение, столь необходимое для сельского хозяйства. Двенадцать средних лунных месяцев содержат 354 дня, что на 11 с четвертью дней меньше солнечного года; через каждые три года ошибка превышает один месяц. Чтобы компенсировать разницу, вавилоняне периодически добавляли к году тринадцатый месяц.

Таким образом, вавилоняне решили вставшую перед ними проблему опытным путем. Но лунному календарю присуща и другая трудность — определение лунного месяца. Вавилонский лунный месяц начинался вечером дня, следующего за новолунием, когда рог месяца появлялся в первый раз сразу же после восхода Солнца. Однако это явление колебалось в пределах одного дня после новолуния. Современная астрономия учитывает фактор видимости нового полумесяца: нужно, чтобы направление, под которым видна Луна, не было слишком близким к направлению видимого Солнца, полумесяц становится видимым лишь начиная с критической величины угла между Луной и Солнцем. Специальные таблицы позволяют установить для каждого месяца момент, в который достигается эта критическая величина.

Сельские работы в Древнем Египте полностью зависели от разливов Нила. Практически год измерялся промежутком времени между двумя разливами. Однако разливы, зависящие от муссонных дождей на Абиссинском плато, — сезонное явление, повторяющееся в среднем через каждые 365 дней, но с колебаниями от нескольких дней до нескольких недель.

По причинам, связанным с религиозным ритуалом, потребовалось более точное измерение продолжительности года. Существование небесного года жрецы установили по движению звезды Сотис (Сириус). Впрочем, это открытие было случайным: изо дня в день Сотис восходит и заходит все раньше, а в течение долгого периода, когда он оказывается над горизонтом днем, а не ночью, он и вовсе невидим.

Приблизительно через каждые 1456 сельскохозяйственных лет разлив Нила начинается примерно в тот момент, когда звезда Сотис после долгого отсутствия в первый раз появляется на небосклоне перед восходом солн-

ца. В течение нескольких сельскохозяйственных лет это совпадение повторяется. Египетские астрономы открыли Сотис во время одного из таких совпадений, которые имели место в 4229, 1312 и 139 гг. до н. э. Год, о котором идет речь, был одним из двух первых указанных выше. Цикл звезды Сотис приблизительно совпадал с циклом разливов Нила, это и породило понятие небесного года. Египтяне определяли начало года по периоду звезды Сотис, а не по разливам Нила. Но расхождение между небесным годом и годом, определяемым разливом Нила, постепенно увеличивалось, и в конце концов начало египетского года стало совпадать с серединой небесного года.

Каждому регулярно повторяющемуся явлению соответствует период, но периоды различных явлений обычно несоизмеримы. Кроме трудностей, рассмотренных выше, существуют также следующие трудности: периоды, отсчитанные разными часами, не согласуются между собой; трудно точно определить начало каждого периода; никакое движение не является абсолютно периодическим, так как начальные условия никогда не являются абсолютно одинаковыми, согласно второму принципу термодинамики или другим аналогичным законам.

Не существует такого расхождения между различными часами, которое нельзя было бы объяснить ошибками эксперимента (с точностью до релятивистских эффектов, которые сами зависят от движения часов). Существование малых расхождений между часами противоречит постулату о существовании абсолютного времени не больше, чем расхождения показаний клепсидров. У физиков нет никаких оснований для отрицания этого постулата; им приходится заботиться лишь о создании все более точных приборов для хранения времени и о изучении законов движения реальных хранителей времени для того, чтобы сравнивать их.

Трудность, связанная с установлением начала периода, вовсе не решающая, поскольку ошибка всегда равна лишь доле периода и может быть пренебрежимо малой, если наблюдение достаточно длительное. Это относится к кварцевым часам и даже к обыкновенным наручным часам.

Третья трудность более глубока и фундаментальна. Не нужно удивляться следующему очевидному факту: любой инструмент не может быть бесконечно точным, а равномерных движений, так же как и постоянных периодов, не существует. Мы пришли к следующему выводу: *согласно законам механики, строго равномерное движение предполагает пустую Вселенную. Согласно законам термодинамики, строго постоянный период также предполагает пустую Вселенную.*

Воспроизведение явлений можно рассматривать как абсолютно точное лишь в том случае, если начальные состояния для всех периодов одинаковы. Однако это противоречит второму принципу термодинамики: поскольку энтропия неизменно возрастает, Вселенная не может два раза пройти через одно и то же состояние. Кроме того, если бы состояния были одинаковы, ничто не позволило бы их различить; невозможно было бы узнать, что прошло некоторое время и стрелка часов продвинулась вперед. Если бы удалось установить факт ее продвижения или же (при помощи какого-либо способа) наличие старения, то это доказывало бы, что состояния уже не тождественны.

### *Сравнение двух видов измерения*

Мы рассмотрели неизбежные ограничения, возникающие при различных способах измерения времени: невозможность существования равномерных и периодических движений в непустой Вселенной; наличие ошибок, затрудняющее сравнение двух часов; невозможность доказать, что расхождение между двумя часами происходит не от экспериментальных ошибок; несовершенство любых инструментов.

Наряду с этим необходимо установить связь между двумя видами измерения: без такой связи, как мы уже отмечали, понятие времени было бы лишено смысла.

Законы классической механики, как и законы теории относительности, едины для всех систем. Для часов, основанных на постоянстве скорости, как и для часов, основанных на периодичности, справедливы одни и те же законы механики; единые дифференциальные уравнения описывают зависимости между расстоянием, пройденным телом, и временем или между периодами и про-

межутками времени. В уравнения детерминированного механического движения входит непрерывно изменяющийся параметр времени, который наблюдается опытным путем.

Если имеют дело с быстро движущимися часами или если специальное внимание обращается на изменение законов механики при больших скоростях, то вводится релятивистское понятие времени<sup>1</sup>. Однако в любом случае *законы движения всегда могут быть выражены дифференциальными уравнениями, параметры которых соответствуют наблюдаемым изменениям.*

В последующих главах понятие времени будет все более усложняться: уравнения квантовой механики — это уравнения в частных производных, необходим учет квантования, переменные величины перестанут быть непосредственно наблюдаемыми, и более того, абсолютная причинность заменится на вероятностную, а понятие времени будет связано не с частицей, а с системой частиц.

Но прежде, чем уходить от привычных понятий, полезно вернуться к классической механике и к определяемому в ней времени.

ПОЛЬ ЖЕРМЕН

## ВРЕМЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Невозможно изучать различные научные представления о «времени» без постоянных ссылок на «время», определяемое законами классической механики. Дальнейшие статьи послужат новым подтверждением этого положения (если такое подтверждение вообще необходимо). Эту старейшую отрасль физики почитают как мать наук, породившую другие современные теории математической физики, и тем не менее ее считают уже вышедшей из моды. Хотя законы механики кажутся такими простыми и понятными, опыт показывает, что основы классической механики не всем ясны. Методы изложения и толкование основ механики не всегда были одинаковыми и, во всяком случае, заметно изменились с так называемой «эпохи великих основоположников». Мы постараемся помочь чита-

---

<sup>1</sup> Релятивистскими в современной физике называются понятия, основанные на теории относительности. — *Прим. ред.*



телю не только разобраться в том, о чем говорит и что неявно подразумевает классическая механика, но и уяснить, на основе каких постулатов в механике вводится понятие времени и как вообще можно измерять время. Для этого необходимо изучить основы механики настолько, чтобы можно было разъяснить смысл принятого в механике, но недостаточно отчетливо понимаемого многими постулата о времени. Идти по проторенным дорогам классической механики, вероятно, не столь увлекательно, как исследовать богатые возможности современной физики, тем не менее эта прогулка в данном случае будет весьма поучительной.

Сначала следует четко определить место классической механики как продолжательницы евклидовой геометрии. Процесс формирования математической или физико-математической дисциплины всегда одинаков: в результате размышления над некоторыми явлениями физического мира, то есть мира, в котором мы живем, находят четкую схему для построения некоего идеализированного мира, доступного для изучения при помощи математики, который после выявления методов сопоставления сравнивается со сложной картиной, представляемой нам опытом. Первый схематический идеализированный мир, построенный таким образом, — мир классической геометрии. Это математический мир форм и протяженности. «Греческое чудо» как раз и состоит в определении этого идеализированного мира; можно добавить только, что грекам удалось рационализировать формы и протяженность.

Конечно, мир геометрии чрезвычайно беден, и «существа», населяющие его, — линии, поверхности и объемы — очень примитивны. Кроме того, этот мир неподвижен; в его рамках невозможно описать какое бы то ни было движение. Следующий этап, который нам нужно преодолеть, — этап «движения».

Рационализированный мир, в котором можно описывать и изучать движение, это и есть мир механики, но переход к нему оказался весьма сложным. Лишь через двадцать веков после появления геометрии человеческому разуму удалось создать идеализированный мир классической механики.

Бегло рассмотрим этапы перехода от одного мира к другому, или, другими словами, этапы обогащения мира

геометрии. Перед нами два пути: исторический и логический, такой, каким он нам представляется сейчас. Учитывая все, что может дать для изучения направлений человеческой мысли первая точка зрения — эта проблема сама по себе поистине огромна, — мы все-таки выберем второй путь.

Первое новое понятие, которое необходимо ввести для обогащения мира геометрии, — понятие времени. Задав геометрию и время, можно определить «кинематику», то есть рамки, в которых могут быть описаны движения. Сразу же оговоримся, что введенное здесь понятие кинематического времени еще достаточно удалено от окончательного понятия в сложившейся механике; в дальнейшем мы введем необходимые уточнения.

Более точно кинематическое время определяется заданием действительной переменной  $t$ . Задать величину  $t$  — значит определить «момент». Можно также определить продолжительность, разделяющую два момента, и понятие предшествования или следования. Затем можно сказать, что семейство геометрических фигур  $S_t$ , зависящее от параметра  $t$ , определенное для всех значений  $t$ , предопределяет эволюцию самой системы  $S$ , если имеется возможность установить между точками фигур  $S_{t_2}$  и  $S_{t_1}$  такое взаимно однозначное точечное соответствие  $\pi(t_1, t_2)$ , что  $\pi(t_1, t_1)$  будет тождественным преобразованием и что  $\pi(t_1, t_3) = \pi(t_1, t_2) \pi(t_2, t_3)$ . Это означает, что если  $\pi(t_1, t_2)$  ставит в соответствие с точкой  $M_1$  из фигуры  $S_{t_1}$  точку  $M_2$  из  $S_{t_2}$ ,  $\pi(t_2, t_3)$  — точке  $M_2$  из  $S_{t_2}$  точку  $M_3$  из  $S_{t_3}$ , то  $\pi(t_1, t_3)$  будет ставить в соответствие точке  $M_1$  из  $S_{t_1}$  точку  $M_3$  из  $S_{t_3}$ . Не будем подробно останавливаться на математических структурах, вытекающих из этого определения. Скажем только, что они позволяют построить чисто абстрактные обобщения, приводящие к так называемой «динамической топологии».

О вводимой таким путем системе  $S$  говорят, что она является «твердой в кинематическом смысле», если за преобразования  $\pi$  взяты смещения, допускаемые евклидовой геометрией. (Напомним еще раз, что мы предполагаем заранее известными все понятия евклидовой геометрии, в частности понятия длины и трехмерного пространства.) Уточним теперь определение движения: говорят, что точка  $M$  неподвижна по отношению к твердому телу  $S$ ,

если объединение  $M$  и  $S$  представляет собой твердое тело, то есть точка  $M$  находится в покое по отношению к  $S$ . Если точка  $M$  не находится в покое по отношению к  $S$ , то говорят, что точка  $M$  движется относительно этого твердого тела. Понятие движения или покоя приобретает смысл лишь в том случае, если известно твердое тело, относительно которого определяют данное движение. Твердое тело, по отношению к которому наблюдаются движения, называется системой отсчета или репером. Точка  $M$ , находящаяся все время в покое по отношению к твердому телу  $S$ , называется «связанной» с твердым телом.

Не станем подробно останавливаться на классических понятиях: траектория точки, скорость, ускорение. Траекторией точки называется кривая, образованная множеством  $M(t)$  положений точки в разные моменты времени. Средней скоростью между моментами  $t$  и  $t'$  называется вектор  $\vec{W}(t, t')$ , равный

$$\vec{W}(t, t') = \frac{\vec{OM}(t') - \vec{OM}(t)}{t' - t},$$

где  $O$  — произвольная точка, связанная с репером  $R$ , в котором наблюдается движение.

Скорость  $\vec{V}(t)$  в момент  $t$  является пределом  $\vec{W}(t, t')$  для случая, когда  $t$  остается фиксированным, а  $t'$  стремится к  $t$ . Другими словами,  $\vec{V}(t)$  есть производная от векторной функции  $\vec{OM}(t)$ . Аналогично ускорение в момент  $t$  является вектором  $\vec{\gamma}(t)$ , определяемым второй производной от функции  $\vec{OM}(t)$ .

Эти определения обобщаются на точки системы, движения которых прослеживают по отношению к реперу  $R$ . Уточним это определение по отношению к системе, состоящей из непрерывного множества геометрических фигур  $S_t$ , для которой задан закон соответствия  $\pi$ .

Так как движение определено только в том случае, когда задан репер, соотношения между движениями одной и той же системы необходимо рассматривать относительно двух движущихся реперов; в результате вводятся знаменитые законы сложения скоростей и ускоре-

ний и строится классическая<sup>1</sup> кинематическая теория перехода от одного репера к другому. Скорость точки  $M$  в репере  $R_a$  равна

$$\vec{V}_a = \vec{V}_e + \vec{V}_r,$$

где  $V_r$  — скорость точки  $M$  в репере  $R_r$ ;  $\vec{V}_e$  — скорость в репере  $R_a$  такой точки, которая при переходе в репер  $R_r$  совпадает с  $M$  (в рассматриваемый момент времени). Правило для ускорений не столь просто:

$$\vec{\gamma}_a = \vec{\gamma}_e + \vec{\gamma}_r + \vec{\gamma}_c.$$

Здесь  $\gamma_c$  — дополнительное ускорение, или ускорение Кориолиса, — зависит от относительной скорости  $\vec{V}_r$  и скорости репера  $R_r$  по отношению к реперу  $R_a$ .

Очень важна основная гипотеза, на которую опирается понятие времени в классической кинематике. Она дает возможность применять один и тот же способ измерения времени в различных реперах, движущихся относительно друг друга. *Эта гипотеза гласит, что два события, одновременных для наблюдателя, связанного с каким-либо репером, будут в равной степени представляться одновременными любому наблюдателю, связанному с произвольным репером, движущимся относительно первого.* Физически это предполагает существование сигнала, распространяющегося с бесконечной скоростью, поскольку в противном случае различные наблюдатели не смогли бы эффективно установить эту одновременность и проверить совпадение их времен. Мы имеем дело с первой коренной схематизацией классической механики, делающей ее непригодной для описания таких физических явлений, в которых проявляются скорости, сравнимые со скоростью самого быстрого сигнала, которым мы располагаем, — скоростью света.

Обратим внимание на то, что в кинематике возможен известный произвол в отношении определения времени. Если  $t$  — время и если  $T = f(t)$ , где  $f$  — достаточно непрерывная постоянно возрастающая функция, то  $T$  также

---

<sup>1</sup> Классическая, то есть относящаяся к классической механике, а не к теории относительности или квантовой теории. Такое словопотребление принято в современной физике. — *Прим. ред.*

время. Другими словами, в кинематике все формулировки (речь идет об общих формулировках, таких, например, как «вектор ускорения лежит в касательной плоскости», «нормальная составляющая ускорения равна произведению кривизны траектории на квадрат скорости» и т. д.) в одинаковой степени справедливы для  $t$  и для  $T$ . Но для отдельных свойств движения это уже неверно. Равномерное движение (путь пропорционален времени) для  $t$  не будет равномерным для  $T$ , если функция  $f'(t)$  не постоянна.

Такова в общих чертах классическая кинематика, позволяющая создать идеализированный мир, в котором мы можем определять и описывать движения.

Все это лишь первый этап, поскольку нам нужно не только описывать движения, но и уметь их предсказывать. Пока наши системы обладают лишь геометрическими свойствами. Следующий этап состоит в том, чтобы снабдить их «массой». Понятие массы в классической механике — частный случай математического понятия меры. Оно заключается в установлении соответствия некоторого положительного или нулевого числа с множеством (измеримым), причем это соответствие должно удовлетворять постулату аддитивности, который формулируется следующим образом:

Если  $\mu$  есть такая мера и если  $A_1, A_2, \dots, A_n$  — несвязанные множества, объединением которых является  $\mathcal{A}$ , то

$$\mu(\mathcal{A}) = \mu(A_1) + \mu(A_2) + \dots + \mu(A_n).$$

Для заданного момента времени точка называется материальной, если ее масса отлична от нуля. Измеримые множества, рассматриваемые в механике, являются объединениями материальных линий, материальных поверхностей, материальных объемов, а массы этих множеств определяются с помощью удельных линейных, поверхностных или объемных масс. Например, удельная объемная масса в точке  $M$  для материального объема  $\mathcal{V}$  в данный момент времени будет пределом отношения  $\Delta m / \Delta v$  массы  $\Delta m$  области  $d$  к объему  $\Delta v$ , окружающему точку  $M$ , когда все размеры  $d$  стремятся к нулю. В общем случае удельная масса точки не остается постоянной.

Все перечисленные выше простые понятия определены для данного момента времени, а изменение материальных величин с течением времени ограничивается пер-

вым законом классической механики<sup>1</sup>, называемым законом сохранения массы: масса любой части системы, за движением которой мы наблюдаем, не зависит от времени. Согласно одному из положений классической механики, Вселенная непрерывна. Такие объекты нашей физической Вселенной, как тонкий стержень, тонкий диск и сплошной шар, в механике соответственно представляются прямолинейным материальным отрезком, материальным кругом и материальной сферой, массы которых определяются с помощью удельной массы. Физик может сказать, что данный стержень не непрерывен, а состоит из атомов и что пустого пространства в стержне больше, чем «заполненного», однако представитель классической механики мыслит абстрактно и пользуется лишь понятиями о непрерывных пространстве и материи, хотя в действительности эти понятия окажутся неточными. В этом состоит вторая схематизация механики. Именно эта схематизация не позволяет использовать законы классической механики для описания явлений в молекулярных или атомных масштабах.

Кинетика — отрасль механики, которая изучает понятия, возникающие при введении в кинематику масс. Один из ее существенных инструментов — интеграл, взятый по распределению масс. Каждой скалярной (или векторной) функции, определенной<sup>2</sup> на системе  $S$ , можно сопоставить число (или вектор), возникающий в результате применения операции интегрирования по массам к данной функции. Если распределение сводится к конечному числу точечных масс, эти интегралы являются конечными суммами; если распределение определяется объемной

---

<sup>1</sup> В теории относительности этот закон уже не имеет места. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Функциональная зависимость устанавливает соответствие между множеством  $M$  значений независимого переменного и множеством  $M'$  значений функции. При этом говорят, что функция определена на множестве  $M$ . Очень многие функции определены на множестве всех действительных и комплексных чисел; в таких случаях указание множества, на котором определена функция, нужно только для полной математической строгости. Но даже и в элементарной математике известны функции, для которых это не так. Например, функция  $y = \arcsin x$  определена на множестве значений независимой переменной, удовлетворяющих условию  $-1 < x < 1$ . При других значениях  $x$  указанная функция никак не определена, то есть ее значение не может быть указано. — *Прим. ред.*

массой, такой интеграл выразится в виде объемного интеграла.

Среди кинетических понятий (определенных для фиксированного момента  $t$ ) выделим так называемую характеристическую пару векторов  $[\Omega]$  количества движения. Эта пара определяется по полю скоростей  $\vec{V}(M)$ , а поле в свою очередь является функцией плотности масс, для которых определяется эта пара. Полный импульс и полный момент относительно точки являются интегралами, взятыми по отношению к распределению масс для  $\vec{V}(M)$  и  $\vec{OM} \times \vec{V}(M)$ , то есть

$$\int_S \vec{V}(M) d\mu \quad \text{и} \quad \int_S \vec{OM} \times \vec{V}(M) d\mu.$$

Если  $m$  — масса системы  $S$ , а  $G$  — центр инерции данной системы, то первый интеграл будет равен  $m\vec{V}_G$ .

Характеристическая пара векторов для ускорения  $\alpha$  определяется таким же образом по полю ускорений  $\vec{\gamma}(M)$ . Результирующая сумма и результирующий момент относительно точки  $O$  равны соответственно

$$\int_S \vec{\gamma}(M) d\mu \quad \text{и} \quad \int_S \vec{OM} \times \vec{\gamma}(M) d\mu.$$

Если ускорение центра инерции рассматриваемой системы обозначить через  $\gamma_G$ , то первый из этих интегралов будет равен  $m\gamma_G$ .

Кинетической энергией называется интеграл от скалярной функции  $1/2 \vec{V}^2(M)$  по отношению к распределению масс:

$$\frac{1}{2} \int_S \vec{V}^2(M) d\mu.$$

Подробнее на свойствах этих величин не стоит останавливаться.

Последним понятием, необходимым для построения динамики, является схематизация обыденного понятия сил, действующих на систему  $S$ . Нужно четко различать внутренние усилия в системе  $S$ , вызванные действием некоторых частей системы на другие части этой же системы, и внешние усилия, действующие на  $S$  со стороны дру-

гих систем, отличных от  $S$ . Лишь внешние усилия получают точное математическое определение. Задать систему усилий (или, точнее, сил, если движение не является скачкообразным, что мы и предполагаем), действующих на  $S$ , это значит задать на  $S$  поле векторов  $\vec{f}(M)$  и меру  $\omega$ , то есть задать распределение фиктивных масс.  $\vec{f}(M)$  — это плотность сил, отнесенная к мере  $\omega$ . В частности, с характеристической парой векторов  $[\mathcal{F}]$  сопоставляется характеристическая пара внешних сил, действующих на  $S$ : их полная результирующая и полный момент относительно точки  $O$  являются интегралами, взятыми по отношению к мере  $\omega$  для векторов  $\vec{f}(M)$  и  $\vec{OM} \times \vec{f}(M)$ , то есть

$$\int_S \vec{f}(M) d\omega \quad \text{и} \quad \int_S \vec{OM} \times \vec{f}(M) d\omega.$$

Если  $\omega$  отождествляется с распределением реальных масс, то говорят, что  $\vec{f}(M)$  — это плотность сил, отнесенная к распределению масс; если  $\omega$  состоит из  $p$  точек системы  $S$ , меры которых конечны и равны 1,  $P_1, \dots, P_p$ , то система сил сводится к совокупности  $p$  конечных сил  $\vec{f}(P_1), \dots, \vec{f}(P_p)$ . Если  $\omega$  — объемная мера, то есть если мерой области служит ее объем, то  $\vec{f}(M)$  является объемной плотностью внешних сил.

Таков в кратких чертах мир классической механики. Как он прост и как бесцветен! Евклидова геометрия, понятие времени, опирающееся на понятие действительного числа, понятие массы, определенной скалярными функциями, внешние силы, определенные векторными полями, — можно ли вообразить что-либо более простое, если то, что хотят схематизировать, должно включать такие расплывчатые понятия, как точки приложения, направления и интенсивности. Чтобы построить свой идеализированный мир, создателям классической механики не нужно было вводить более тонкие понятия. Теперь остается определить «правила игры» в этой вселенной, то есть установить связи между силами (которые схематизируют то, что в обычном языке называется причинами) и результатами, описывающими возникшее движение. Правила эти просты и связаны с формулировкой основного



закона всей классической динамики, управляющего всеми возможными движениями, будь то механика твердых тел или механика сплошных сред.

Существует по крайней мере один репер, называемый абсолютной системой отсчета, и одна хронология — отсчет абсолютного времени, — такие, что в любой момент и для любой части системы характеристическая пара для вектора ускорения равна характеристической паре для внешних сил, действующих на эту часть:  $[a] = [\mathcal{F}]$ .

Подчеркнем здесь только одну сторону этого высказывания, представляющую для нас первоочередной интерес и позволяющую значительно уточнить понятие времени. Измерение времени в динамике не характеризуется тем исключительным произволом, который присущ кинематике. Если  $t$  — абсолютная мера времени, то всякое другое абсолютное время  $T$  (то есть такое время, для которого предыдущая формулировка остается в силе) определяется из выражения

$$T = at + b,$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные. Постоянная положительна, если принимается условие о неизменности направления от прошедшего к будущему. В самом деле, формулировка основного закона придает физический смысл понятию ускорения; скорость и ускорение, следовательно, должны быть четко определены для каждой абсолютной системы отсчета времени с точностью до постоянного множителя, зависящего от выбора единиц. Поскольку

$$\frac{d\vec{OM}}{dT} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \cdot \frac{dt}{dT},$$

функция  $T(t)$  с необходимостью имеет указанный вид. Произвольным остается только определение единицы времени, тогда как выбор начала отсчета времени, очевидно, не существен. В дальнейшем для измерения времени мы будем использовать абсолютную систему отсчета.

Не стоит продолжать изучение классической механики или показывать, как в течение веков ее развитие привело к существенному обогащению научных представлений. Необходимо лишь обратить внимание на то, что идеализированный мир, представляемый в виде теорети-

ческой схемы определенного вида, постоянно сравнивался с миром физического эксперимента. Выработка основных понятий и установление «правил игры» — результат исторического размышления над опытными данными. Но если даже эта схема считается уже разработанной, то для того, чтобы она соответствовала миру нашего эксперимента, нужно еще ответить на следующие вопросы:

Как выбрать в нашем физическом мире систему отсчета, играющую роль одной из абсолютных систем отсчета, о которых говорит основной закон?

Как определить и измерить время в нашем физическом мире, чтобы его можно было уподобить времени, входящему в формулировку основного закона?

Как измерить массы и силы физического мира, чтобы теория могла быть применима к окружающему нас миру?

Ответив на эти вопросы, можно проверить справедливость предложенной схемы, сравнивая наблюдаемые движения с соответствующими движениями, рассчитанными по законам механики. Таким образом, мы в той или иной степени уточним справедливость построенной модели и выясним, с какой точностью можно предсказывать явления.

В действительности этапы построения теории и ее сравнения с опытом, которые мы для удобства рассматривали отдельно, неразрывно связаны между собой. На подобного рода согласование теории и опыта потребовались многие века напряженного человеческого труда; сейчас слишком часто забывают, как много усилий затратило человечество в труднейших условиях, чтобы получить указанные результаты.

Мы лишь кратко опишем главные этапы пройденного пути. В частности, отметим его диалектический характер, а также то, что развитие механики осуществлялось при помощи последовательных приближений всякий раз, когда речь шла о применении схемы классической механики к движению небесных тел или к движению земных систем. Ограничимся рассмотрением хорошо известного случая движения планет.

В первую очередь уточним вопрос о системе отсчета. Согласно закону сложения ускорений, каждая система отсчета, равномерно перемещающаяся относительно абсолютной системы отсчета, также может считаться абсолютной. В этом заключается принцип относительности

Галилея. Чтобы в системе отсчета, движущейся произвольно, можно было обобщить основной закон динамики, к силам, действующим на систему, следует прибавить фиктивные силы  $-\vec{\gamma}_e(M)$ , характеризующие ускоренное движение плотности массы, и дополнительные фиктивные силы  $-\vec{\gamma}_c$ ; последние равны нулю, если система отсчета движется поступательно по отношению к абсолютной системе отсчета.

Если мы применим основной закон ко всей Вселенной, то внешние силы по определению равны нулю, то есть

$$[\alpha] = 0.$$

Таким образом, центр инерции  $U$  Вселенной можно считать связанным с абсолютной системой отсчета. При астрономических наблюдениях в качестве абсолютной системы отсчета берется система отсчета, определяемая положением центра  $U$  и прямыми, проходящими через  $U$ , направление которых связано с так называемыми неподвижными звездами. Определив таким образом универсальную абсолютную систему отсчета, рассмотрим системы отсчета, более доступные для наблюдения движений. Система отсчета с началом координатных осей в центре инерции Солнечной системы, направления осей которой связаны с универсальной системой отсчета, может в достаточно хорошем приближении рассматриваться как абсолютная. Это и есть планетная система отсчета в Солнечной системе. Но в Солнечной системе, где преобладает масса Солнца, можно (конечно, с более грубым приближением) рассматривать в качестве абсолютной также систему отсчета, движущуюся относительно предыдущей, но связанную с центром инерции Солнца. Назовем эту систему солнечной системой отсчета. Все наши соображения опираются на несколько расплывчатую, но достаточно очевидную гипотезу: тело  $A$  действует на тело  $B$  тем сильнее; чем больше масса  $A$  и чем меньше расстояние  $AB$ .

В еще более грубом приближении можно рассматривать в качестве абсолютной систему отсчета, начало которой совпадает с центром Земли, а направления осей связаны с неподвижными звездами. Это приближение пригодно для изучения движений вблизи Земли без учета влияния Солнца, Луны, планет и звезд (в частности, если

не рассматриваются такие явления, как приливы и отливы). Относительно такой системы отсчета Земля, рассматриваемая как твердое тело со сферической симметрией, вращается равномерно. Мы констатируем периодичность этого суточного движения и находим первый, несовершенный, но часто достаточный способ физического определения абсолютного времени и, что особенно важно, приобретаем первый эталон времени. *Ведь для времени нельзя создать статический эталон, который можно было бы поставить под колпак, подобно эталонам длины и массы.* Нужно иметь возможность наблюдать в течение достаточно длительного времени строго периодическое явление. Суточное движение Земли и является этим первым эталоном, и установление его периодичности было первым подтверждением принципов классической механики.

Рассмотрим теперь движение какой-нибудь планеты в солнечной системе отсчета, где время определяется с помощью суточного движения Земли. Движение планет происходит по известным законам Кеплера. В теоретическом мире механики, где материальные точки движутся в соответствии с законами Кеплера, результирующая сил, приложенных к каждой точке, прямо пропорциональна ее массе и обратно пропорциональна квадрату расстояния точки от начала системы отсчета. Такова первая часть диалектического пути развития, о котором шла речь: основной закон при учете действующих сил используется для определения наблюдаемого движения. Обобщая полученный результат, мы приходим к закону ньютоновского притяжения, дающему нам возможность познать силы, влияющие на движение планет. Теперь можно более строго рассмотреть эту проблему. Выберем за основу планетную систему отсчета (это законно, если пренебречь влиянием звезд на движение тел Солнечной системы). Применяя основной закон (зная силы, находим движение), мы можем рассмотреть проблему движения планет, используя теорию классической механики и учитывая взаимодействие планет,— это знаменитая проблема  $n$  тел. Получаем систему дифференциальных уравнений, решение которых дает возможность предсказывать положение различных планет в определенные моменты. Но в этой системе некоторые параметры остаются неизвестными: отношения масс различных планет и Солнца и точ-

ное определение абсолютного времени. Вопрос в следующем: можно ли описать наблюдаемое движение, выбирая надлежащим образом соотношения масс и уточняя используемую меру времени?

Ответ известен: единственное значительное отклонение заключается в том, что перигелий Меркурия смещается по отношению к теоретическому значению на 43 секунды в столетие. Таким образом, время, соответствующее абсолютному времени механики, может быть определено при помощи рассчитанных теоретически орбитальных движений планет и их спутников.

Успехи в изучении близлежащих к Земле систем настолько замечательны, что многие поверили в окончательность и неоспоримость законов и понятий классической механики, описывающей нашу физическую Вселенную. Однако окончательных законов в строгом смысле не существует. Существует лишь приближение между идеальным математическим миром и некоторыми аспектами чрезвычайно сложного физического мира, но полное тождество отсутствует. Никогда не было и не будет кризиса той или иной физико-математической теории; кризис существует лишь в умах тех, кто метафизически переоценивает схему, порожденную наукой. Существует просто открытие новых явлений или более глубокое осмысление уже известных, показывающее, что первоначальные схемы непригодны для описания новых аспектов опыта.

Время классической механики — довольно неудачно названное абсолютным — не избежало участи, которая присуща и другим научным понятиям. В статье Жана Делейе описан эффективный способ его определения и нахождения и указана точность, которая при этом достигается. Независимо от будущих успехов, по самой природе вещей точность определения не может быть беспредельной. Авторы других статей стремятся показать, что понятие абсолютного времени недостаточно для правильного понимания сущности наблюдаемого на опыте мира. Эйнштейн показал, что понятие времени, не зависящее от системы отсчета, в которой оно наблюдается, неприменимо к нашему миру, где скорость сигналов ограничена. Квантовая физика выявляет другие недостатки. Но самое удивительное — то, что свойства нашего мира позволили человеческому разуму открыть столь простую схему клас-

сической механики, которая дает возможность охватить громадную область явлений, наблюдаемых на опыте. Мы вправе утверждать, что развитие наук было бы серьезно заторможено, если бы такая схема не нашла широкого применения.

ЖАН ДЕЛЕНЕ

## АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ

В двух предыдущих статьях было показано, что время не может быть измерено непосредственно; оно доступно лишь постольку, поскольку мы можем заметить изменения в окружающей нас части Вселенной. Измерение времени возможно в результате наблюдения за развитием материальных явлений. Для этого необходима теория развития подобных явлений: другими словами, последовательные фазы развития должны определяться измеримыми параметрами, являющимися известными функциями переменной величины, называемой временем. Только в таком случае наблюдаемое явление может считаться часами<sup>1</sup>.

Движения, происходящие по законам механики, представляют собой именно такие явления, поскольку они проявляются в изменениях параметров, определяющих положение движущегося тела в пространстве. Законы механики позволяют представить подобные изменения в зависимости от переменной, обозначенной через  $t$ , определение которой неявно содержится в основном законе динамики

$$\vec{F} = \frac{m d^2 \vec{M}}{dt^2}$$

и которую мы назовем механическим временем.

### Планетные часы

Движения небесных тел (планет и спутников) Солнечной системы оказываются стабильными в силу законов механики и тех условий, в которых они проявляются.

---

<sup>1</sup> Под часами здесь понимается любое явление, могущее служить для отсчета времени. Такое словоупотребление широко распространено в науке. Например, любые биологические ритмы называют биологическими часами.— *Прим. ред.*

Легко найти силы, определяющие эти движения; они сводятся к ньютоновским силам с учетом нескольких поправок на малые отклонения, вытекающих из релятивистской механики<sup>1</sup>. Силами торможения можно пренебречь. В результате классическое описание оказывается применимым с большой степенью точности. В данном случае движения почти периодические и можно с большой точностью определить медленное изменение их периода. Наконец, наблюдения многих поколений астрономов позволяют определить численные значения постоянных, которые входят в выражения величин, являющихся функциями от времени. Описанные выше особенности, присущие движениям планет, дают возможность ввести надежные системы отсчета для времени.

Но позволяют ли они достигнуть требуемой точности? Каким способом определяется единица для выражения непрерывных промежутков времени? Астрономия, в частности, изучает эти проблемы, так как, если рассматриваемые движения имеют некоторые описанные выше преимущества, их теория всегда может и должна рассматриваться как допускающая улучшение либо в результате учета слабых возмущающих эффектов, которыми ранее пренебрегали, либо в результате уточнения численных значений констант, характеризующих каждое движение. Теорию движения планет никогда нельзя считать законченной: можно лишь сказать, что в рассматриваемую эпоху эта теория достаточно разработана, чтобы учитывать все основные наблюдаемые эффекты.

### *Время эфемерид*

Если известна теория, которая, как мы только что видели, является существенно приближенной, то для ряда значений переменной  $t$  в соответствующем масштабе можно вычислить значения величин, определяющих положение движущегося тела; результат такого вычисле-

---

<sup>1</sup> Релятивистской называется механика теории относительности, справедливая при сколь угодно больших скоростях. В предельном случае скоростей, малых в сравнении со скоростью света, она переходит в классическую механику Ньютона. Отклонения от последней, происходящие от того, что отношение скорости движения к скорости света не бесконечно мало, дают релятивистские поправки.—Прим. ред.

ния называется эфемеридой движения рассматриваемого объекта. Измерение значения одной из этих величин в определенный момент позволяет с помощью обратной интерполяции для эфемериды узнать значение переменной  $t$  в этот момент. Так как теория лишь приближенная, то эта величина не совпадает точно с механическим временем для данного момента — назовем ее эфемеридным временем наблюдаемого небесного тела.

Если рассматривать одновременно несколько планетных движений, то в идеальном случае, когда учитываются все действующие силы, каждое из этих движений дало бы способ измерения единого механического времени, но фактически оно определяет время своей собственной эфемериды. Различные масштабы времени, определяемые таким путем, оказываются несогласованными. Однако изучение отклонений при переходе от одной эфемериды к другой способствует улучшению теорий, а наиболее разработанные теории в конечном счете должны определять масштабы времени, которые в пределах достигаемой точности соответствуют друг другу. Каждая из эфемерид характеризует свой масштаб, который можно назвать временем эфемериды; совокупность эфемеридных времен дает наилучшее для данной эпохи приближение к механическому времени.

Введенное таким образом понятие времени эфемерид остается весьма абстрактным: оно не удовлетворяет практическим нуждам метрологии. Необходим единый эталон движения. По этой причине эфемеридное время условно определяется через эфемериду Солнца; впрочем, все, что мы сейчас сказали, хорошо иллюстрируется тем, что на практике эфемеридное время измеряется по движению Луны, поскольку только так можно достигнуть наибольшей точности.

### *Земля как пример нерегулярно идущих часов*

До сих пор мы рассматривали лишь орбитальные движения. Так как теория движения тела вокруг своего центра тяжести может быть получена в рамках основных законов механики, то а priori для нахождения механического времени можно использовать суточное враще-



ние Земли. Обычно определяемое таким путем время называют земным; говоря более точно, универсальное время при соответствующем выборе масштаба выражается через земное время.

Механическое время впервые было определено по земному времени. Земное время было принято за основу, поскольку считалось, что Земля равномерно вращается вокруг своей оси. Постоянство угловой скорости вращения Земли сначала рассматривалось как постулат, но затем было доказано применением к Земле теории Эйлера, позволяющей изучить вращение твердого тела вокруг своего центра тяжести. В результате было установлено, что мгновенная ось вращения движется одновременно относительно фиксированной пространственной системы отсчета (прецессия и нутация) и системы отсчета, связанной с Землей (движение полюса), но абсолютная величина угловой скорости вращения с течением времени не меняется.

Применение теории Эйлера к Земле неявно основывается на двух гипотезах: 1) силы, с которыми Солнце и Луна действуют на Землю, чисто гравитационные; 2) Земля рассматривается как твердое тело.

Очевидно, вторая из этих гипотез может быть лишь приближенной: Земля покрыта водой (океаны) и газом (атмосфера), движения которых легко заметны. Более того, та часть, которая нам кажется твердой и в которой сосредоточена основная масса, в действительности обладает упругостью (ее упругость сравнима с упругостью стали), а в сферических слоях земной коры, возможно, существуют перемещения масс, влекущие за собой изменения общего момента инерции. Реальные условия, таким образом, далеки от гипотез Эйлера: движения мгновенной оси, предсказываемые Эйлером, на самом деле оказываются измененными и, более того, постоянство угловой скорости вращения также всего лишь приближенное.

Если бы была создана достаточно точная теория изменений скорости вращения Земли и движений мгновенной оси, то можно было бы подсчитать эфемериды земного вращения, но в большинстве случаев строго проанализировать причины этих явлений не удастся. Сравнение земного времени со временем эфемерид позволяет выявить подобные изменения, а сравнение с атомным вре-

менем дает возможность продолжить их изучение со все возрастающей точностью.

Изменения угловой скорости вращения Земли бывают трех видов: монотонно изменяющиеся, периодические или почти периодические и случайные. Монотонные изменения происходят очень медленно; периодические или почти периодические, как и случайные колебания, имеют малую амплитуду. Не удивительно, что гипотеза равномерного вращения Земли существовала долгое время, не мешая развитию небесной механики.

Интересно отметить, что астрономы, вынужденные создать гипотезу равномерного вращения Земли, не питали почти никаких иллюзий: Кеплер неоднократно намекал на возможность изменений земного вращения, а Лаланд в 1771 году писал, что вращение Земли предполагается равномерным потому, что еще не были замечены явления, указывающие на какую-то неравномерность, но неравномерность вращения Земли может достигать до 2—3 секунд в год и оставаться при этом незамеченной.

Сравнение шкалы времени, вычисленной согласно гипотезе о равномерном вращении Земли, со шкалой, определяемой по орбитальным движениям, проводилось начиная с 1695 года. Именно тогда Галлей сравнил происходившие ранее затмения Солнца, упоминавшиеся в альмагесте, то есть в летописях, отражающих наблюдения арабов в конце IX века, с наблюдениями своего времени и показал, что те и другие соответствуют друг другу только в том случае, если к теоретической формуле для выражения долготы Луны прибавить дополнительный вековой член<sup>1</sup>, пропорциональный квадрату времени и, следовательно, имеющий вид  $st^2$ . Значения коэффициента  $s$ , вычисленные на протяжении XVIII века, подтвердили существование дополнительного эффекта, открытого Галлеем.

Естественно в первую очередь связать подобное отклонение с эфемеридой Луны, а следовательно, с теорией

---

<sup>1</sup> Вековыми (секулярными) в небесной механике (и вообще теории периодических движений) называются малые члены, длительное время не меняющие своего знака, то есть практически непрерывно возрастающие по величине со временем.— *Прим. ред.*

ее движения. Этой проблемой занимались многие математики; в частности, ее решение нашел Лаплас.

Изучая теорию движения спутников Юпитера, Лаплас показал, что вековое изменение эксцентриситета орбиты Юпитера аналогичным образом влияет на среднее движение его спутников. Возмущения орбитального движения Земли, вызванные притяжением других планет, приводят к медленному изменению эксцентриситета земной орбиты. Происходящее от этого ускорение среднего движения Луны приводит к тому, что в выражении ее долготы как функции времени появляется член вида  $st^2$ . Из-за ошибки в числовой величине  $s$  проблема сначала казалась решенной, однако вычисления, проведенные в XIX веке, в частности Адамсом и Делоне, показали, что явление, открытое Лапласом, хотя несомненно существует, но объясняет эмпирический эффект, обнаруженный Галлеем, лишь наполовину.

В 1857 году Хансенom были опубликованы новые таблицы движения Луны. Чтобы эти таблицы, наиболее полно представляющие наблюдения Луны с 1750 по 1850 год, соответствовали наблюдениям древних астрономов, составитель таблиц, кроме уже рассматривавшегося векового ускорения, должен был ввести еще и периодические члены, которые были чисто эмпирическими.

Скоро было замечено, что эти члены не соответствуют наблюдениям, проводившимся после 1850 года. В начале нашего столетия Ньюкомб и одновременно Браун построили новую теорию движения Луны. Ньюкомб показал, что возникшие трудности могут быть преодолены лишь в том случае, если вращение Земли не рассматривать как равномерное и если именно этой неравномерности приписывать остававшиеся необъяснимыми теоретические расхождения, которые ранее связывались с движением Луны, другими словами, если не отождествлять земное время с механическим временем.

Так как все астрономические наблюдения проводились по земному времени, все неравномерности последнего должны отражаться не только в наблюдаемом (и, следовательно, фиксируемом) движении Луны, но и в совокупности движений планет; это дает возможность проверить гипотезу Ньюкомба. Окончательно проверил гипотезу Ньюкомба Спенсер Джонс (1939), и в настоящее время можно считать установленным следующее:

а) кажущееся вековое ускорение движения Луны сопровождается неоднородностями той же природы в движениях Солнца, Меркурия и Венеры, и причина этого связана с монотонным замедлением вращения Земли;

б) скорость такого замедления непостоянна;

в) флуктуации, которым сначала приписывался периодический характер (вспомните таблицы Хансена) и которые небесная механика объяснить не могла, также связаны с вращением Земли;

г) в действительности эти флуктуации не периодические, а случайные. Скорость вращения Земли уменьшается в среднем так, что день удлиняется на 0,002 секунды в столетие. Флуктуации существеннее, чем замедление, но их эффект не накапливается в течение длительного времени.

Еще Кант обратил внимание на то, что торможение вращения Земли морскими приливами и отливами и связанное с этим рассеяние энергии — возможная причина векового замедления вращения Земли; рассеяние энергии, соответствующее наблюдаемому вековому ускорению изученных орбитальных движений<sup>1</sup>, равно  $10^{12}$  дж/сек. Если подсчитать рассеяние в результате торможения океанскими приливами и отливами, получается  $10^9$  дж/сек, то есть в тысячу раз меньше.

Однако в неглубоких морях ограниченной формы, где скорость приливов велика, а трение у дна и у берегов имеет различный характер, условия совершенно иные. Тэйлор показал, что только Ирландское море приводит к потере энергии, равной  $3 \cdot 10^{10}$  дж/сек. Переноса подобные расчеты на большое число морей и заливов, Джеффрис получил полное рассеяние, порядок величины которого служит достаточным оправданием гипотезы Канта.

Объяснение флуктуаций не столь просто. В качестве возможной причины указывалось на внезапные изменения момента инерции Земли. Успехи, достигнутые в создании часов (сначала маятники при постоянных температуре и давлении, затем кварцевые часы и, наконец, атомные и молекулярные эталоны частоты), позволяют сравнивать земное время с наиболее равномерными эталонами времени и, как мы увидим в дальнейшем, дают

---

<sup>1</sup> Речь идет о кажущемся ускорении движения других небесных тел, что объясняется в действительности замедлением вращения Земли.— *Прим. ред.*

возможность провести значительно более полный анализ возникающих неравномерностей.

Начатые в то время, когда меридианный круг был единственным инструментом для измерения астрономического времени, эти сравнения постепенно стали значительно более точными (рис. 2), в частности, благодаря

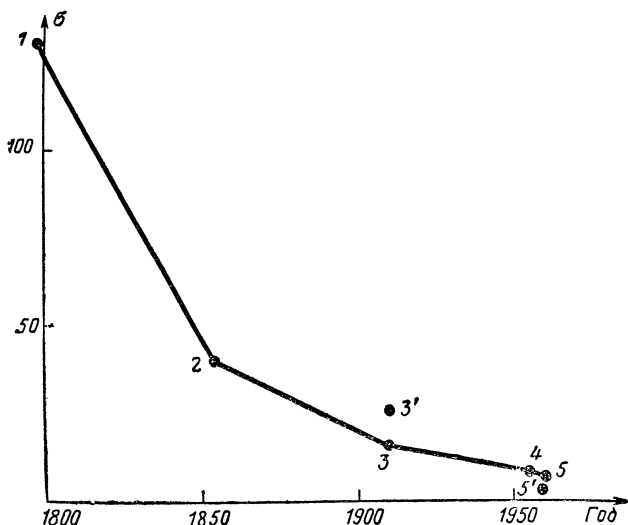


Рис. 2. Эволюция точности измерения земного времени;  $\sigma$  — средняя квадратичная ошибка в миллисекундах.

1 — определение по Солнцу (1797 г.), меридиан фиксируется одной нитью; 2 — определение по Солнцу (1855 г.), меридиан фиксируется 10 нитями; 3 — определение по 10 звездам (1920 г.), микрометр с подвижной нитью, меридианный круг с фокусным расстоянием 2,4 м; 3' — определение по 10 звездам (1920 г.), микрометр с подвижной нитью, меридианный круг с фокусным расстоянием 0,75 м; 4 — определение по 22 звездам (1955 г.), микрометр с двойным изображением, астролябия 00; 5 — определение по 28 звездам (1957 г.), микрометр с двойным изображением, астролябия OPL 01; 5' — «исправленное» значение 5.

использованию современных астрономических инструментов. Сравнение земного времени, измеренного с помощью меридианного круга, со временем, измеренным с помощью самых совершенных инструментов — маятниковых часов при постоянных температуре и давлении и первых кварцевых часов, — уже в 1937 году показало, что сезон-

ные, почти периодические флуктуации вращения Земли в среднем за год приводят к изменению продолжительности дня на 0,002 секунды. Сравнение земного времени (измеренного с помощью астролябии) с атомным временем позволило Данжону (1959) обнаружить слабые частые флуктуации угловой скорости вращения Земли, имеющие гравитационное происхождение. Некоторые астрономы полагают, что «большие» флуктуации, аналогичные введенным Хансеном и подтвержденным Ньюкомбом, могли бы возникнуть в результате сложения более слабых и частых флуктуаций, возникновение которых имеет случайный характер.

Таким образом, невозможно построить эфемериду земного вращения с точностью, превышающей  $10^{-7}$ ; это предельная точность, которая может быть достигнута при определении времени по земным часам.

### *Использование Солнца в качестве теоретических часов*

С точки зрения потребностей современной метрологии земное время приводит к значительным неточностям. По этой причине в 1956 году Международное бюро мер и весов отказалось от старого определения единицы времени — секунды, которая определялась как  $1/86\,400$  продолжительности среднего солнечного дня, то есть как определенная доля промежутка времени, связанного с вращением Земли. Решено было ввести единичный промежуток времени, определяемый по орбитальному движению. За основу был выбран тропический год<sup>1</sup>. Тропический год определяется периодом вращения центра тяжести системы Земля — Луна вокруг Солнца. Его продолжительность постепенно меняется из-за возмущений, оказываемых на рассматриваемое движение планетами, поэтому пришлось уточнить, для какого времени рассматривается тропический год, определяющий секунду.

Было принято следующее определение: *секунда — это  $1/31\,556\,925,9747$  длительности тропического года для 0 января 1900 года, в 12 часов времени эфемерид*. Здесь требуется несколько пояснений. Во-первых, знаменатель дроби, определяющий длительность секунды, может пока-

---

<sup>1</sup> Период между двумя прохожденьями Солнца через точку весеннего равноденствия. — *Прим. ред.*

заться излишне сложным: фактически речь идет о числе, с которым часто приходится иметь дело в астрономии и которое желательно сохранить неизменным. Во-вторых, для неспециалиста неясно, почему именно тропический год берется в качестве эталона. Дело в том, что речь идет о моменте, близком началу тропического 1900 года, для которого средняя долгота Солнца равна  $279^{\circ}41'48'',04$ ; в календаре этот момент приходится на 31 декабря 1899 года и близок к 12 часам универсального времени. Поэтому условились, что в новом масштабе, названном масштабом времени эфемерид, это будет точно 12 часов.

Таким образом время эфемерид определяется годичным движением системы Земля — Луна вокруг Солнца, или, наоборот, кажущимся годичным движением Солнца вокруг Земли. Поэтому наблюдение за положением Солнца позволяет определить время по эфемериде. В действительности это наблюдение слишком неточно, чтобы служить практическим методом измерения времени, и его заменяют наблюдением за положением Луны на своей орбите, так как время эфемериды Луны связано с временем эфемериды Солнца. Однако точность измерения остается еще недостаточной, и новое определение секунды, хотя и удовлетворительное с теоретической точки зрения, остается пока в какой-то мере абстрактным.

### *Атомное время*

Время эфемерид удовлетворяет астрономов, так как их основная задача — указать моменты наблюдений в масштабе времени, протекающего как можно более равномерно и обеспечивающего постоянство определения времени в астрономических масштабах. У физиков иные потребности. Они интересуются не хронологией, а хронометрией: измеряемые ими промежутки времени слишком коротки, а начальные и конечные моменты этих промежутков должны сопоставляться друг с другом исключительно точно, тогда как для универсального времени нет необходимости определять начальные моменты с такой же точностью.

Учитывая это, лаборатории основных хронометрических измерений и обсерватории, занимающиеся измерением времени, в последние годы объединили свои усилия, с тем чтобы связать с секундой времени эфемерид период

излучения, соответствующий переходу между определенными уровнями энергии атома цезия с атомным весом 133. Можно считать, что эти усилия увенчались успехом и скоро мы получим новое определение секунды, которое уже не будет связано с какими-либо астрономическими данными: секунда будет определена как промежуток времени, соответствующий 9 192 631 770 периодам указанного выше излучения.

Так как ошибка при установлении соответствия между этим промежутком времени и секундой эфемерид равна лишь нескольким периодам, новая секунда будет очень близка к секунде эфемерид, но все же не будет в точности равна ей. Появится очень небольшое расхождение хода у атомных и солнечных часов, которое смогут заметить астрономы, поскольку хронология в противоположность хронометрии всегда будет одним из разделов их науки.

БЕРНАР КАНЬЯК

## АТОМНЫЕ ИЛИ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЧАСЫ

В предыдущей статье Жан Делейе показал, как трудно, выходя за рамки простого эмпирического понятия протекающего времени, определить и измерить это неземное и недоступное непосредственному восприятию время. Чтобы вычислить теоретический параметр, который называется временем, нужно воспользоваться законами движения тел (законами механики).

На практике обычно наблюдаются движения небесных тел, так как благодаря большим массам и огромным расстояниям законы их движения становятся относительно простыми и точными. Мы делаем оговорку «относительно», так как в подробной статье Делейе показано, сколь сложными оказываются проблемы, возникающие при попытках достигнуть определенной точности.

Если с глубокой древности время определяли по движению небесных тел—об этом свидетельствуют солнечные часы, найденные при раскопках самых древних цивилизаций,—то позднее появилась потребность иметь более доступные часы и измерять короткие промежутки времени. Так, к 1500 г. до н. э. в египетских дворцах появляются первые водяные часы. Вплоть до конца XIII века



гидравлические часы (греческие клепсидры, средневековые песочные часы и т. д.) были единственным, с теми или иными модификациями повсеместно используемым механизмом для измерения времени.

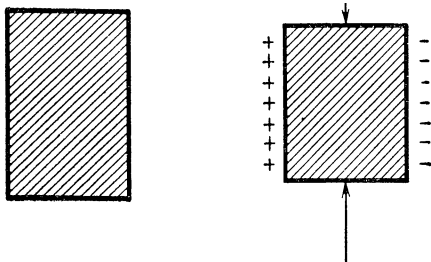
В начале XIV века появляются часы с колесами, которые используют инерцию балансира и систему спуска для регулирования вытекания воды или опускания груза. В начале XVI века, повторяя в миниатюре тот же прием, слесарь из Нюрнберга изготовил первые переносные пружинные часы — прообраз современных ручных часов.

Но первый большой успех в искусстве создания часов был достигнут в конце XVI века в результате наблюдений Галилея за движением маятника. Галилей установил, что периодическое движение маятника, свободно колеблющегося под действием силы тяжести, в высокой степени равномерно. Он решил, что измерять время можно не только по движениям небесных тел, имеющим очень большие периоды, но и путем наблюдений за движениями маятников, имеющими короткие периоды.

Поскольку движение маятника, предоставленного самому себе, всегда более или менее быстро затухает, нужно непрерывно восполнять энергию, которую маятник постепенно теряет вследствие трения. Применение системы анкерного спуска позволило передавать маятнику энергию пружины или груза, не изменяя его собственный период. Так были созданы часы с маятником, или маятниковые часы; в дальнейшем они постепенно совершенствовались и точность их все более возрастала. Международное бюро времени до сих пор использует для проверки времени маятниковые часы, установленные в подвалах Парижской обсерватории, где они надежно укрыты от внешних возмущений.

### *Кварцевые часы*

После того как для измерения времени удалось вместо движения небесных тел воспользоваться периодическим движением маятника, естественно было предположить, что среди явлений природы существуют другие быстрые периодические очень равномерные процессы, которые можно было бы использовать для этой цели. Действительно, для измерения времени уже в течение нескольких де-



Нормальный кристалл

Сжатый кристалл

Рис. 3. Пьезоэлектрические свойства кварца.

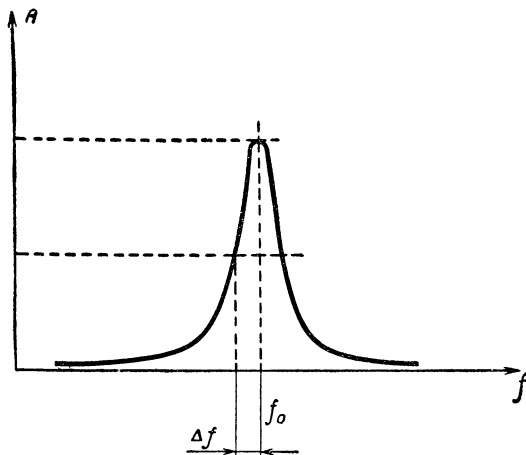


Рис. 4. Электрический резонанс,  $A$  — амплитуда колебаний кварца или электрического напряжения,  $f$  — частота электрического тока.

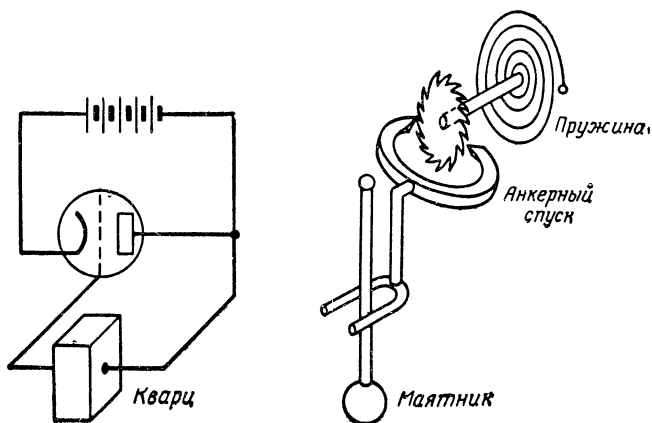


Рис. 5. Кварцевые и маятниковые часы.

сятков лет широко используются пьезоэлектрические колебания кристаллов кварца.

Явление пьезоэлектричества заключается в следующем: когда некоторые кристаллы сжаты и образующая их атомная решетка деформирована, то действие положительных и отрицательных электрических зарядов атомов взаимно не уничтожается. Кристалл становится электрически поляризованным, и между его гранями появляется разность потенциалов. Это явление обратимо: если к граням кристалла приложить разность потенциалов, он сжимается или расширяется.

Такое явление можно воспроизводить много раз в секунду; при этом частота возникающих механических колебаний кристалла совпадает с частотой приложенного переменного электрического напряжения.

При определенных частотах, связанных с формой и геометрическими размерами кристалла, в нем устанавливается режим колебаний, соответствующий наиболее высокой амплитуде. В этом случае говорят, что кристалл находится в резонансе. Частота резонанса кварца зависит от того, как он вырезан: используемые обычно величины лежат в пределах от нескольких килогерц до десяти мегагерц.

Если учитывать лишь электрические явления, то можно сказать, что кристалл ведет себя как резонансный контур с индуктивностью и емкостью, какие обычно используются в радиотехнике. Для кварца, как и для любого контура, можно определить добротность  $Q$ , характеризующую также резонансную амплитуду в центре кристалла (если частота резонанса в точности равна  $f_0$ , то электрическое напряжение оказывается в  $Q$  раз больше, чем при частотах, значительно отличающихся от  $f_0$ ) и ширину резонанса, то есть смещение частоты  $\Delta f$  по отношению к частоте  $f_0$ , при котором амплитуда уменьшается примерно наполовину. Можно показать, что относительное смещение частоты равно обратной величине добротности:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}.$$

В то время как добротности, обычно достигаемые в классических резонансных контурах, не превышают нескольких сотен, наиболее употребительные кварцы име-

ют добротность порядка 10 000. Удастся изготовить даже кристаллы кварца с добротностью, превышающей миллион. Применение кварца позволяет значительно повысить точность определения частоты.

Итак, кварц представляет собой колебательную систему, имеющую строго определенную собственную частоту. Как и в случае маятниковых часов, здесь нужен постоянный приток энергии для компенсации затухания; в данном случае источником энергии служит высоковольтное электропитание или батареи, заменяющие пружину или грузы наших традиционных часов. Передача энергии осуществляется при помощи классической радиолампы или транзистора, включенных в контур с кристаллом кварца и играющих ту же роль, что и анкерный спуск у часов. Получается электрический осциллятор большой стабильности. Чтобы получить настоящие кварцевые часы, достаточно добавить к нему устройство для отсчета периодов.

Какова же наибольшая возможная точность таких часов?

Прежде всего отметим, что необходимо поддержание постоянной температуры кварца, так как частота резонанса заметно меняется с температурой (термическое расширение кварца). Хорошо термостатированный кварц дает стабильность порядка  $10^{-5}$ — $10^{-6}$ , то есть наблюдаемые отклонения частоты не превышают одной сотысячной или одной миллионной доли самой частоты.

Если регулировать температуру с точностью до сотой доли градуса, а также строго контролировать напряжение питания и амплитуду колебаний, можно достигнуть стабильности частоты, которая для коротких промежутков времени равна  $10^{-10}$ , а для длинных — от  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$  (причем ограничивающим фактором здесь служит старение кварца). Это значит, что через год такие часы отстают или уйдут вперед приблизительно на одну секунду. Точность лучших астрономических часов лишь немногим меньше, поэтому астрономы только недавно стали применять для сравнения кварцевые часы.

### *Атомные часы*

Для того чтобы достигнуть значительного прогресса в изготовлении точных часов, необходимы частоты, более

стабильные, чем частоты колебаний кварца. В кварце используется смещение атомов внутри кристалла, тогда как для самих атомов эти явления остаются внешними. С конца прошлого века в связи с прогрессом спектроскопии стало известно, что для проведения очень точных измерений можно использовать внутренние явления в атомах и молекулах. Естественно, задумались над их применением для изготовления часов. Очень кратко напомним некоторые основные внутриатомные явления, а затем перейдем к рассмотрению атомных часов.

Атомы различных элементов состоят из центрального тяжелого ядра (размером порядка от  $10^{-13}$  до  $10^{-12}$  см), несущего положительный электрический заряд. Вокруг ядра на относительно большом расстоянии (порядка  $10^{-8}$  см) вращаются отрицательно заряженные электроны, число которых (атомный номер) характеризует каждый элемент. Ядро состоит из сложной системы частиц, свойства которых еще недостаточно изучены. В противоположность этому движение электронов вокруг ядра изучено достаточно хорошо; в некоторой степени оно похоже на движение планет Солнечной системы вокруг Солнца (в обоих случаях сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния). Эту аналогию не следует проводить слишком далеко: если классическая ньютоновская механика очень хорошо описывает макроскопические движения, относящиеся к случаю большого числа атомов или молекул (например, движения, наблюдаемые в земном масштабе, а также движения небесных тел), то она неспособна правильно описывать движения элементарных частиц. Последние описываются другой, более абстрактной теорией — квантовой механикой.

### *Энергетические уровни и электромагнитное излучение*

В квантовой механике свойства системы частиц не изменяются непрерывно. Система может находиться в дискретных состояниях, число которых счетно и каждому из которых соответствует своя энергия  $W$ . С помощью теории находят различные возможные состояния и различные энергетические уровни системы. Как и всегда, самыми стабильными оказываются состояния с наиболее низкой энергией.

Атомная система, занимающая некоторый энергетический уровень  $W_1$ , в некоторых условиях может спонтанно совершать переход на другой уровень, энергия которого  $W_2$  меньше  $W_1$ ; при этом квант энергии  $\Delta W = W_1 - W_2$  переходит в энергию электромагнитного излучения. Известно, что электромагнитная волна с частотой  $f$  переносит энергию в виде конечных неделимых порций величины  $hf$ , называемых фотонами ( $h$  — универсальная постоянная Планка, равная  $6,6 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек). Один из таких фотонов образуется при атомном переходе, а частота  $f$  испускаемой волны определяется из соотношения

$$\Delta W = hf.$$

И наоборот, если атомы, занимающие энергетический уровень  $W_2$ , облучаются волной с частотой  $f$ , то в результате поглощения фотона они могут совершить обратный переход на энергетический уровень  $W_1$ . В таблице читатели найдут главные области электромагнитных волн, определяемые по их частоте.

Точность частот, испускаемых и поглощаемых при внутриатомных переходах, зависит от точности определения энергетических уровней. У энергии каждого уровня имеется фундаментальная неопределенность, которая называется естественной шириной линии и связана с продолжительностью существования данного уровня. Но чаще эту точность ограничивают другие, более важные явления.

На самом деле энергетические уровни возмущаются влияющими на атом внешними воздействиями: электрическим или магнитным полем, столкновениями или присутствием других атомов. Чтобы максимально уменьшить эти воздействия, в большинстве случаев используют газобразные вещества при малом давлении или атомные пучки и стараются не пользоваться жидкими и особенно твердыми состояниями (в последнем случае энергетические уровни полностью искажены<sup>1</sup>; их изучением занимается физика твердых тел, получившая широкое раз-

---

<sup>1</sup> Советский физик Э. В. Шпольский открыл специальные условия, при которых энергетические уровни определенных молекул, вброшенных в твердое тело, оказываются неискаженными. — *Прим. ред.*

Средняя частота $f$ , $\text{МГц}$	Средняя длина волны	Специальное название каждой области	Применение	Атомные переходы, соответствующие разности энергий $\Delta W = hf$
0,1 1,0 10 $3 \cdot 10^3$ $10^4$ $10^5$ $4 \cdot 10^8$	3000 м 300 м 30 м 1 м 3 см 3 мм 0,75 мк	Длинные волны Средние » Короткие » Метровые, » Сантиметровые » Миллиметровые » Инфракрасные лучи	Радиовещание Телевидение Радиолокация Нагревание путем теплового облучения	Расщепление данного уровня на несколько близлежащих уровней в электрическом или магнитном поле Переходы между колебательными или вращательными состояниями молекул или переходы, соответствующие сверхтонкой структуре атомных спектров
От $4 \cdot 10^8$ до $7,5 \cdot 10^8$ $7,5 \cdot 10^8$	От 0,75 до 0,4 мк 0,4 мк	Видимый свет Ультрафиолетовые лучи	Химические реакции	Переходы электронов, наиболее удаленных от ядра и принимающих участие в химической связи
$3 \cdot 10^{11}$ $10^{13}$ $3 \cdot 10^{14}$	10А 0,3А 0,01А	Мягкие рентгеновские лучи Средние Жесткие	Медицинская рентгенография Промышленная рентгенография	Переходы электронов, близких к ядру и наиболее прочно с ним связанных
Более высокая частота	Длина волны меньших размеров	$\gamma$ -Лучи	Лучевая терапия	Внутренние переходы в атомном ядре

витие после второй мировой войны). Существует другое важное ограничение, причины которого не связаны со свойствами энергетических уровней. Это эффект Допплера — Физо, вызванный беспорядочным тепловым движением атомов или молекул: частота волны, испускаемая движущейся системой, неподвижному наблюдателю кажется измененной на относительную величину, равную скорости  $v$  системы (составляющей скорости в направлении распространения волны), деленной на скорость  $c$  распространения волн:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}.$$

Однако эти неопределенности зачастую достаточно слабы и в большинстве случаев не мешают с большой точностью определять частоты атомных и молекулярных переходов. Поэтому вместо традиционного эталона метра, хранящегося в бретейском павильоне, для сверхточных измерений стали применять длину волны  $\lambda = c/f$ , соответствующую переходу между уровнями энергии в атоме криптона.

Итак, в нашем распоряжении имеются высокостабильные частоты, более стабильные, чем частота кварца. Эти частоты можно применять для конструирования часов. Но при их использовании возникает следующая проблема: в момент перехода каждый атом ведет себя как осциллятор, колебания которого затухают за очень короткое время. Но для изготовления часов нужен единичный осциллятор, а не большой набор атомов, эффекты которых накладываются друг на друга. Кроме всего прочего, такой осциллятор должен функционировать непрерывно. Эту трудность можно преодолеть двумя способами — используя или регулируемые кварцевые часы, или мазеры.

### *Регулируемые кварцевые часы*

В первом способе используется кварцевый осциллятор, который стабилизируется с помощью устройства, подгоняющего его частоту к частоте атомного перехода.



На этом принципе работали первые атомные<sup>1</sup> часы, построенные Лайонсом в 1951 году. Была применена частота дипольного электрического перехода молекул газообразного аммиака, лежащая вблизи 23 870 Мгц. Собственные частоты кварца значительно ниже этой величины (порядка нескольких мегагерц), поэтому, чтобы получить такую высокую частоту, было использовано электронное устройство для сложения и умножения частот.

Волна, испускаемая таким новым осциллятором на очень высокой частоте (лежащей в области частот, применяемых в радиолокации), проходит через волновод, наполненный газообразным аммиаком. Если ее частота сильно отличается от частоты молекулярного перехода, то она проходит через волновод без ослабления; если же частота волны в точности равна частоте молекулярного перехода, то она частично поглощается находящимися на нижнем энергетическом уровне молекулами аммиака, которые переходят на более высокий уровень. Достаточно детектировать волну после ее прохождения через наполненный аммиаком волновод, усилить обнаруженный сигнал и использовать его для воздействия на параметр контура, в зависимости от которого плавно меняется частота колебаний кварца. Это классическая проблема регулировки.

При помощи таких аммиачных часов Лайонс получил гарантированную стабильность, превышающую  $10^{-8}$ . Это показывало, что метод пригоден, хотя и требует дальнейшего улучшения<sup>2</sup>.

В атоме цезия на частоте 9192,63183 Мгц существует очень подходящий переход; его использование особенно удобно, поскольку эта частота лежит в области радиолокационных волн длиной примерно 3 см, так что можно использовать серийно изготавливаемую аппаратуру. Для данного перехода рассматриваемый выше принцип был применен самим Лайонсом, а также Эссеном в Англии.

---

<sup>1</sup> Эти часы правильнее назвать молекулярными. Они основаны на принципе молекулярного генератора, который разработали выдающиеся советские ученые, ныне лауреаты Нобелевской премии Н. Г. Басов и А. М. Прохоров.— *Прим. ред.*

<sup>2</sup> В нашей стране молекулярный стандарт частоты, являющийся основой молекулярных часов, разработали В. В. Григорянц и М. Е. Жаботинский.— *Прим. ред.*

Но при этом газ был заменен атомным пучком, что дает два преимущества:

1. Если волна, испускаемая атомами, распространяется перпендикулярно направлению атомного пучка, эффект Доплера практически отсутствует.

2. Вместо того чтобы обнаруживать поглощение волны в газе, которое довольно слабо, можно обнаружить

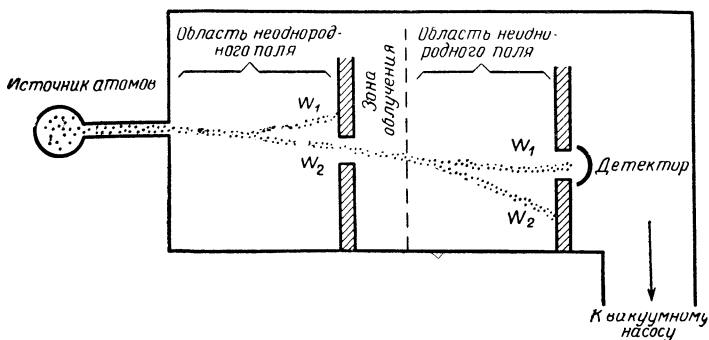


Рис. 6. Метод атомного или молекулярного пучка.

наличие атомов, испытавших переходы под действием излучения. С этой целью используют значительно более чувствительный метод, разработанный Раби (США) незадолго до войны.

Перед облучением атомы пучка проходят через сильно неоднородное магнитное поле, отклоняющее на различные углы атомы с различными магнитными моментами, которые находятся на уровнях энергии  $W_1$  и  $W_2$ . После того как траектории атомов двух типов разделяются, атомы с энергией  $W_1$  можно задержать, так что продолжать движение будут только атомы с энергией  $W_2$ . После зоны облучения пучок пересекает другое неоднородное поле, пропускающее лишь атомы с энергией  $W_1$ . Таким образом, если облучение соответствующей частотой не вызовет перехода с уровня  $W_2$  на уровень  $W_1$ , на выходе пучка не будет обнаружено никаких атомов.

В случае цезия получается частота с точностью, приблизительно равной  $10^{-9}$ . В США часы, работающие по этому принципу, — атомикрон — в течение нескольких лет выпускаются серийно.

Однако атомихрон уже устарел, так как сейчас изготовлены рубидиевые часы, точность которых достигает  $10^{-10}$ . Чтобы обнаружить атомный переход рубидия, в этих новых часах использована техника оптической накачки, разработанная во Франции Кастлером и Бросселем<sup>1</sup>. Атомихрон занимает целый шкаф, а рубидиевые часы благодаря новым техническим устройствам и успехам миниатюризации размещаются в небольшом чемодане.

### *Индукцированное излучение и мазеры*

Второе решение проблемы атомных часов заключается в использовании принципа мазера (Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation, то есть усилителя сверхвысокочастотных радиоволн на основе индуцированного излучения), открытого в США в 1955 году Таунсом<sup>2</sup>. Чтобы понять его принцип, нужно более подробно рассмотреть взаимодействие между излучением и веществом. Различают два вида испускания фотонов:

1. Спонтанное излучение, о котором мы говорили раньше, связано со временем существования верхнего энергетического уровня  $W_1$ . Атом занимает этот уровень в течение времени, которое случайным образом меняется от одного атома к другому и среднее значение которого называется временем жизни уровня. Как только истекает это время, атом спонтанно переходит на более низкий уровень  $W_2$ . Различные фотоны, испускаемые в этом процессе, распределяются во времени совершенно случайно и некогерентны между собой: получается не единая волна, а суперпозиция — наложение коротких волновых пучков, фазы которых меняются произвольно при переходе от одного к другому.

2. Индуцированное излучение происходит при облучении атомов волной, частота которой соответствует их энергии перехода. Мы указывали, что в подобных условиях атомы низшего уровня энергии  $W_2$  под действием волны могут совершать переход на более высокий уро-

---

<sup>1</sup> Метод оптической накачки широко используется в лазерах. Благодаря работам Н. Г. Басова и А. М. Прохорова наша страна занимает ведущее положение в этой области.— *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Одновременно и независимо это открытие было сделано в СССР Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым.— *Прим. перев.*

вень  $W_1$  с поглощением фотона. Волна может индуцировать также и обратный переход — с  $W_1$  на  $W_2$ , сопровождаемый испусканием дополнительного фотона. Индуцированное испускание возникает так же легко, как и поглощение, то есть вероятность вынужденного перехода одинакова для всех атомов независимо от того, находятся они на нижнем или на верхнем уровне энергии; эта вероятность пропорциональна интенсивности индуцирующего электромагнитного поля. Если бы вначале количество атомов, занимающих каждый из двух уровней энергии, было бы одинаково, то одинаковым было бы число испускаемых и поглощаемых фотонов, так что энергетический баланс был бы равен нулю. Но внутри системы атомов устанавливается температурное равновесие; на нижнем уровне атомы более многочисленны, чем на верхнем (их распределение подчиняется закону Больцмана). В результате больше фотонов поглощается, чем испускается; именно поэтому в аммиачных часах Лайонса наблюдается слабое поглощение излучения. Если же каким-либо путем удастся добиться того, чтобы на верхнем уровне было больше атомов, чем на нижнем, то испускаемых фотонов будет больше, чем поглощаемых, и энергия волны будет возрастать.

Кроме того, индуцированный фотон обладает чрезвычайно важным свойством — он идентичен фотону, который его индуцировал, то есть новый индуцированный пучок волн колеблется в фазе с индуцирующим пучком волн и распространяется в том же направлении.

Другими словами, атомный осциллятор, испускающий индуцированный фотон, когерентен с атомным осциллятором, который до этого испустил индуцирующий фотон. Если бы спонтанных переходов не существовало, а были бы лишь индуцированные переходы, все атомные осцилляторы были бы когерентны между собой; они были бы непрерывно связаны и колебались в одной и той же фазе. Хотя число осцилляторов очень велико и каждый из них в отдельности очень быстро затухает, вся система была бы эквивалентна одному непрерывно функционирующему осциллятору. Сразу же ясно, насколько выгодно использовать это явление: можно создать условия, когда индуцированные переходы будут происходить чаще, чем спонтанные (особенно легко это достигается в области радиоволн).

Современные лазеры работают в области сантиметровых или миллиметровых волн (радиолокационные волны), которые можно передавать по волноводам<sup>1</sup>. Волновод, по которому распространяется усиливаемая волна (обладающая частотой выбранного атомного перехода), оканчивается подобранным в соответствии с данной частотой резонатором — закрытой металлической коробкой с идеально отражающими стенками. Геометрические размеры резонатора подбираются таким образом, что при отражениях волн выбранной длины они усиливают друг друга и создают внутри резонатора электромагнитное поле очень большой амплитуды (стоячие волны).

Этот резонатор играет такую же роль, что и классический резонансный контур с емкостью и индуктивностью; амплитуды напряжения электрического и магнитного полей увеличиваются в соответствии с величиной добротности  $Q$ . Но резонатор не дает никакого усиления в обычном смысле слова, так как электрическая энергия лишь накапливается в нем без какого бы то ни было увеличения мощности. Добротность таких резонаторов достигает нескольких тысяч или даже сотен тысяч. При помощи падающей волны резонатор позволяет получить достаточно интенсивное электромагнитное поле, которое может вызвать среди заполняющих резонатор атомов много актов индуцированного испускания (значительно более частых, чем спонтанное испускание).

Если же использовать устройство, позволяющее добиться того, что большинство атомов в резонаторе будет находиться на верхнем энергетическом уровне, то число поглощаемых фотонов пренебрежимо мало. Индуцированно испускаемые фотоны, которые находятся в фазе с начальной волной и число которых пропорционально ее интенсивности, теперь уже действительно усиливают волну и увеличивают ее энергию. Второй присоединенный к резонатору волновод позволяет отвести усиленную волну.

Такие усилители начинают широко применяться как по причине их частотной селективности, так и из-за их слабого шума. Высокая селективность усилителей, использующих атомные переходы, позволяет применить их для измерения времени — достаточно превратить усили-

---

<sup>1</sup> По принятой в нашей стране терминологии — волны СВЧ (сверхвысоких частот). — *Прим. ред.*

тель в осциллятор. Это классическая операция, и всякий, кто хоть немного занимался электроникой, знает: при конструировании высокоэффективного усилителя приходится специально заботиться о том, чтобы избежать самовозбуждения, при котором часть получаемого электрического напряжения поступает обратно на вход вследствие влияния паразитных индуктивностей. Итак, достаточно, чтобы мазер усиливал лишь настолько, чтобы происходило «самовозбуждение» и возникали самоподдерживающиеся колебания с точной частотой атомного перехода. Так получают атомные часы.

Мазер Таунса был основан на использовании такого же дипольного электрического перехода молекул газобразного аммиака ( $23\,870\text{ Мгц}$ ), как и в случае первых регулируемых кварцевых часов. Чтобы рассортировать молекулы по их энергетическим уровням, Таунс использовал метод молекулярного пучка, совершенно подобный методу атомного пучка, о котором уже говорилось выше, с той лишь разницей, что так как здесь используется электрический дипольный переход, то в различных состояниях молекула обладает разными не магнитными, а электрическими моментами. Поэтому вместо неоднородного магнитного поля, применявшегося для атомов цезия, используется неоднородное электрическое поле, позволяющее отклонять молекулы аммиака. В результате лишь молекулы, находящиеся на самых высоких энергетических уровнях, попадают в резонатор.

Когда Таунс создал свой первый мазер, у него не оказалось достаточно точного осциллятора, чтобы проверить стабильность мазера; поэтому он был вынужден построить второй такой же мазер. Работая одновременно в течение многих часов, оба мазера оставались стабильными с точностью до  $10^{-10}$ .

Одна из основных причин, ограничивающих стабильность мазера,— изменение частоты, обусловленное самим резонатором: если частота резонатора лишь слегка отличается от частоты атомного перехода, то частота образующейся в нем волны смещена по отношению к частоте перехода на очень незначительную величину. Разумеется, это смещение много меньше, чем вызвавшая его разность частот, но пренебречь им нельзя, поэтому стабилизировать резонатор с достаточной точностью чрезвычайно трудно.

Существуют многие другие атомные переходы, которые можно использовать для создания мазеров, вместо того чтобы методом пучка сортировать атомы по их энергии. Известны способы для перевода большого количества атомов на верхний уровень энергии (импульсный магнитный резонанс, мазеры с тремя уровнями, оптическая накачка и т. д.). Но здесь невозможно описать все исследования, ведущиеся в области мазеров.

Укажем еще на применение лазеров (Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation — усиление света на основе, индуцированного излучения)<sup>1</sup>, основанных на принципах, аналогичных принципам действия мазеров. Однако лазеры излучают видимый свет, а не радиоволны; впрочем, точной границы между двумя областями не существует.

В настоящее время источники излучений двух данных видов находятся в стадии совершенствования. Они активно изучаются в связи с возможностями чрезвычайно разнообразных применений, и сейчас трудно предсказать конечные результаты (речь будет идти о точностях порядка  $10^{-12}$  или  $10^{-13}$ ). Будет ли способствовать применение подобных источников значительному улучшению техники измерения времени в сравнении с регулируемые кварцевыми часами? Это вполне возможно, но не так-то легко, если принять во внимание высокую степень точности новейших конструкций часов. Не нужно забывать, что уже сейчас можно построить часы с точностью  $10^{-10}$ ; это значит, что они в течение нескольких столетий отстанут или уйдут вперед лишь на одну секунду. Возможно, в скором будущем физики научатся измерять время точнее, чем астрономы, и единица времени будет определена при помощи атомных объектов, как это уже случилось с единицей длины.

Вы, вероятно, удивляетесь тому, что современная физика позволяет создавать молекулярные и атомные часы, в то время как понятие времени в масштабе элементарных частиц (см. статью Ленюйе) сильно осложняется. Между тем здесь никакого противоречия нет, так как для

---

<sup>1</sup> За создание лазеров и мазеров советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову присуждена Нобелевская премия.— *Прим. ред.*

измерения времени используют очень большое число частиц и основываются при этом лишь на их статистических свойствах.

БЕРНАР ДЕКО

## ПЕРЕДАЧА ВРЕМЕНИ

Измерение и сохранение времени не является самоцелью, а представляет интерес лишь тогда, когда мы можем использовать это время для бесчисленных применений.

Некоторые из применений могут осуществляться в непосредственной близости от часов, но в общем случае это уже не так — приходится передавать результаты измерения на более или менее значительные расстояния. Более того, сейчас возникает необходимость передавать время по широкоэвещательной сети во всемирном масштабе.

Укажем лишь некоторые случаи, когда передача времени играет первостепенную роль. Это прежде всего определение долготы, для чего в каждой точке земного шара нужно знать время начального меридиана. Определение местонахождения включает такое определение долготы; современные методы радионавигации позволяют ориентировать неизвестную точку по отношению к известным точкам, если известны результаты измерений времени распространения радиоволн. Космические исследования требуют точной синхронизации наблюдений, производимых в различных местах.

Наконец, точные измерения времени или частоты используются в самых различных областях: радиолокация, связь на больших расстояниях, навигация, управление, электронные вычисления и т. д. — все это в большей или меньшей степени опирается на передачу данных о времени. В повседневной жизни, например, движение транспорта требует, чтобы для всей транспортной сети часы, хотя бы с небольшой точностью, указывали одно и то же время. *Невозможно передавать информацию без точного контроля времени и частот, отсюда ясно, насколько существенно измерение промежутков времени в современной физике.*

Методы распространения данных о времени и передачи их на расстояния так же различны, как и сами приме-



нения, причем степень их точности определяется потребностями применений. Для многих устройств современной техники эта точность рассчитывается в микросекундах (миллионная доля секунды). Что касается расстояний, то долгое время из-за шарообразности Земли ограничивались пределом в 20 000 км, но эра космических путешествий расширяет эти границы до миллионов километров.

Самый древний метод передачи времени заключался в непосредственном переносе часов. Сначала песочные часы, затем хронометры мореплавателей в течение многих веков были единственными инструментами такого рода. Но они находились в личном пользовании, и пришлось ждать изобретения телеграфной связи для того, чтобы передавать время сразу большому числу потребителей. Проблема передачи времени заключается в передаче по проводам или без проводов сигналов точного времени для определения моментов, установленных взаимным соглашением. Можно также управлять на расстоянии угловым положением стрелок часов. Описанные способы позволяют передавать на расстояние сведения о том, какой момент показывает «хранитель времени».

Но есть иной, более простой и точный способ — передавать лишь ход (или скорость) прибора, измеряющего время, а сам промежуток времени определять интегрированием от начального момента (который в свою очередь также нужно передавать каким-либо способом). Это осуществляется, например, в часах, стрелки которых передвигаются шаг за шагом по электрическому сигналу.

Принцип передачи хода получил широкое распространение, когда стали использоваться переменные токи очень высокой стабильности: передача таких токов по проводам или при помощи радиоволн решала проблему с замечательной простотой и точностью.

### *Некоторые виды передач данных о времени*

Обрисовав, таким образом, в общих чертах возможные способы передачи и распространения времени, посмотрим, как они были использованы в реально существующих системах.

**Транспортировка часов.** Точность пружинного хронометра, каким бы совершенным он ни был, невозможно

существенно повысить. Однако поддержание постоянства колебаний с помощью транзисторов (например, хроно-стат Леруа) или замена обычной пружины миниатюрной (например, аккутрон Булова) позволили модернизировать этот широко распространённый механизм<sup>1</sup>. Были изготовлены кварцевые хронометры очень малых размеров, которые употребляют мореплаватели. Проводились многочисленные эксперименты по транспортировке атомных эталонов. Например, атомные часы, установленные в самолёте, совершили многократное путешествие вокруг Земли; при этом отклонение их хода не превысило нескольких микросекунд. Сконструированы многочисленные портативные модели, основанные на использовании атомного пучка или оптической накачки. В настоящее время это самый точный способ, позволяющий согласовать ход часов, расположенных в разных точках земного шара.

**Передача сигналов времени по проводам.** Более 100 лет назад на железных дорогах Франции использовалась собственная телеграфная сеть для передачи парижского времени на все провинциальные вокзалы.

В некоторых местах существуют городские часы, управляемые на расстоянии: отметим, в частности, Париж и Безансон, где точная передача времени осуществляется с помощью местных обсерваторий.

Тридцать лет назад Парижская обсерватория ввела в эксплуатацию звуковые часы. Это дало возможность осуществить исключительно точную передачу времени любому абоненту по телефону. Такие часы, у которых точность сигнала достигает нескольких тысячных долей секунды, представляют собой превосходный домашний хранитель времени. Иногда возникают дополнительные проблемы, так, например, в Швейцарии, где часть населения говорит по-немецки, а часть — по-французски, часы последовательно сообщают время на двух языках.

Как говорилось выше, в некоторых случаях передаются не ориентиры времени, а электрический ток со стабильной и вполне определенной частотой. Однажды включенный синхронный мотор, приводимый в движение

---

<sup>1</sup> Здесь в качестве примеров приводятся приборы, разработанные во Франции. Аналогичные конструкции, созданные в других странах, описываются в специальной литературе.— *Прим. ред.*

таким током, показывает точное время столь долго, сколь долго течет ток (при отсутствии износа — неограниченное время). Частота в сети переменного тока с большой точностью поддерживается на уровне 50 колебаний в секунду. Синхронные часы, включенные в эту сеть, идут очень точно. Передача специальных электрических токов эталонной частоты осуществляется, например, в Парижском районе, где Национальный центр по изучению телекоммуникаций передает по специальным телефонным линиям электрический ток, частота которого с точностью до одной миллиардной равна 1000 *гц*.

**Передача сигналов времени по радио.** Известно, что с помощью радио удалось решить проблему передачи времени и любой другой информации. Радио позволяет вести централизованную передачу, осуществляемую при помощи хранителя времени.

Различные методы передачи по проводам были перенесены в область радиотехники, но здесь возникли и новые возможности повышения точности.

Опыты передач по радио сигналов точного времени начали проводиться во Франции незадолго до 1910 года, но лишь с этого года стали осуществляться регулярные передачи с Эйфелевой башни. Сейчас в мире насчитываются сотни радиостанций, передающих сигналы точного времени. Большинство передач дается в определенные часы, но некоторые ведутся непрерывно специальными станциями. Используется широкий спектр частот; чаще всего пользуются волнами в диапазоне от десятков метров до километров. Несколько специальных станций большой мощности работают на волнах в десятки километров. Время каждой передачи проверяется обсерваториями, которые затем публикуют поправки. Эти поправки нужно прибавлять к передаваемому времени, чтобы получить точные его значения, поскольку момент, когда слушатель воспринимает позывные, не совпадает в точности с тем, который указывается распределяющими время часами. В передающей аппаратуре по разным причинам происходят запаздывания, а упомянутые выше поправки позволяют учесть их. Подобные явления возникают и в воспринимающей аппаратуре, здесь их также можно обнаружить. Самое большое запаздывание происходит из-за конечности времени распространения радиоволн, что особенно сказывается, если расстояния ве-

лики и требуется большая точность передачи. Запаздывание можно учесть, зная скорость распространения волн и проходимый ими путь. Время поступления сигналов точного времени при благоприятных условиях измеряется с точностью до стотысячной доли секунды. Время посылки сигналов при благоприятных условиях для значительных расстояний может быть определено с точностью до тысячной доли секунды.

В повседневной жизни самым практичным методом является передача звуковых сигналов времени по радио; этот метод более точный, чем сверка времени по городским часам. Можно указать также на возможность регулирования местных часов с помощью радио.

Для технических или научных нужд (лабораторные исследования, мореплавание, геодезия, астрономия и т. д.), где точность играет решающую роль, применяются новые методы.

Это прежде всего всемирная сеть станций, передающих эталоны частоты и времени. Обычно 15 таких станций непрерывно работают на строго отрегулированных известных частотах (2,5; 5 Мгц и кратных им) со звуковой модуляцией. Они служат эталоном для сигналов точного времени, обладающих очень высоким качеством. Устойчивая частота этих станций и высокая чувствительность приемных устройств позволили обнаружить возмущения принимаемой частоты, вызванные эффектом Доплера, возникающим в результате движений в ионосфере<sup>1</sup>. Так как эти возмущения по относительной величине могут достигать десятиmillionных долей частоты, их необходимо учитывать. Кроме того, условия распространения коротких волн, в частности для полярных районов, не всегда благоприятны.

Чтобы избавиться от различных помех подобного рода, передачи частот-эталонов ведутся на километровых и даже более длинных волнах. Для них эффект Доплера примерно в сто раз меньше, чем для коротких волн. Однако если желательна очень высокая точность, то его обязательно надо учитывать.

Новая система дает возможность для достижения наивысшей точности в измерении фазы передаваемых сигна-

---

<sup>1</sup> Речь идет о турбулентных движениях околоземной плазмы.—  
*Прим. ред.*

лов. Действительно, современные методы, основанные либо на наблюдении фазы на экране катодного осциллографа, либо на автоматической регистрации фазы, в большинстве случаев позволяют определить время приема с точностью до микросекунды и выше. Однако это не означает, что с такой точностью можно передавать время на расстояния, ведь истинное время прохождения волн известно лишь приблизительно. Путь их прохождения зависит от условий распространения; например, для волн длиной в десятки километров длительность прохождения днем и ночью отличается на величину, которая начиная с расстояний от 2500—3000 км возрастает примерно на 10 мксек на каждую тысячу километров расстояния. Напротив, для километровых волн при передаче в радиусе 2000 км заметной разницы между днем и ночью нет.

Используя благоприятные периоды, можно передавать ход хранителя времени с исключительной точностью. Опыты показали, что средняя величина экспериментальных ошибок при измерении частоты, определяемая по смещению фазы за 24 часа, в месяц не превышает нескольких стомиллиардных долей частоты. Сравнение этим методом атомных эталонов показывает, что конечная точность, определенная по среднемесячным значениям, имеет тот же порядок.

Этот способ позволяет с исключительно высокой точностью сравнивать хранители времени и автоматически регулировать кварцевые часы, находящиеся на больших расстояниях друг от друга. Именно таким образом постоянно сравниваются атомные эталоны в различных странах, чтобы после усреднения по различным значениям рассчитать атомное время. Исследование распространения очень длинных волн позволило определить, с какой точностью можно найти фазу и время прохождения таких волн. В частности, это очень важно для радионавигации. Большинство современных способов основано на измерении времени распространения волны, посланной известным передатчиком; впрочем, в действительности разность таких времен чаще всего измеряется для нескольких передатчиков. Точность определения пройденного пути зависит от точности измерения времени и от того, насколько точно известно время прохождения радиосигналов. Естественно, что подобные проблемы приобретают очень большое значение.

В связи с созданием космических кораблей возникает необходимость передачи радиоволн на очень большие расстояния. Это увеличивает значение радионавигационных методов. Более того, наблюдение за сверхбыстрыми космическими кораблями и управление их движением как с помощью оптических, так и радиотехнических средств требует строгой синхронизации станций слежения.

На Земле специальные системы передачи времени, обычно с ограниченными радиусами действия и с соответствующим образом выбранными волнами, имеют точность, превышающую микросекунду (способ Лоран С). Такая же точность достигается и в случае некоторых специальных искусственных спутников. Более того, при помощи спутников удалось с такой же точностью сравнить часы по обе стороны Атлантического и Тихого океанов.

### *Применение и сравнение сигналов точного времени*

Трудно оценить разнообразие применений сигналов точного времени, так как нет возможности провести общий статистический анализ. Но для частного случая статистические данные могут быть показательны. Так, число сигналов точного времени, использованных в течение Международного геофизического года (1957—1958), достигало одного миллиона. Чтобы эти сигналы могли быть использованы с большой точностью, необходима единая международная организация, которая бы обобщала измерения, проводимые для различных передатчиков, и публиковала соответствующие поправки. Роль такой организации выполняет Международное бюро времени, расположенное в Парижской обсерватории. Оно ежегодно регистрирует и измеряет около 50 000 сигналов точного времени, а также публикует результаты всех измерений, важные данные о вращении Земли, прохождении волн и т. д.

Очень точные измерения, относящиеся к излучению эталонов частоты, особенно для сверхдлинных волн, представляют собой операции такого размаха, что они, очевидно, должны опираться на международные организации, обеспечивающие сотрудничество и унификацию методов наблюдения и обработки. Мы уже подчеркнули роль Международного бюро времени в области передачи сигналов точного времени. Существуют и другие организа-

ции, такие, как Международное бюро мер и весов, Международный научный радиосоюз, Международный астрономический союз, Международный консультативный комитет радиосвязи.

### *Взгляд в будущее*

В будущем точность, необходимая для научного и технического применения сигналов точного времени, еще более возрастет. Микросекунда — эта цель современных исследований — скоро будет достигнута повсеместно, но ее будет уже недостаточно. Будут применены новые приемы, быть может, совершенно отличные от существующих.

Что касается передачи времени в повседневной жизни, то по этому поводу можно привести пример ведущихся сейчас изысканий, которые на первый взгляд могут показаться фантастическими. Речь идет о наручных звуковых радиочасах, заменяющих традиционные ручные часы. Микроминиатюризация электронных схем делает такое чудо технически осуществимым. Можно представить себе, что будут созданы бесшумные часы, стрелки которых укажут время по сигналу, переданному центральной радиостанцией. Все будет зависеть от изобретательности и искусства инженеров.

Таким образом, существует много способов передачи сигналов точного времени, но основная задача при этом — сравнение результатов: главная трудность состоит в том, чтобы правильно определить траекторию и время передачи сигналов, скорость которых всегда конечна.

*МИШЕЛЬ ХЕНОН*

### **ВОЗРАСТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

Во все времена человека интересовало происхождение небесных тел, как они возникли и сколько времени существуют. Успехи теоретической астрономии позволяют сегодня дать ответы на некоторые вопросы. В частности, интересно познакомиться с современными представлениями о возрасте небесных тел. Однако возраст может быть определен лишь в том случае, если определен начальный момент существования небесного тела. Поэтому необходимо иметь некоторые представления о процессе возник-

новения небесных тел и о значении, приписываемом такому привилегированному моменту времени. Эта чрезвычайно сложная проблема касается не столько времени, сколько космологии, и не относится к теме нашей книги.

Начнем с Солнечной системы. В настоящее время предполагается, что она образовалась в результате сгущения вращающегося газового облака<sup>1</sup>. Детали этого процесса пока еще очень плохо объяснены. Сгущаясь, облако разделилось на множество частей, которые впоследствии стали Солнцем, планетами и спутниками. В астрономическом масштабе этот процесс протекал довольно быстро: как предполагают, он длился в течение нескольких миллионов лет. Следовательно, все планеты Солнечной системы возникли почти одновременно, в довольно хорошо определенный момент; практически они имеют одинаковый возраст.

Наиболее точно определен общий возраст Земли. Установлено, что радиоактивные элементы распадаются с известной скоростью. Например, уран-235 постепенно превращается в свинец; его период полураспада равен 710 миллионам лет. Значит, в конце этого промежутка времени половина начального количества урана превратится в свинец. Следовательно, достаточно измерить соотношение урана и свинца, содержащихся в руде, чтобы затем с помощью простого вычисления определить, сколько времени существует эта руда. Задача вовсе не такая легкая, как кажется на первый взгляд, поскольку руда могла содержать свинец уже с самого начала. Однако, исследуя многочисленные образцы и применяя технику точного анализа, удалось оценить возраст Земли, который с возможной ошибкой в 0,3 миллиарда лет оказался равным 4,5 миллиарда лет. Речь идет о возрасте земной коры, то есть о времени, истекшем с момента, когда поверхность Земли начала затвердевать. Но можно показать, что с момента отделения от остальной части облака того сгустка, который превратился в Землю, затвердевание происходило достаточно быстро. Поэтому возраст коры практически равен возрасту Земли.

---

<sup>1</sup> В современной планетной космогонии большую роль играют представления об образовании планет из мелких твердых частиц планетезималей) или из газовых струй, выброшенных молодым Солнцем. — *Прим. ред.*



Применение этого метода к другим планетам Солнечной системы пока невозможно, но, несомненно, будет осуществлено, когда начнутся полеты на Луну, Венеру, Марс, а позднее и на другие планеты и их спутники. Кроме того, известно, что Солнечная система содержит большое количество пыли и камней всех размеров, именуемых метеоритами. Некоторые из них сталкиваются с Землей и достигают ее поверхности. Измерение содержания в них радиоактивных элементов и свинца приводит к выводу, что возраст их равен 4,5—5 миллиардам лет.

Возраст Солнца может быть определен совсем другим способом. Зная его массу и начальный химический состав, можно рассчитать, каким образом происходило его развитие и, в частности, как меняется его светимость с течением времени. Светимость Солнца в настоящее время указывает, что его возраст равен приблизительно 5 миллиардам лет. Этот подсчет из-за своей сложности был произведен лишь недавно благодаря развитию теоретической астрономии и совершенствованию электронных вычислительных машин. Подобный способ вычисления имеет один недостаток: начальный состав Солнца в точности не известен. Поэтому возраст определяется лишь приблизительно. *Все указанные выше возрасты совпадают между собой, а это дает возможность с большой степенью достоверности установить, что возраст Солнечной системы близок к 5 миллиардам лет.*

Теперь перейдем к Галактике в целом. Она, вероятно, образовалась в результате сжатия газа аналогично возникновению Солнечной системы, но в совершенно ином масштабе — начальное газовое облако было в миллиарды раз больше. Сжатие длилось около ста миллионов лет, что составляет еще очень небольшую долю прошедшего затем времени. Поэтому момент сжатия может служить достаточно точным отправным пунктом для установления возраста Галактики.

Сжатие сопровождалось сплющиванием, так что в конце концов Галактика приняла форму диска, которую она сохраняет до настоящего времени. Сейчас наблюдаются небесные тела, хотя и составляющие часть Галактики, но лежащие вне ее диска: это группы удаленных звезд, названные шаровыми скоплениями. Предполагается, что эти скопления образовались в самом начале возникновения Галактики, перед ее сплющиванием. Таким

образом, они являются прекрасными указателями возраста Галактики.

Для определения возраста шарового скопления используется та же теория развития звезд, что и для Солнца. В данном случае задача даже более проста, так как наблюдается не одна, а огромное число звезд, которые имеют одинаковый возраст и начальный химический состав и различаются лишь по массам. И все же оценки еще недостаточно точны в основном из-за несовершенства теории, а также из-за того, что расстояние до шаровых скоплений, являющееся основой расчетов, плохо известно. В результате установлено, что возраст Галактики лежит в пределах от 10 до 15 миллиардов лет.

Другой, менее точный способ основан на том факте, что звезды непрерывно образуются в диске из имеющегося там газа. Скорость этого процесса приблизительно известна, причем можно подсчитать оставшееся количество газа. Простой расчет показывает, что возраст галактического диска лежит в пределах от 5 до 12 миллиардов лет.

Еще один способ снова возвращает нас к радиоактивным элементам, хотя принцип здесь совершенно иной. Существуют два изотопа урана: уран-235 и уран-238, периоды полураспада которых различны. Для первого из них период полураспада равен 710 миллионам лет, для второго 4,5 миллиарда лет, то есть один из них распадается быстрее, чем другой. Следовательно, соотношения этих изотопов меняются во всей Галактике с течением времени. Можно подсчитать их начальное соотношение, так как эти два изотопа возникли одновременно в результате цепной ядерной реакции внутри первых звезд. После взрыва звезд уран рассеялся по всей Галактике<sup>1</sup>. Найденный таким образом возраст оценивается приблизительно в 15 миллиардов лет.

Поскольку различные независимые друг от друга способы дают сравнимые результаты, полученные цифры должны внушать доверие. Возьмем нечто среднее и будем считать окончательно, что нашей Галактике примерно 12 миллиардов лет. Таким образом, Солнечная система, возраст которой не превышает 5 миллиардов лет, появи-

---

<sup>1</sup> Это крайне примитивное изложение современных взглядов на происхождение химических элементов. — *Прим. ред.*

лась не в момент образования Галактики, а значительно позднее. В этом нет ничего удивительного, так как известно, что звезды в Галактике образовывались непрерывно и продолжают возникать в настоящее время. С этой точки зрения Солнце представляется обыкновенной звездой, которая по отношению к другим звездам не является ни очень молодой, ни очень старой.

Рассмотрим, наконец, Вселенную в целом или по крайней мере ту ее часть, которую мы наблюдаем. Насколько можно видеть, она состоит из галактик, беспорядочно расположенных либо группами, либо в одиночку. Многие очень похожи на нашу Галактику. Детальное их изучение, вообще говоря, попросту невозможно по причине очень большой удаленности. Тем не менее их возраст определяют благодаря явлению старения галактик — по мере того как галактика стареет, ее светимость ослабевает, а цвет приближается к красному концу спектра<sup>1</sup>. Но этот способ не является достаточно точным. Возраст, полученный таким образом, сравним с возрастом нашей Галактики. В частности, считается, что значительно более старых галактик не существует.

Мы подходим к явлению, которое со времени своего открытия вызвало множество споров, продолжающихся уже 30 лет, — расширению Вселенной. Спектральные линии галактик смещены в сторону красного края спектра. Это, по-видимому, указывает на то, что галактики удаляются от нас со скоростью, пропорциональной их удаленности. Неоднократно смещение спектральных линий пытались объяснить иными причинами, но тогда нужно допустить специально для этого придуманный физический эффект, например старение света с течением времени, что представляется малообоснованным. Объяснение «красного смещения» движением галактик основано лишь на классическом явлении — эффекте Допплера — Физо, который часто встречается в физике и астрономии и всегда объясняется относительным движением источника света, причем такую интерпретацию никто не оспаривает.

Теперь снова обратимся к прошлому и предположим, что скорости галактик всегда были одинаковыми. В таком

---

<sup>1</sup> Подобный способ определения возраста галактик до такой степени неточен и ненадежен, что фактически не может быть использован.— *Прим. ред.*

случае в какой-то момент галактики были очень близки друг к другу и, возможно, даже соприкасались, так что плотность материи во Вселенной была намного выше, чем теперь. Простой расчет, основанный на известных расстояниях и скоростях галактик, показывает, что так было приблизительно 13 миллиардов лет назад. Конечно, это величина, требующая уточнения, так как расстояния до галактик известны весьма приблизительно. Указанное время называется «временем расширения Вселенной». Более точные расчеты, выполненные с помощью космологических теорий, то есть теорий Вселенной в целом, дают величины такого же порядка.

Согласованность между возрастом расширения и найденным выше возрастом галактик просто поразительна. Вообще говоря, большинство способов определения возраста небесных тел, исходящих из совершенно различных физических положений, приводит к цифрам порядка нескольких миллиардов лет. По-видимому, приблизительно 12 миллиардов лет назад во Вселенной произошло что-то важное. Но что? Современное состояние наших знаний еще не позволяет ответить на этот вопрос, можно лишь строить различные предположения. Одни считают, что этот момент соответствует рождению или созданию Вселенной. В результате взрыва «начальный атом» разбросал во все стороны материю, которая затем быстро сжалась, образовав галактики и звезды. Для других Вселенная существовала вечно, менялись лишь ее состояния — то значительное уплотнение, то разрежение. В течение каждого сильно уплотненного состояния, последнее из которых было 12 миллиардов лет назад, Вселенная подверглась своего рода испытанию: одни галактики расщепились и превратились в пыль<sup>1</sup>, другие возникли вновь. Были выдвинуты и другие теории, но не существует фактов, позволяющих отдать предпочтение одной из них. Вероятно, вскоре наука прольет новый свет на эти захватывающе интересные проблемы.

---

<sup>1</sup> Не совсем удачная метафора. Конечно, речь идет не о пыли, а о газе. — *Прим. ред.*

## ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

Можно ли объединить пространство и время в одной и той же схеме? Это как будто следует из анализа отдельных чувственных восприятий, получаемых человеком с раннего возраста. Понятие движения воспринимается нами легче, чем понятия пространства и времени. Однако Пьер Костабель в своей статье показывает, что еще древние греки, особенно Зенон Элейский, заметили явное несоответствие: принимая понятие движения как «очевидное», они в то же время отказывались приписать пространству и времени одинаковые свойства делимости. Для древних греков эта трудность представлялась непреодолимой и необъяснимой, так что сам великий Аристотель не мог с нею справиться. Отметим только, что классическая физика унаследовала эту трудность и лишь современной физике удалось найти способ описывать пространство и время сходным образом.

Теория относительности чрезвычайно простым и красивым путем преодолела ряд внутренних противоречий, свойственных физике XIX века. Классическая механика — Поль Жермен показал нам, насколько стройными, хотя и обедненными, были ее основные понятия, — исходит из допущений пустого пространства и бесконечно быстрой передачи сигналов или действия сил. Физика сплошной среды с распространяющимися в ней волнами натолкнулась на аналогичные трудности, к которым прибавились дополнительные трудности, связанные с гипотезой существования эфира, необходимой для классической теории волн, но на опыте не подтвержденной и приводящей к логическим противоречиям.

Хотя теория относительности и ввела понятие четырехмерного пространства-времени (три измерения относятся к пространству, а четвертое — ко времени), она не привела к полному отождествлению пространства и времени.

Это, в частности, проявляется в наличии знака минус в релятивистском выражении для  $ds^2$ , а также в четком различии между направлением пространства и времени; время сохраняет свое направление от прошлого к будущему. Безвозвратно исчезает понятие универсального времени, но появляется понятие собственного времени каждого наблюдателя. Тем не менее собственное время остается функцией параметра  $t$ , который очень напоминает универсальное время.

Исчезает возможность деления всех событий на две группы — прошедшие и будущие. Порядка следования для двух событий, если они разделены «пространственноподобным» интервалом, больше не существует. Это не позволяет представить себе будущее как еще не совершившееся, а прошедшее — как уже совершившееся. Истинное, неизвестное классической физике различие касается, с одной стороны, понятий будущего-прошедшего, а с другой — абсолютно удаленных событий, то есть множества событий, на ход которых нельзя повлиять и от которых нельзя получить какой бы то ни было сигнал.

ПЬЕР КОСТАБЕЛЬ

## НЕСКОЛЬКО СТАРЫХ ПАРАДОКСОВ

Зенон, жестокий Зенон, Зенон Элейский!  
Ты пронзил меня своей звенящей стрелой,  
которая одновременно летит и не летит...  
Ее звук меня возбуждает, и стрела меня поражает.  
О солнце! На мою душу падает тень черепахи,  
и Ахилл неподвижен в своем быстром беге.

ПОЛЬ ВАЛЕРИ «МОРСКОЕ КЛАДБИЩЕ»<sup>1</sup>

«После первых замечательных успехов теории множеств философы и математики решили, что настал момент протянуть друг другу руки через разделявшую их пропасть. Хотя диалог между ними был весьма отрывочным, сначала все верили: еще немного, и они поймут друг друга. Но тут возникла тень Зенона Элейского с его

<sup>1</sup> Поль Валери — известный французский поэт, виднейший представитель неоклассицизма, стремившийся выразить в стихе не чувства, а мысли и даже абстрактные идеи. Есть русский перевод Б. Лифшица, звучный и изящный, но, к сожалению, не точно передающий смысл стиха.— *Прим. ред.*

парадоксами. При появлении Зенона математики поняли, что они должны стусеваться». Юмор этих сжатых строк, принадлежащих Анри Лебегу, не потерял интереса и в наши дни, но, к счастью, сейчас положение изменилось к лучшему. И если бы речь шла лишь о провозглашении сотрудничества между философами и математиками, то их диалог, несомненно, не был бы отрывочным. Но сам предмет нашего обсуждения — время — таков, что возникает иная пропасть, еще глубже и шире, чем та, которая существует между людьми, говорящими на разных языках. Как же постичь и проанализировать то, что лежит в основе самого познания! Тем не менее авторы книги надеются показать и, по-видимому, им это удалось, что пропасть не является непреодолимой. Существование данной книги само по себе уже говорит о том, что их надежда не лишена оснований. Но прежде, чем пытаться перешагнуть через пропасть, разумеется, необходимо уточнить исходные положения. И, увы, здесь приходится вспомнить Зенона Элейского — пусть его появление никого не отпускает.

Из всех трудов этого великого мыслителя V века до н. э. история сохранила лишь парадоксы (апории), а многочисленные толкователи превратили его в смехотворное пугало. Между тем он заслуживает гораздо большего. Надо только учесть, что его апории и сегодня не потеряли своего интереса. Попытаемся это показать.

*Апория первая.* Ты не можешь достигнуть конечной точки стадия<sup>1</sup>. Ты не можешь пройти за конечное время бесконечное число точек. Ты должен пройти половину заданного расстояния прежде, чем преодолеешь все расстояние, и половину этой половины — прежде, чем пройдешь саму половину. И так до бесконечности. Для любого заданного отрезка перед тобой всегда будет бесконечное число точек, и ты не можешь за конечное время достигнуть бесконечного числа лежащих одна за другой точек.

*Апория вторая.* Ахиллес, преследующий черепаху, никогда не перегонит ее. Прежде всего он должен достигнуть места, где она находится. За это время черепаха уйдет вперед; Ахиллес должен догнать ее снова, а черепаха воспользуется этим, чтобы пройти следующий отрезок.

---

<sup>1</sup> Стадий — древнегреческая мера длины. Длина стадия колебалась в пределах от 147 до 192 м. — *Прим. перев.*

зок пути. Он непрерывно приближается к черепахе, но никогда ее не догонит.

Эти две апории неразрывно связаны между собой. Действительно, в обоих случаях, идет ли речь об абсолютном движении или об относительном, расстояние стремится к нулю. Противник, которого Зенон как бы видит перед собой, соглашается с тем, что всякое движение состоит из различных последовательных «элементов». Цель Зенона — показать своему оппоненту, что эта рабочая гипотеза при неосторожном применении приводит к абсурдным результатам. Почему же так получается? Да потому, что сначала неявно допускают бесконечную делимость отрезка (откуда будет получаться бесконечное число элементов), а затем уже рассуждают о соответствующих промежутках времени так, как если бы они оставались всегда измеримыми величинами. Аристотель, благодаря которому до нас дошли апории Зенона, это отлично понял. По утверждению Аристотеля, «...не подлежит сомнению, что за конечное время нельзя достигнуть бесконечного количества, но при бесконечной делимости это уже возможно, так как в таком случае само время становится бесконечным». (Физика, VI, 2233а, 21).

Другими словами, если мы хотим избежать абсурда, который, разумеется, будет таковым для Зенона в такой же степени, как и для всякого человека, руководствующегося простым здравым смыслом, и если мы хотим применить гипотезу о делимости на части, то нужно применить ее одновременно и к времени и к пространству, а значит, и время и пространство должны иметь одинаковую структуру.

Две другие апории Зенона говорят о том, что эта общая структура должна быть непрерывной и бесконечно делимой.

*Апория третья.* Летящая стрела находится в покое. В самом деле, если любое покоящееся тело занимает равный ему объем и если всякое летящее тело в любой момент времени занимает объем, равный самому себе, то оно не может двигаться.

И в этом случае Аристотель хорошо понял, о чем идет речь. Он говорил, что это следствие допущения того, что время состоит из мгновений. Если отбросить исходную гипотезу, то не останется и силлогизма. В самом деле, если представить себе, что время состоит из недели-



мых частей, то для этих частей нельзя будет различать мгновение и элементарный промежуток, а значит, установится соответствие для данного мгновения между пространственным положением движущегося тела и «этапом» движения.

*Апория четвертая.* Четвертая апория относится к массам (неделимым материальным точкам), движущимся вдоль стадия по параллельным направлениям, но противоположно друг другу. Массы с одинаковыми скоростями

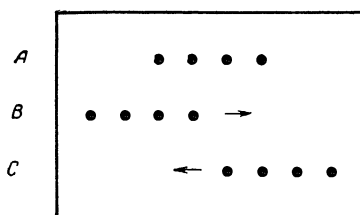


Рис. 7.

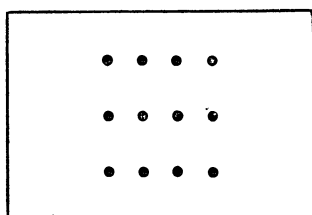


Рис. 8.

движутся одни от краев стадия, а другие — от его середины. Отсюда выводится кажущееся следствие, что половина времени равна самому времени (Физика, VI, 92396, 33). Апория трудная, но рисунки, сохраненные Александром Афродизиасом, позволяют достаточно точно восстановить суть дела. Итак, вдоль стадия находятся три ряда точек, изображенных на рис. 7. Ряд *A* находится в покое. Ряды *B* и *C*, двигаясь с одинаковой скоростью в противоположные стороны, одновременно оказываются в положении, показанном на рис. 8. Прежде чем достичь этого положения, начальная точка ряда *B* встретила вдвое больше точек ряда *C*, чем ряда *A*. Для рассматриваемой гипотезы каждый скачок требует «крупинки» времени. Поэтому время, оцениваемое относительно *C*, будет в два раза больше, чем относительно *A*. Между тем при переходе от положения точек на рис. 7 к положению на рис. 8 проходит одно и то же время.

Четвертая апория Зенона связывается с третьей (как и вторая с первой) с помощью относительного движения. Линия представляется здесь с помощью ряда точек, но именно таким представлением пользовались пифагорейцы. Здесь для пространства явно вводится гипотеза не-

делимых элементов, которая неявно подразумевалась в третьей апории. Преимущество ее состоит в том, что становится отчетливо видна абсурдность, к которой приводит допущение дискретной структуры пространства и времени. Определение времени с помощью числа пройденных пространственных точек, являющееся непосредственным следствием гипотезы о сложении дискретных частей, приводит к явно абсурдному выводу — один равен двум, — который в скрытом виде содержался и в третьем положении. «Крупинка» времени, рассматриваемая и как мгновение и как элементарная длительность, оказывается равной и единице и двум одновременно.

Аристотель сделал следующее обобщение. Рассматривая свой «переход противоположностей» (покой — движение, белое — не белое, быть — не быть), он утверждает, что во всех подобных случаях предмет обязательно окажется в одном из двух противоположных положений, но ни в одном из них он не будет находиться полностью. Однако здесь мы уже вступаем в область диалектики, которая не является предметом нашего обсуждения. Лучше подытожим все, чему нас научил Зенон.

Движение, бесспорное существование которого вытекает уже из повседневного простейшего опыта, может существовать лишь в том случае, если для пространства и времени имеет место одна и та же структура бесконечной непрерывной делимости<sup>1</sup>.

Но одного лишь признания этого структурного единства недостаточно. Действительно, человек может «оживить» движение, то есть воспроизвести его, как это делается в кино, с помощью серии фотографий, следующих одна за другой; однако он не может наблюдать движение, как наблюдает пространство. Человеческий ум сам по себе функционирует во времени и неотделим от времени. Настоятельная потребность в воспроизведении и измерении вынуждает нас прибегнуть к пространственным изображениям, что связано с определенным риском. Задолго до Декарта и Лейбница, которые в XVII веке осознали эту опасность, аналогичную мысль мы встречаем у Арис-

---

<sup>1</sup> На это уже обращал внимание Александр Койре в своих «Замечаниях о парадоксах Зенона», опубликованных в «*Études d'Histoire de la Pensée Philosophique*», «*Cahier des Annales*», 19, Paris, 1961, pp. 6—32.

тотеля. Действительно, в IV книге «Физики» он формулирует принцип, который выражает существенное различие между временем и пространством: «Никакой отрезок времени не может сосуществовать ни с каким другим отрезком времени». И добавляет: «Исключение составляют лишь отрезки, входящие один в другой, как, например, более короткий промежуток времени, содержащийся в более значительном промежутке времени». Это дополняет анализ Зенона. Течение времени не только является следствием нашего повседневного простейшего опыта; философы утверждают, что для времени единственной возможной операцией сравнения может являться лишь непосредственное включение.

Наряду с этим еще нужно, чтобы при таком включении что-либо происходило, по крайней мере в мозгу наблюдателя.

«Если не происходит изменений в нашем мысленном восприятии или же если мы их не замечаем, — говорит далее Аристотель, — то нам кажется, что время остановило свой бег. Так, в басне жители Сарда спали в то время, когда герой совершал свои подвиги. Проснувшись, они связали прошлый момент с будущим — интервал между ними стерся из-за отсутствия ощущений. Таким образом, время не существует без изменения и без движения».

Здесь мы встречаемся еще с одной характерной чертой непрерывного бесконечно делимого; ведь можно спать, как жители Сарда, и не заметить происшедшие за это время события, или, другими словами, не заметить различия между моментами прошедшего и последующего. Кроме того, отсюда следует, что время бесконечно, так как мы не можем определить начальные и конечные моменты. Момент является лишь своего рода сечением, отделяющим что-то кончающееся от чего-то начинающегося, и представление об абсолютном начале или конце времени немыслимо. Момент существует лишь потому, что время было до него и будет после него. Но если это справедливо для времени, то связь между временем и движением приводит к тому, что движение всегда существовало и всегда будет существовать.

Однако Аристотель не ограничивается этими качественными соображениями. Хотя время не существует без изменения или движения, оно не сводится просто к движению как таковому. Время есть нечто, сообщающее

движению внутреннюю структуру при всем разнообразии внешних проявлений. Время есть численная характеристика движения, определяющая границу между прошедшим и последующим. В самом деле, число вообще позволяет нам различать большее от меньшего, а время позволяет нам различать большее от меньшего в движении, то есть сравнивать скорости в одновременных опытах, не уточняя пока условий, которые для этого требуются. Когда Аристотель делает вывод, что время — это вид числа, не следует приписывать этому иного смысла, кроме неясного осознания того, что мы способны в настоящее время сформулировать точно: для представления временного континуума в качестве измеримого множества достаточно воспользоваться очень простой топологической схемой.

Вместе с тем Аристотель хорошо понимал, что для самого измерения времени необходим постулат, определяющий существование «единичного» движения, то есть идеального движения, всегда тождественного самому себе и используемого для сравнения с другими движениями.

К сожалению, прямая осталась для Аристотеля тем, чем она представляется в чувственном опыте, а именно существенно ограниченным отрезком. Поэтому она не может использоваться для задания «единичного», непрерывного, равномерного и вечного движения.

Только окружность, у которой нет ни начала, ни конца и все точки эквивалентны между собой, могла для него быть носителем бесконечного движения, которое продолжается неограниченно в результате многократного обращения по кругу. Идеальное движение может быть лишь круговым, и такое выдвижение окружности на первое место по сравнению с другими кривыми имело значительные последствия вплоть до начала развития классической физики в XVII веке.

Впрочем, мы были бы не правы, если бы при рассмотрении проблемы времени приписали слишком большое значение конфликту между окружностью и прямой. Об этом свидетельствует пример с последним представителем античной мысли — великим Архимедом, от которого исходит традиция математизации, воспринятая в эпоху Возрождения и явившаяся источником современной позитивной науки. В «Трактате о спирали» Архимед предлагает изучать кривую, описываемую точкой при движении по

прямой, которая сама вращается вокруг какой-либо точки. Несомненно, его в первую очередь интересуют геометрические свойства, но попутно он делает очень интересные замечания. Смещения, пропорциональные длине радиуса-вектора и углу его поворота относительно начального радиуса-вектора, характеризуются с помощью параметра, который отождествляется со временем без каких-либо специальных обоснований, как если бы речь шла о чем-то само собой разумеющемся. Таким образом, со времен Аристотеля до Архимеда в мире кое-что изменилось: стали общим способом описывать равномерное изменение с течением времени геометрической величины, будь то угол или расстояние; перестали считать основными такие формы равномерных движений, как круговая или прямолинейная. Спираль символизирует объединение в единое целое того, что ранее считалось несовместимым.

Этот пример показателен и очень поучителен. Он помогает нам понять, что, хотя в XVII веке в связи с законом инерции прямолинейное и равномерное движение стало считаться привилегированным, это отнюдь не означает победы прямой над окружностью или принятия постулата о существовании «единичного» движения, выражаемого с помощью геометрических понятий. Несомненно, что сам язык древних авторов способствует неясному пониманию. Но линейность «единичного» движения на самом деле чисто алгебраическая, и именно в этом современные ученые видят основу для измерения классического времени и, таким образом, обычно не отдавая себе в этом отчета, сближаются с Архимедом и его единомышленниками из Александрии.

Мы заканчиваем предварительное исследование исходных положений. Их нам дала античная греческая мысль, где наука и философия были тесно связаны между собой. На этой общей основе может проводиться дальнейшее исследование. Здесь надо предоставить слово людям науки. Мы не можем ожидать, что они раскроют загадку всеобщей меры явлений природы, однако мы знаем, что исследования в этом направлении не оказались бесплодными. Проблема необратимости, вызвавшая столь страстные споры, связана не только с временем. История показывает, что проводившиеся ранее исследования являются неотъемлемой основой, к которой в полной мере не возвращаются, но с которой сравниваются знания, приобре-

тенные позднее. О том, в какой степени обогатились эти основы, читатель сможет судить по другим статьям сборника.

ЛУИ МАРИО

## НА ПУТЯХ К ОТКРЫТИЮ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Есть одни лишь тени,  
блуждающие в царстве мертвых.  
ПЛАТОН

В обыденной жизни мы встречаемся с разными пониманиями пространства: космонавт стремится в мировое пространство, а школьника перед экзаменами преследует кошмар геометрического пространства.

Пространство, так же как время и число, является первичным понятием, заимствованным из повседневного опыта. Слово «пространство» часто встречается в обиходной речи, поэтому интересно разобраться в том, что же подразумевается под этим словом, и затем постепенно выделить научные понятия, скрытые в интуитивной оболочке.

Прежде всего интересно отметить, что пространство очень часто связывают с промежутками времени. Может быть, понятие пространства-времени является врожденным и люди очень рано обнаружили глубокую связь, существующую между пространством и временем, связь, которая затем была скрыта за абстрактными построениями ученых и заново открыта лишь в начале XX века?

Как развивается ребенок еще с колыбели? Сначала он замечает вокруг себя множество вещей, находящихся в постоянном движении, затем открывает свое собственное существование.

Перед его глазами последовательно мелькают свет и тени; он слышит звуки и знакомые голоса, которые учится различать: оказывается, многие предстающие перед его взором тени говорят разными голосами. Ребенок обнаруживает, что он может протянуть руки, пошевелить ими. Иногда его руки касаются предметов, например погремушки, и постепенно он начинает узнавать их. Вокруг него множество непохожих друг на друга, различных по

форме вещей. Однажды он нечаянно роняет погремушку на пол. Через несколько мгновений слышится звук падения. Малыш очень удивлен. Он повторяет этот опыт и превращает его в игру. Через несколько месяцев ему дарят одну игрушку, затем другую... Он видит их рядом, играет с ними. А когда он делает первые шаги, тут и вовсе начинаются большие приключения. Вступление во внешний мир связано с настоящей перестройкой внутреннего мира — человек начинает осваивать пространство.

Ребенок видит живые существа — отца и мать, — а также неподвижные вещи; он различает видимые размеры родителей, форму плюшевого медвежонка и гораздо позднее — цвет своих кубиков. Он замечает также факты — события, как назовут их в теории относительности, — например внезапное появление в доме собаки, радостный крик ребят, снова собравшихся вместе перед началом учебного года.

Вещи располагаются рядом, их можно видеть все сразу, и каждая занимает свое место. События — это уже нечто совсем иное: мамы нет рядом, ребенок кричит, так как ему скучно. Сначала он слышит свой крик, а затем с радостью видит, как входит мать. Он знает, что события следуют одно за другим и разделены конечными промежутками времени. Какая радость для ребенка — послушать тиканье отцовских часов; так, сам того не подозревая, он начинает делить время на равные промежутки.

Кроме того, он начинает отличать один кубик от двух, касается последовательно своих пяти пальчиков на ручке. Он учится считать, усваивает понятие числа. Интересно отметить, что люди применяют главным образом двоичную или десятиричную систему счисления. Ребенок рано усваивает число два, значительно позднее — число три. Мать учит его считать до десяти (десять пальцев на руках); этот предел некоторые первобытные племена так и не смогли преодолеть.

Наконец ребенок научился ходить, он знает, что перемещается относительно дома, а на улице видит движущиеся машины. Он в первый раз едет на поезде и с удивлением замечает, что деревья быстро проносятся мимо него. Одним словом, он замечает свое собственное перемещение и перемещение предметов относительно других предметов.

Итак, первые соотношения смежности, последовательности, счета, относительного движения являются основой повседневного опыта. Устранение хотя бы одного из этих понятий исказило бы мгновенное восприятие, устранение всех положило бы конец нашему разумному существованию.

Ребенок растет, ему исполняется уже три года. Он хорошо знаком со многими событиями и предметами, которые его окружают. Он освоился с окружающим его пространством. Но как далеко оно простирается? Он отдает себе отчет в том, что некоторые предметы, например Луна, которая перемещается относительно облаков, недоступны. Значит, часть внешнего мира недостижима: понятие бесконечного ему становится понятным. Первобытные люди и античные цивилизации познавали мир таким же образом: с одной стороны, Земля, на которой они живут, с другой — небесная сфера со звездами, которая каждую ночь принимает положенный ей вид. Конечно, еще древние халдеи различали звезды, Солнце, Луну, планеты, перемещающиеся по небесной сфере, что дало им повод отнести их к земной системе. Вплоть до XVIII столетия пространство рассматривалось как состоящее из Солнечной системы и из расположенных на бесконечно далеком расстоянии звезд. И лишь со времен великого английского астронома Гершеля начали осознавать границы движущегося мира и заметили, что звезды также обладают относительным движением.

Короче говоря, пространство состоит из множества окружающих нас объектов и тел: оно простирается далеко, очень далеко, все дальше и дальше — благодаря современным огромным телескопам. Конечно оно или бесконечно? Это щекотливый вопрос, относящийся скорее к метафизике, чем к науке. Самое важное здесь — это наличие тесной связи между понятием пространства и понятием времени и числа. Лишь более точный анализ этих понятий на основе современных научных теорий вскроет глубокое значение подобной связи.

Кратко охарактеризуем проблему бесконечной делимости пространства, поставленную еще Зеноном: отрезок может быть разделен на две половины, каждая из которых в свою очередь — на две новые половины и т. д. Можно ли продолжать так до бесконечности? Здесь затрагивается сложный вопрос о прерывности или непрерывно-



сти пространства: если пространство предполагается прерывным, то возникают противоречия, уже упоминавшиеся в предыдущей статье (апории Зенона), к которым мы не будем возвращаться. Такая же проблема возникает и для деления времени. Вместе с тем нужно отметить тесную связь между этими вопросами и теорией чисел — сначала целых, затем рациональных и, наконец, действительных чисел, — связанную с непрерывностью (о которую споткнулась греческая наука, знакомая лишь с целыми числами) прямой линии, а следовательно, и пространства.

Основываясь на высказанном ранее определении, невозможно обойти молчанием вопрос о делимости материи, ведь она заполняет пространство и является его составной частью. Физические теории начала XX века допускали предел делимости материи. Этот предел характеризовался неделимым атомом. Но, увы, сам атом скоро предстал как чрезвычайно сложная система, состоящая из ядра и внешних электронов, движения которых, впрочем, управляются законами, совершенно отличными от макроскопических законов электромагнитной теории. Затем оказалось, что само ядро имеет очень сложное строение: оно состоит из так называемых элементарных частиц... К сожалению, последние способны к взаимным превращениям, и существующие между ними взаимодействия не перестают удивлять физиков, работающих на больших ускорителях. Бесконечно малое, как и бесконечно большое, окутано тайной. Впрочем, некоторые из частиц имеют очень короткий период жизни, порядка  $10^{-25}$  секунды. Пригодны ли для такого масштаба наши обычные понятия пространства и времени? Ответа на этот вопрос пока не существует.

Очень рано у людей возникла потребность упростить окружающий мир, чтобы лучше его изучить и понять. Стремление к абстракции возникло в глубокой древности, и уже в античном мире появились первые конструктивные науки: арифметика — наука о числах, потом геометрия — наука о пространстве, затем кинематика — наука о движениях, сочетающая в себе и геометрию и время. Наконец, возникает механика, ставящая своей целью воссоздать и объяснить реальный мир. Греки прошли лишь стадию геометрии; чтобы появилась последовательная механика, пришлось ждать Галилея и Ньютона (см. статью Поля Жермена), а затем Эйнштейна, чтобы выявить

соотношения, связывающие пространство, время и число.

Греки были отличными геометрами, но они занимались лишь статической геометрией. Изучая свойства неподвижных фигур, они совершенно не рассматривали их возможные движения. Два равных треугольника можно наложить друг на друга; несомненно, в этом определении уже заложено понятие перемещения одной фигуры по отношению к другой, но, по-видимому, греки не отдавали себе отчета в возможности такого перемещения: их геометрический мир выглядел застывшим.

Позднее александрийская школа создала кинематику; чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить описание движения планет по Птолемею.

В эпоху Возрождения Галилей и Ньютон изучили движения тел — в науку было введено понятие «система отсчета», или «репер». Вокруг нас некоторые тела перемещаются по отношению к другим. Как же определить движение первых по отношению к последним? Так, если муха ползет по двери, то в заданный момент времени положение мухи характеризуется двумя числами. Если при этом дверь открывается, то, зная движение двери относительно комнаты, можно определить движение мухи по отношению к системе отсчета, связанной с комнатой. В этой системе положение мухи характеризуется уже тремя числами; третье число в данном случае — угол поворота двери относительно стены комнаты.

Обобщая, мы относим движения на Земле к системе отсчета «Земля». Если Земля неразрывно связана с окружающим ее пространством, простирающимся до бесконечности, и если предположить, что время везде течет одинаково, то Земля будет абсолютной системой отсчета, в которой можно изучать абсолютные движения подвижных тел. Одновременно постулируется, что пространство и время абсолютны.

Сущность дела не изменилась от того, что Коперник открыл вращение Земли вокруг Солнца: за абсолютную систему отсчета можно принять систему координат, начало которой совпадает с центром Солнца, а осями являются три прямые, направленные к трем «неподвижным» звездам небесной сферы.

Геоцентрическая система отсчета была заменена гелиоцентрической. Ньютон настойчиво подчеркивает это: абсолютное пространство не зависит от внешних причин и

всегда остается неизменным и неподвижным. Относительное пространство находится в состоянии движения по отношению к абсолютному пространству, оно воспринимается через посредство отношений между телами, и несведущие люди неправильно принимают его за неподвижное пространство... Все происходит в пространстве, сущность которого связана с установлением положения, и было бы абсурдно, если бы абсолютные связи не существовали.

Ньютон использует здесь метафизическое понятие пространства, легко поддающееся критике. Представьте себе окружающее пространство в виде густого леса; если в этом лесу несколько деревьев упадет, общая картина существенно не изменится... Но, если спилить все деревья, останется ли пространство? Да, отвечает Ньютон. То, что останется, и есть абсолютное пространство, не зависящее от внешних причин, неизменное и неподвижное. Итак, для Ньютона пустое абсолютное пространство существует вне всякого движения и независимо от какого-либо понятия о времени. Такое утверждение в действительности необоснованно.

В XVII и XIX веках астрономы установили существование относительных движений сначала звезд, затем галактик и сделали вывод, что все небесные тела Вселенной движутся относительно друг друга. С тех пор уже нельзя было рассчитывать на то, что, не прибегая к небесной механике, можно обнаружить некую таинственную абсолютную систему отсчета. В крайнем случае, если допустить существование начала Вселенной, то можно принять за абсолютную систему отсчета совокупность начальных положений небесных тел. Если бы существовала такая система, то как по отношению к ней описать последующие движения?

Физики не захотели признать себя побежденными и, чувствуя бессилие механики, обратились к оптике. Свет распространяется в пустоте со скоростью 300 000 км в секунду, поэтому предположили, что его распространение обусловлено колебаниями среды, заполняющей пустое пространство и даже прозрачные тела. Эта гипотетическая среда, которая была названа «эфиром», соответствует пятому элементу физики Аристотеля — после воздуха, воды, земли и огня. Эфир «материализовал» абсолютное пространство Ньютона. Таким образом, в результате оптических опытов казалось возможным выявить абсо-

лютное движение Земли относительно эфира и измерить эфирный ветер, возникающий при перемещении нашей планеты в абсолютном пространстве. Но знаменитые опыты Майкельсона, проведенные в конце XIX века, дали отрицательный результат: каким бы ни было движение наблюдателя, скорость распространения света остается постоянной.

Это привело к серьезному кризису: либо следует оспаривать безупречные опыты Майкельсона, либо нужно отказаться от абсолютного пространства Ньютона и сопутствующего ему универсального времени. Был открыт эталон скорости, строго постоянный, но обнаружился парадоксальный факт — существование такого эталона оказалось несовместимым с основными понятиями ньютоновской механики.

Эйнштейн сделал смелый шаг, отказавшись от абсолютных пространства и времени, при этом он исходил из глубокой мысли о том, что пространство тождественно совокупности окружающих нас гел, находящихся в постоянном движении.

Поэт восхищенно созерцает великолепную картину ночного неба. Что он воспринимает? Информацию о звездах, которая говорит о давно свершившихся явлениях, происходивших, самое малое, три года назад для ближайшей звезды или много миллионов лет назад для внегалактических туманностей. Он восхищается блеском звезды, которая, быть может, не существует уже в течение многих веков. Он видит не совокупность звезд в один и тот же момент их жизни, а лишь последовательные стадии положений, занимаемых в течение ряда лет телами, движущимися во Вселенной.

Итак, понятие пространства неразрывно связано с понятием времени. Пространственно-временной континуум является внешней реальностью, где непрерывная связь между пространством, как будет показано в следующей статье, осуществляется с помощью постоянной скорости света. Пространство-время является упорядоченным множеством положений, последовательно занимаемых всеми телами и предметами. Таков чрезвычайно простой ответ, даваемый современной наукой на поставленный нами вопрос о том, что такое пространство.

## ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Для физика понятие времени имеет два главных аспекта, каждый из которых чрезвычайно содержателен. Один из аспектов, уже неоднократно и детально рассматривавшийся в предыдущих статьях, связан с тем, что через посредство движения время и пространство приобретают общие черты, а в результате становятся величинами одной природы. Общеизвестно знаменитое утверждение Аристотеля: «Время — это число движения». История времени как физической величины в механике, оптике, классической электродинамике и в специальной теории относительности Эйнштейна наглядно иллюстрирует высказывание, которое любил повторять Эмиль Пикар: «Мы измеряем время с помощью движения, а движение — с помощью времени!» (Сегодня слово «движение» следует заменить словом «изменение».)

Для физиков аристотелевский взгляд на время заключается в том, что время для них — измеримая физическая величина, аддитивная числовая мера временного интервала. Этот взгляд проявляется в связи, устанавливаемой между временем и пространственными расстояниями, непосредственно измеряемыми с помощью общих физических законов, то есть таких законов, которые не зависят от частных свойств материи. Динамический закон Галилея — Ньютона  $F = m\gamma$  — общий закон, который связывает время как физическую величину с тремя непосредственно измеряемыми (с помощью линеек и динамометров или весов) величинами: пространством, силой, массой. Этот закон в конечном итоге позволяет, хотя и косвенным способом, рассматривать время как измеримую величину. К числу общих формул относятся также формулы Лоренца — Пуанкаре, характеризующие переход от одной инерциальной системы отсчета к другой (и впервые введенные Фойгтом в 1887 году). В связи с включением в них универсальной постоянной  $c$  эти формулы впервые дали возможность сводить измерение времени к измерению пространства. Таким образом, совершенно неожидан-

но удалось безупречно осуществить синтез, о котором мечтал еще Аристотель.

Развитие понятия времени связано с развитием хронометрии. Динамический закон Галилея — Ньютона нашел свое воплощение в часах и хронометрах Гюйгенса. Кроме того, этот закон представляет собой ключ к чтению небесных часов; небесная кинематика Кеплера, пришедшая на смену кинематике Эндокса и Птолемея, привела к появлению небесной динамики Галилея и Ньютона. Многовековое усовершенствование механических и электромагнитных хронометров обеспечило появление совершенно новых хронометров с молекулярной или атомной стабилизацией, которые являются идеальными аристотелевскими часами.

Но прежде чем углубляться в проблему времени как физической величины, нельзя не коснуться кратко другого, также очень увлекательного аспекта проблемы времени.

Что стало бы с термодинамикой, если бы после открытия физической эквивалентности между теплотой и работой не был бы сразу же сформулирован второй принцип, обосновывающий, а по возможности и объясняющий глубокую причину исключительного своеобразия, присущего теплоте? Это своеобразие проявляется в хорошо известных опытах, в том числе устанавливающих общность теплоты и работы. Задолго до открытия универсального коэффициента, характеризующего связь между теплотой и работой, было известно, что изотермическое превращение работы в теплоту вполне осуществимо, но обратное превращение невозможно, а также что тепло переходит от нагретых источников к более холодным.

Можно понять возражение Бергсона против того, что он довольно точно называл «сведение времени к пространству» в механике, электромагнитной теории и, наконец, в теории относительности. Конечно, физик не может отказаться от сведения времени к пространству — этой столь древней и плодотворной идеи. Лишь после тщательного рассмотрения всех аспектов первого принципа науки о времени возникает необходимость так же тщательно рассмотреть бергсоновский аспект времени, который я бы назвал вторым принципом науки о времени: своеобразная неповторимость, необратимость течения времени. Ведь всем известно, что в пространстве можно перемещаться

во всех направлениях, но, увы, невозможно ни вернуться в прошлое, ни заглянуть в будущее.

Рассмотрим теперь аристотелевский аспект, заключающийся в сведении времени к пространственным представлениям. Как мы уже показали, основное уравнение динамики Галилея — Ньютона  $F=mv$  впервые дало подлинно научное определение времени как измеримой физической величины. Обратим внимание на очень тесную связь между проблемой времени, рассматриваемого как измеримая физическая величина, и специальным принципом относительности.

То, что сегодня мы называем специальным принципом относительности, первоначально было открыто как принцип относительности динамики. Не сразу усваиваемый, если основываться просто на здравом смысле (свидетели — студенты, изучающие механику), он противопоставляется двум предыдущим принципам, один из которых слишком ограниченный, другой — слишком уж общий. Опыт предыдущих поколений и опыт нашего детства, связанный с представлением о «неподвижной Земле», казалось бы, свидетельствуют о естественности представления об абсолютной пространственной системе отсчета. Однако классическая кинематика, описывающая движение твердых фигур евклидова пространства в зависимости от универсального времени вынуждает отказаться от этого представления; вместо него вводится принцип относительности движения, согласно которому при описании движений эквивалентны все твердые пространственные системы отсчета вне зависимости от того, находятся они в равномерном или ускоренном относительном движении.

Эти два противоположных принципа — принцип кажущегося существования абсолютной системы отсчета и принцип относительности движения — выглядят более примитивными и более естественными, чем специальный принцип относительности динамики. Не сразу стало ясно, что опыт с маятником Фуко позволяет обнаружить вращение Земли, и замечательным достижением Галилея следует считать то, что он первым выступил в защиту специального принципа относительности. Поступить так было далеко не просто; существовали, во-первых, укоренившаяся традиция и, во-вторых, принципы об абсолютной пространственной системе отсчета (неподвижная Земля) и об относительном движении (с равным правом

можно сказать, что Солнце не неподвижно, а движется по отношению к неподвижной Земле).

Сколь глубока была физическая интуиция, позволившая Галилею утверждать, что правильнее говорить: Земля не неподвижна, а движется и вращается. Первооткрыватель закона инерции неявно ссылался на инерциальное движение центра тяжести Солнечной системы, который из-за огромного преобладания массы Солнца практически совпадает с центром этого небесного тела. Мы видим, что Галилей предвосхитил Эйнштейна и открытие четырехмерного пространства-времени в истории человечества несомненно является такой же выдающейся вехой, как установление шарообразности Земли и ее вращения вокруг Солнца.

В последнем отступлении от темы мы хотели бы показать, что произошло со старыми принципами абсолютной пространственной системы отсчета и относительного движения.

Специальный принцип относительности динамики, надлежащим образом переработанный Лоренцем, Пуанкаре и Эйнштейном, превратился в универсальный принцип физики. Благодаря ему было открыто четырехмерное пространство-время Минковского. Однако старый принцип относительного движения не исчез бесследно, а уступил место своему преемнику — общему принципу относительности, согласно которому все системы координат, однозначно характеризующие пространство-время, при описании движения оказываются эквивалентными. Что касается чрезвычайно упрощенного принципа абсолютной пространственной системы отсчета, который некогда считался лишенным каких-либо оснований, то в совершенно иной форме он был возрожден в связи с развитием космологии. Теперь представляется возможным определить в глобальном масштабе универсальную привилегированную космическую систему отсчета для пространства и времени. Наконец-то, после многовековых дискуссий, все три принципа относительности существуют совместно.

Нас интересует сейчас специальный принцип относительности Эйнштейна, и в первую очередь необходимо обратить внимание на его тесную связь с законом инерции Галилея.



Возьмем простейший случай, когда в качестве динамических часов рассматривается свободная материальная точка. Закон инерции Галилея утверждает, что движение этой материальной точки должно быть прямолинейным и равномерным: мы имеем здесь дело с конкретизацией в чистом виде часов Аристотеля, в которых время и пространство тесно связаны друг с другом через посредство движения (локальное движение Аристотеля).

Очень важно уяснить себе, что закон инерции Галилея, строго говоря, не имел бы никакого смысла, если бы с ним не были связаны два следующих определения:

1. Определение множества эквивалентных привилегированных галилеевых пространственных систем отсчета, равномерно перемещающихся одна относительно другой.

2. Определение галилеева масштаба времени. На самом деле движение не может быть одновременно прямолинейным и равномерным, если: а) одна из двух твердых пространственных систем отсчета вращается по отношению к другой или движется с ускорением; б) два масштаба времени связаны между собой какой-либо монотонной функцией.

Отметим вкратце, что здесь прекрасно иллюстрируются два эпистемологических закона, высказанных Дюгемом и Пуанкаре. Из опытного открытия строго не вытекает какой-либо закон, гипотеза или принцип, но опыт является наводящим указанием (в данном случае это относится к закону инерции). Любой постулат в конечном итоге оказывается связанным с системой определений.

Установив, таким образом, что динамике полностью чужда так называемая абсолютная пространственная система отсчета, классическая физика попыталась открыть такую систему с помощью оптики. Но поскольку предполагалось существование эфира — переносчика световых колебаний, — то естественно появилась мысль об отождествлении этой идеальной материальной среды с абсолютной пространственной системой отсчета. Таким образом, с самого начала исследования устанавливается существенная связь между двумя науками о движении без вещества — кинематикой и оптикой. Эта связь нашла удивительное и блестящее подтверждение в специальной теории относительности и в ее духовной дочери — волновой механике, где проявились глубокие связи между волновой

теорией, с одной стороны, и кинематикой и даже динамикой — с другой.

Серия экспериментов, касающихся этой новой проблемы, проводилась в два этапа. Первый этап, начало которому положил Араго в 1818 году, посвящен эффектам первого порядка относительно малой величины  $\beta = v/c$ ; второй этап, начало которому положили Майкельсон и Морли в 1887 году, относится к эффектам второго порядка по  $\beta$ . В обоих случаях теория ответила на «отрицательный» результат эксперимента соответствующей формулой, которая оказалась не только более совершенной, но и универсальной, то есть не зависящей от частных свойств используемой материи: мы имеем в виду формулу увлечения эфира, предложенную Френелем в 1818 году, и формулу сокращения длины материальных тел под влиянием эфирного ветра, предложенную Фицджеральдом и Лоренцем в 1895 году.

Эпистемологический недостаток, связанный с выводом той и другой формулы, заключается в том, что «эфирный ветер» использовался лишь для получения окончательного результата; при этом одновременно принималось существование эфира и устанавливалась абсолютная невозможность его опытного обнаружения. Чтобы преодолеть эту чрезвычайно неприятную трудность, необходимо было прибегнуть как к эпистемологическим, так и к техническим средствам.

Эпистемологическое средство, к которому, в частности, обратились Маскар и Пуанкаре, заключалось в утверждении, что принцип относительности динамики, устанавливающий эквивалентность привилегированных галилеевых систем отсчета, является универсальным принципом относительности физики. При этом два связанных между собой понятия об эфире и об абсолютной пространственной системе отсчета отвергаются как метафизические.

Техническое средство заключалось в использовании математической теории групп, которая приводит к специальной теории относительности. На основе эксперимента по измерению эффектов второго порядка Пуанкаре получил формулы, ранее предложенные Лоренцем, а затем, в 1887 году, Фойгтом. Интересно, отметить, что эксперимент, касающийся эффектов первого порядка, осуществленный в 1818 году, при наличии теории групп (возникшей примерно в 1830 году) был уже достаточен, чтобы

с его помощью построить специальную теорию относительности. Когда говорят, что, согласно формулам увлечения Френеля, между классическими и релятивистскими теориями оптических и кинематических процессов существует эквивалентность с точностью до величин первого порядка, то это справедливо лишь при игнорировании теории групп. Согласно последней (уже в первом порядке относительно  $\beta = v/c$ ), предпочтение необходимо отдать теории относительности.

Покажем теперь, почему отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли позволяет рассматривать скорость света в качестве универсальной постоянной.

Если бы этот опыт не давал отрицательного результата, то всякое определение эталона метра с помощью длины стационарной световой волны должно было бы связываться с установлением направления и величины «эфирного ветра». Интерферометр Майкельсона представляет собой аппарат для подобного метрологического сравнения, так как опыт Майкельсона показывает, что число стационарных световых волн, укладываемых на данной материальной линейке, не зависит от ее ориентации. Сравним точности, получаемые при сравнительном и прямом опытах. Самое точное выполнение опыта Майкельсона — Морли (Йосс, 1930) позволило бы обнаружить скорость эфирного ветра, равную  $1,5 \text{ км/сек}$ , в то время как относительная точность ( $10^{-8}$ ) метрологических опытов позволяет обнаружить эфирный ветер со скоростью приблизительно  $50 \text{ см/сек}$ . Итак, несмотря ни на что, степень точности прямого опыта и более точного сравнительного опыта весьма различна.

Сейчас психологический шок, вызванный отрицательным результатом опыта Майкельсона, уже сглажен. Даже наоборот, с наступлением эры волновой механики совершенно непонятным оказался бы положительный результат. В самом деле, твердое тело должно рассматриваться как стационарная материальная волна (чрезвычайно сложная). Известно также, что волновые уравнения всех материальных частиц, включая фотоны, кинематически связаны между собой, поскольку все они инвариантны по отношению к группе Лоренца — Пуанкаре. Мысль о выявлении так называемого «эфирного ветра» путем разделения кинематических свойств твердого тела и свойств

стационарной световой волны становится почти недопустимой.

Опыт Майкельсона устанавливает бесспорную допустимость того, чтобы эталон длины определялся по длине волны излучения, поэтому частоту излучения всегда можно принять за эталон времени. В результате такого двойного определения скорость света  $c$  становится абсолютной постоянной, так как эталон времени универсальным образом связывается с эталоном длины.

Это хорошая иллюстрация упоминавшихся выше эпистемологических<sup>1</sup> законов Дюгема и Пуанкаре: отрицательный результат опыта Майкельсона сам по себе не позволяет открыть новую теорию, а лишь подсказывает мысль о том, что коэффициент физической эквивалентности между отрезками пространства и промежутками времени может по определению рассматриваться как абсолютная постоянная  $c$ . В связи с установлением абсолютного эталона скоростей аристотелевское определение времени получило свое конечное воплощение.

Измерение частот молекулярных или атомных переходов сегодня начинает входить в практику лабораторий, и сразу же достигается поистине фантастическая относительная точность в определении времени — порядка  $10^{-10}$ ,  $10^{-11}$  и даже  $10^{-12}$ . Последняя была бы достаточной для обнаружения влияния эффектов общей теории относительности на ход часов. Нужно было бы только сравнивать по радио ход двух часов, одни из которых расположены на земной поверхности, а другие — на высоте 2000 м. Опыт, основанный на релятивистском эффекте Мессбауэра, позволил даже проверить эффект Эйнштейна для разности уровней, не превышающей нескольких метров.

Теперь мы хотели бы обратить внимание на то, что специальная теория относительности зависит не только от оптических законов, как считали когда-то специалисты по классической механике, которые перестраивали кинематику с учетом оптических законов. Со времени Луи де Бройля сама динамика в явном виде приобрела волновой характер и, таким образом, взяла

---

<sup>1</sup> Эпистемология — это принятый в западной (в особенности в английской) литературе термин, обозначающий теорию познания. — *Прим. ред.*

неожиданный реванш у оптики и электромагнитной теории, сведя их к частному случаю волновой механики фотона.

Итак, после преодоления многочисленных трудностей все завершается, как в романе с благополучным концом: электромагнитная теория и динамика заключают тесный союз под эгидой релятивистски инвариантного уравнения Гордона, обобщающего уравнение Даламбера.

Существенно новым свойством группы Лоренца — Пуанкаре по сравнению с классической группой Галилея — Ньютона является то, что она преобразует не только координаты пространства, но также (с определенным выше коэффициентом эквивалентности) и время. Поэтому с каждой галилеевой системой отсчета теперь связывается собственное лоренцево время. Это оправдывает замену термина «галилеева система отсчета» термином «лоренцева система отсчета».

Минковский дал замечательную интерпретацию лоренцевым системам отсчета. Если дополнить трехмерную лоренцеву систему координатных осей четвертой осью, на которой отмечается время, умноженное на  $c$ , и если на преобразования координатных осей накладываются условия о том, чтобы оставался инвариантным квадрат пространственно-временного интервала:

$$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2 t'^2 - l'^2,$$

то этим определяется четырехмерное пространство-время и лоренцевы системы отсчета не что иное; как системы базисных ортогональных векторов с равной длиной (определяющие так называемые декартовы системы координат) в псевдоевклидовом пространстве-времени. Закон эквивалентности, справедливый лишь для лоренцевых систем отсчета и называемый также специальным принципом относительности, сразу же получает идеально четкую геометрическую интерпретацию, так как он совпадает с законом эквивалентности для декартовых систем отсчета, который выполняется для  $n$ -мерных пространств с нулевой кривизной. С этим открытием, несомненно, связан один из наиболее важных законов природы.

Что касается общего принципа относительности, преемника известного из классической механики принципа относительного движения, то он устанавливает эквивалентность всех надлежащим образом определяемых си-

стем криволинейных координат в пространстве-времени. С точки зрения преобразования координат здесь все ясно. Естественно, если возникает необходимость отказаться от плоского пространства-времени, то на передний план выступает общий принцип относительности, тогда как специальный принцип относительности будет иметь лишь локальное значение и будет приближенно справедлив лишь в окрестности точки. Именно к такому выводу приходит эйнштейновская теория тяготения.

Специальная теория относительности как таковая состоит в систематическом применении принципа физической эквивалентности пространства и времени к различным областям физики (за исключением теории тяготения). В настоящее время это одна из теорий, наиболее хорошо подтвержденных с помощью чрезвычайно большого числа исключительно точных опытов. Можно считать, что закон преобразования пространственно-временных величин при изменении системы отсчета, содержащий постоянную  $c$ , и понятие о четырехмерном пространстве-времени получили надежное обоснование.

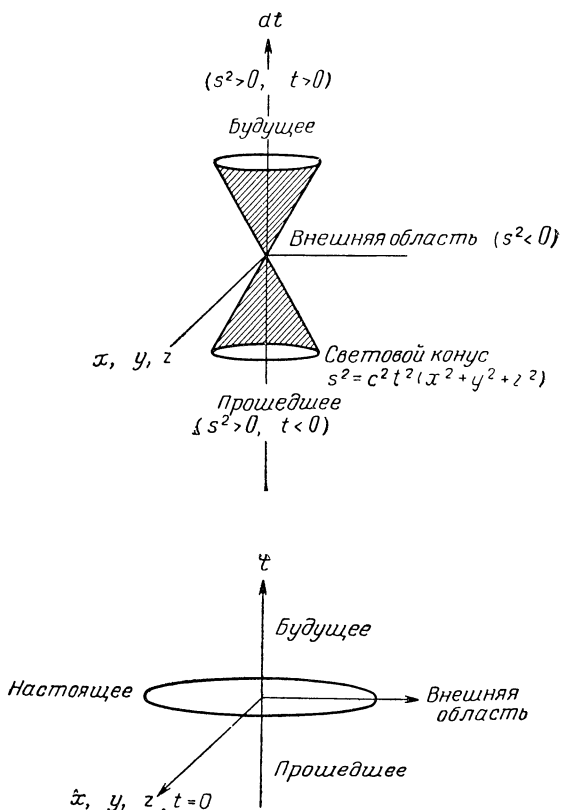
Однако время чем-то отличается от пространства, так как для времени справедлив закон необратимости, а для пространства эквивалентного закона не существует. Впрочем, теория относительности хорошо выражает это на своем языке.

Прежде всего необходимо учесть, что факт существования в пространстве-времени прямых с нулевой длиной, для которых, следовательно,  $s^2 = 0$ , дает возможность разделить пространственно-временные векторы на три класса. Будем называть световым конус, образующие которого — прямые с нулевой длиной. Этот конус характеризуется уравнением

$$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0.$$

Область внутри светового конуса, для которой  $s^2 > 0$ , содержит, как говорят, времениподобные интервалы и, очевидно, делится на две части, называемые соответственно областью будущего и областью прошедшего. Область вне светового конуса характеризуется значениями  $s^2 < 0$  и содержит, как говорят, пространственноподобные интервалы. Различие между будущим и прошедшим для сигналов, скорость которых меньше, чем  $c$ ,

$$x^2 + y^2 + z^2 < c^2 t^2; \quad s^2 > 0,$$



Р и с. 9.

Световой конус  $s^2=0$ , состоящий из траекторий распространения световых сигналов со скоростью  $c$ , делит пространство-время на три области. Внешняя область состоит из точек, до которых не может дойти никакой сигнал, выходящий из начальной точки. В этом случае

$$x^2 + y^2 + z^2 > c^2 t^2.$$

Если устремить скорость света к бесконечности (т. е. перейти к пространству-времени Галилея — Ньютона), то внешняя область сводится к области настоящего времени  $t=0$ . В этом случае можно достигнуть любой точки, если только предположить, что имеется достаточно быстрый сигнал.

Однако различие между пространством и временем по-прежнему существует, так что необратимость времени характеризуется стрелкой.

не зависит от выбора лоренцевой системы отсчета. Более точно, если постулировать, что все четыре координаты действительны и что группа преобразований лоренцевой системы отсчета непрерывна, то отсюда следует, что остается неизменным знак у четвертых составляющих времениподобных векторов (то есть таких векторов, которые направлены в область прошедшего или будущего).

Таким образом, если теория относительности доказывает существование внутренней общности между пространством и временем, то вместе с тем она четко устанавливает принципиальное различие между положительными и отрицательными значениями четвертых компонент векторов. В результате устанавливается четкое различие между пространственными и временными направлениями, причем последними определяются направления от прошедшего к будущему, сохраняющиеся в классическом пределе.

Основное различие между пространством-временем Галилея — Ньютона и Эйнштейна — Минковского состоит в том, что первое делится на две части горизонтальной гиперплоскостью, общей для всех наблюдателей и характеризующей универсальным временем, тогда как второе для каждого наблюдателя делится на три части, так что определить универсальное время уже невозможно.

Я хотел бы сказать еще несколько слов о проблеме, вызвавшей столько недоразумений, — о так называемом «снаряде Ланжевена»<sup>1</sup>. Именно с этой проблемой связаны некоторые разделы книги Бергсона «Продолжительность и одновременность», причем в данном вопросе этот философ допустил серьезную ошибку.

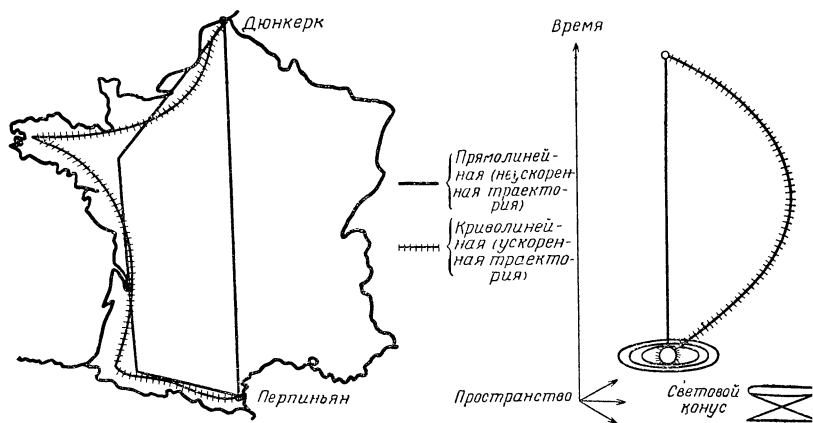
Бергсон заимствует у Эйнштейна пример двух механически-тождественных часов  $H$  и  $H'$ ; первые все время находятся в одной и той же лоренцевой системе отсчета  $L$ , а вторые сначала находились в лоренцевой системе  $L_1$ , движущейся со скоростью  $v$  относительно  $L_0$ , а затем переместились в лоренцеву систему  $L_2$ , движущуюся относительно  $L_0$  со скоростью  $-v$ . Предполагается, что в начальный и конечный моменты времени те и другие

---

<sup>1</sup> П. Ланжевен в 1911 году впервые заметил, что если бы космический снаряд Жюль Верна летел со скоростью, близкой к световой, то путешественники, вернувшись из полета на нем, оказались бы моложе своих сверстников. (См. П. Ланжевен, Избранные труды, Изд-во АН СССР, 1960, стр. 471). — *Прим. ред.*



часы находятся в одной и той же точке. Однако интервалы времени, разделяющие моменты встречи для тех и других часов, не будут одинаковы. Часы  $H'$ , переходящие из одной лоренцевой системы в другую (и, следовательно, в некоторый момент времени испытывающие бесконечное ускорение), покажут меньший промежуток времени, чем часы  $H$ , которые оставались в одной и той



Р и с. 10.

же лоренцевой системе отсчета. Если мгновенное ускорение заменить постепенным ускорением, то мы получим рассматривавшееся Ланжевенем явление различной скорости старения: время будет течь различно для разных людей, если один из них живет в обычных условиях, а другой движется с большой скоростью и претерпевает сильные ускорения. Представьте себе космонавта, который провел два года в движущейся с большой скоростью ракете и, возвратившись на Землю, оказался того же возраста, что и его внуки. Для получения такого различия в степени старения за столь малый промежуток времени несчастный космонавт должен был бы испытывать поистине ужасающие перегрузки

Перенесем эти результаты в обычное пространство. Две одинаковые автомашины  $H$  и  $H'$  выезжают из Дюнкерка (на счетчике каждой из них 0 км) и направляются в Перпиньян: одна ( $H$ ) по прямой дороге, другая ( $H'$ )

по атлантическому побережью и через Пиренеи. Когда они встречаются в Перпиньяне, на счетчике первой 1000 км, а второй — около 3000 км. Вот тут-то мы и сталкиваемся с явлением «путешественника Ланжевена» (или «парадоксом близнецов»). Если исходить из релятивистского выражения для  $s^2$ , то для времениподобных траекторий хорда будет длиннее дуги. Это значит, что один из близнецов, который путешествовал в ракете и испытывал перегрузки, после встречи на Земле со своим братом окажется моложе.

Но возвратимся к двум часам Бергсона. Бергсон оспаривает утверждение Эйнштейна, так как, по его словам, можно считать, что остаются неподвижными часы  $H'$ , а часы  $H$  сначала удаляются, а затем приближаются. Ошибка очевидна. Бергсон не признает абсолютного характера ускорений. В своих рассуждениях он пользуется кинематикой, то есть использует старый принцип относительного движения, классическую динамику и новую кинематику; затем, вместо того чтобы встать на единую точку зрения, он ограничивается использованием специального принципа относительности.

В пространстве-времени все разъясняется очень просто. Часы  $H$  описывают времениподобную прямую, а часы  $H'$  — ломаную линию, дважды пересекающую прямую  $H$ . Но ломаная линия оказывается короче, чем прямая, из-за знака минус в выражении  $s^2$  (в евклидовом пространстве, естественно, все выглядело бы наоборот).

В заключение отметим, что XX век — век пространства-времени, открытие которого имеет для человечества такое же значение, как открытие вращения Земли вокруг Солнца. Все основные физические проблемы, от атомов до галактик, обсуждаются в настоящее время на языке четырехмерного пространства. Другие отрасли знания волей-неволей должны приспосабливаться к этому языку, что изменяет саму постановку многих проблем.

## ВРЕМЯ И ИНФОРМАЦИЯ В ВЕРОЯТНОСТНОЙ ФИЗИКЕ

---

Ничто так не влияет на нашу жизнь, как неизбежное старение, ничто так не влияет на наши действия, как различие между прошедшим и будущим. Второй принцип науки о времени связан именно с направлением течения времени.

Что же заставляет Вселенную жить от прошедшего к будущему, а не наоборот? В применении к людям этот вопрос, быть может, лучше поставить так: что заставляет человека жить в направлении от прошедшего к будущему?

Ответ хотя и прост, но далеко не очевиден. Направление эволюции на самом деле связано вовсе не с вторым принципом термодинамики — изменением энтропии Вселенной, — то есть переходом во все более и более вероятные состояния, который можно было бы заменить эволюцией в обратном направлении. Направление эволюции связано с тем, что любое живое существо для получения информации должно взаимодействовать с остальной частью Вселенной<sup>1</sup>.

Коста де Борегар детально разъясняет эти на первый взгляд парадоксальные положения, связанные с тем, что необратимость является физическим принципом и что в нашей Вселенной возможно статистически предсказать будущее, тогда как восстановить прошлое оказывается, строго говоря, невозможным. Что касается необратимости эволюции, то она связана с необходимостью взаимодействия каждой системы с остальной частью Вселенной. Чтобы лучше понять все это, полезно рассмотреть такой простой пример, как расплывание капли чернил в стакане

---

<sup>1</sup> Эта формулировка, в которой вопрос о направлении развития живых существ искусственно оторван от общего вопроса о направлении времени, представляется нам неудачной. — *Прим. ред.*

с водой, но, возможно, и здесь необходим анализ условий, характеризующих нашу жизнь и наши действия? Подобного рода проблемами занимался Бриллюэн и многие ученые, разрабатывавшие различные теории информации, и хотя последние еще не объединены в единую систему, выводы этих теорий совпадают между собой и соответствуют нашим интуитивным представлениям.

**ЖИТЬ — ЗНАЧИТ ОБОГАЩАТЬ СВОЙ УМ.** В этой связи интересен закон Шеннона, утверждающий, что количество информации (изменяющееся от одной системы к другой и от одного канала к другому), которое может передаваться и приобретаться, всегда ограничено известным пределом, пропорциональным прошедшему промежутку времени

$$\Delta I \leq k \Delta t.$$

Два наших драгоценнейших блага — время и информация — связаны этим соотношением; прежде всего необходимо приобретать полезную информацию, которая расширяет наши возможности, и избавляться от паразитной информации, которую мы часто накапливаем бесполезно. Это трудная проблема, может быть, потому, что никому еще не удалось определить субъективную ценность информации. Информация о том, что «должен умереть француз, занесенный в национальный список под таким-то номером», будет иметь различную значимость в зависимости от того, кто этот человек: ваша жена, известный министр или просто человек, о котором вы ничего больше не знаете.

Конечно, слово «информация» относится к различным реальным понятиям. Информация в смысле Фишера относится к неопределенности, существующей в том случае, когда делается много опытов, относящихся к одному и тому же множеству. Информация по Шеннону относится к количеству различных сведений, которые могут быть переданы по вполне определенным физическим каналам (например, нашим органам чувств). Наконец, информация по Бриллюэну оказывается более непосредственно связанной с особенностями нашего взаимодействия с окружающим миром. Синтез трех упомянутых теорий очень труден и полностью еще не осуществлен. Эта проблема относится к числу глубоких научных проблем, которые ждут своего решения.

Заметим лишь, что каждая из теорий приводит к ограничению количества «знаний», которые могут быть переданы, получены или использованы за определенный промежуток времени, в частности за промежуток времени, отпущенный человеку в наши дни. Поэтому ничего абсурдного не будет в том, если промежуток времени будет определяться как величина, пропорциональная максимальному количеству воспринимаемой информации. Статистические теории говорят, что возможности наших действий зависят от наших знаний или предположений о Вселенной. Поэтому нельзя считать недопустимым утверждение, что созидательный потенциал с течением времени возрастает и это лежит в самой основе всех эволюционных теорий. История, или, более точно, история жизни, вносит новый порядок в первоначальную структуру и связана с проявлением скрытых возможностей. Однако эти замечания выходят за рамки настоящей книги.

ОЛИВЬЕ КОСТА ДЕ БОРЕГАР

## ВТОРОЙ ПРИНЦИП НАУКИ О ВРЕМЕНИ

Проблема необратимости времени относится к числу наиболее интересных научных проблем. Возможно, это связано с тем, что она близка к наиболее острым социальным и духовным проблемам. А в своей повседневной жизни как часто мы сожалеем о невозможности повторить прошедшее и предсказать будущее! Что же касается технических вопросов, то сколько затруднений приходится испытывать инженерам из-за трения и вязкости, из-за потерь на излучение и других потерь аналогичного рода, из-за превращения энергии в тепло!<sup>1</sup>

Невозвратность ушедшего времени особенно подчеркивается поэтами («О время, прекрати свой бег!»). Философы не раз обращали внимание также и на другую сторону вопроса: если бы не существовало непрерывного течения времени, уносящего события в прошлое, то не могло бы быть ни прогресса, ни надежды на будущее. С процессом течения времени связаны как эволюционные процессы

---

<sup>1</sup> Перечисленные здесь явления, согласно второму принципу термодинамики, приводят к необратимости, которую автор связывает с необратимостью времени. — *Прим. ред.*

развития жизни, так и происходящие ежедневно на наших глазах процессы онтогенеза<sup>1</sup>.

Но пора нам спуститься с абстрактных высот и обсудить различные свойства времени в физике, свойства, с которыми теснейшим образом связано наше человеческое время.

*В статистической механике, как и в термодинамике, необратимость не доказывается, а постулируется*

Если бы при доказательстве теоремы Карно мы приняли за постулат, что в изотермическом процессе поглощается теплота и производится работа, а при соприкосновении двух термостатов тепло течет от менее нагретого к более нагретому, то вытекающие из теоремы Карно утверждения изменились бы на противоположные. В этом случае мы попали бы в парадоксальную вселенную, рассматривавшуюся Фламарионом и Пуанкаре. В этой вселенной при соприкосновении двух тел одинаковой температуры одно (но не известно какое) начнет нагреваться, а другое — охлаждаться. Трение в парадоксальной вселенной приводило бы не к замедлению, а к ускорению, и тела, которые сначала находились в покое, начинали бы двигаться по траекториям, предсказать которые невозможно. В такой вселенной стало бы невозможным не только предсказание, но и действие, так как все наши движения приводили бы к громадным непредвидимым последствиям. Правда, необратимые превращения энергии всех видов дорого обходятся инженерам, но мы начинаем понимать, что именно в результате этого старушка Вселенная обеспечивает нашу безопасность; по этой же причине мы уверены, что после всех бурь, какие, быть может, будут вызваны нами самими, мы вернемся к состоянию покоя.

О своей парадоксальной вселенной Пуанкаре говорил, что это вселенная без законов. Точнее было бы сказать: в этой вселенной нет причинных законов, определяющих конечное состояние. В нашей реальной Вселенной возможно статистическое предсказание будущего (включая

---

<sup>1</sup> Онтогенез — индивидуальное развитие животного или растительного организма от момента зарождения до окончания жизни.— *Прим. ред.*

биологические и психические явления), тогда как в парадоксальной вселенной в противоположность этому было бы возможно лишь восстановление прошедшего — операция, обратная предсказанию будущего.

*Будущее предсказывается статистически,  
а восстановление прошедшего невозможно!*

Прежде всего обратим внимание на тот удивительный факт, что в нашей физической вселенной прослеживание прошедшего, вообще говоря, невозможно.

Казалось бы, прошедшее событие, зарегистрированное в документах, относится к числу установленных фактов. Однако в действительности всякое восстановление прошедшего существенно основывается на физиологической памяти; если даже речь идет о фактах, тщательно зарегистрированных в архивах, то и здесь память необходима, так как именно она является ключом для интерпретации документов. Память и интуиция служат путеводной нитью при знакомстве со следами прошлого, без них восстановление прошлого окажется лишенным твердой основы:

Я вижу волны на зеркальной глади озера и догадываюсь, что недавно прошел катер, но, чтобы указать, какой именно, надо знать типы катеров и вспомнить кое-что из своей практики, рискуя при этом впасть в значительную ошибку, если я прибыл из другой страны. Между тем местные жители безошибочно укажут, что волны были подняты' примерно пять минут тому назад.

Если взорвался снаряд либо произошла авиационная или автомобильная катастрофа, то невозможно в точности определить положение, которое существовало до взрыва, то есть в точности восстановить состояние снаряда перед взрывом.

При изучении доисторического человека мы не можем в точности восстановить его облик или выяснить способы применения им своих орудий, если не будем опираться на сходство между людьми, которых разделяют тысячелетия, и пользоваться аналогией между проблемами, возникавшими между нашими далекими предками, и проблемами, возникающими между нашими соотечественниками.

Крупнейшие специалисты по небесной механике, хорошо знающие, как будет развиваться Солнечная система в дальнейшем, не могут прийти к общему мнению в вопросе о ее происхождении, поскольку современные астрономические наблюдения дают возможность изучить далекие галактики, но не позволяют узнать историю планет Солнечной системы.

Эти примеры, число которых можно было бы значительно умножить, приводят к заключению, что в материальной вселенной восстановление прошедшего обычно невозможно, тогда как будущее статистически предсказуемо.

Здесь слово «статистически» имеет огромное значение, так как оно выражает важнейшие понятия современной физики. Вместе с родственным ему понятием информации, изучаемым в кибернетике, это понятие играет большую роль в истолковании проблем необратимости в физике. В этой связи исследователи разных стран мира все более часто подчеркивают значение принципа Байеса.

### *Теорема Байеса и проблема нахождения причин<sup>1</sup>*

Пусть несколько причин ( $C_1, C_2, \dots$ ) вызвали или могли вызвать события ( $E_1, E_2, \dots$ ). Пусть, например, оказывается, что в действительности произошло событие  $E_1$ . Можно ли оценить, какая из причин была наиболее вероятной?

Особенности проблемы хорошо иллюстрируются на примере Пуанкаре. Вы играете в карты с противником, про которого вы не знаете, шулер (Ш) он или честный партнер (Ч). При первой же раздаче карт к нему приходит король (К) — карта, которая выигрывает. Жульничает ли ваш партнер? Анализ, основанный на введении условных вероятностей, производится следующим образом:

$V(K|Ш)$  = вероятности того, что короля выбросил шулер (эту вероятность Пуанкаре не совсем точно считает равной единице, что несколько упрощает вычисление, но не имеет принципиального значения).

$V(K|Ч)$  = вероятности того, что короля получил честный игрок (по определению понятия честности

---

<sup>1</sup> Более подробное объяснение теоремы Байеса см. в предисловии к русскому изданию. — *Прим. ред.*



$B(K|Ч) = \frac{4}{32} = \frac{1}{8}$ , так как среди 32 карт имеется 4 короля, а все карты предполагаются равновероятными).

Нетрудно показать, что схема не является полной — не хватает параметра, например вероятности  $t_1$ , называемой априорной вероятностью того, что противник является шулером. Находим:

$t_2 = B(Ш|K)$  = вероятности того, что противник шулер, если известно, что он выиграл при первом бросании (вероятность *a posteriori*).

$$t_2 = \frac{t_1}{\frac{1}{8} + \frac{7}{8} t_1} = \frac{8t_1}{1 + 7t_1}$$

Как и следовало ожидать,  $t_2 \gg t_1$  ( $t_2 > t_1$ , если  $t_1 < 1$ ).

Другими словами, этот опыт не приводит к какому-либо вполне определенному результату; он лишь изменяет наши представления о вероятности ( $t_2 \neq t_1$ ).

Если вероятность  $t_1$  уже сама по себе велика, то  $t_2$  будет близка к  $t_1$  и игроку надо быть осторожным. Для  $t_1 = 1/2$  (Пуанкаре предложил это значение, чтобы сделать парадокс более ясным, но нужно быть глупцом, чтобы сесть играть с противником, про которого считаешь, что с вероятностью  $1/2$  он является шулером) получим  $t_2 = 8/9$ , то есть почти достоверно, что мы имеем дело с жуликом.

В общем случае, когда число причин  $C_i$  и число событий  $E_j$  конечны, формула Байеса записывается в виде

$$B(C_i|E_j) = \frac{B(E_j|C_i) \cdot B[(a\ priori) C_i]}{\sum_i B(E_j|C_i) \cdot B(C_i)} ;$$

$B(C_i|E_j)$  = вероятности *a posteriori* того, что событие  $C_i$  вызвано причиной  $E_j$ .

$B(E_j|C_i)$  = вероятности того, что причина  $C_i$  вызвала событие  $E_j$  (механизм связи между ними может быть известным или не известным).

Таким образом, восстановление прошедшего может производиться лишь в том случае, если известны априорные вероятности, то есть если уже предполагается ка-

кое-то знание о прошедшем, знание настоящего может его только уточнить.

Приведенная выше формула не симметрична по отношению к вероятности  $B(C_i|E_j)$  и вероятности  $B(E_j|C_i)$ . Она станет симметричной лишь в том случае, если все вероятности а priori считать равными (мы только что видели на примере, насколько эта гипотеза может быть неразумной), и проблема восстановления прошлого становится полностью симметричной по отношению к проблеме предсказания («слепое» восстановление Ватанабе). Таким образом, наша проблема оказалась тесно связанной с неравенством коэффициентов Байеса, то есть наличием асимметрии между предсказанием  $B(E_j|C_i)$  и восстановлением прошлого  $B(C_i|E_j)$ .

Но если эти коэффициенты оценивать независимо от внутренней динамики изучаемой системы, естественно, они будут характеризовать лишь способ взаимодействия системы с остальной частью Вселенной. Когда мы интересуемся будущим, этим взаимодействием практически можно пренебречь, но про него нельзя забывать, если мы хотим разобраться в причинах.

### *Статистическая механика и восстановление прошедшего*

Теперь возникает вопрос, почему допустимо пренебрегать взаимодействием отдельной системы со всей остальной Вселенной, когда мы интересуемся будущим, и почему этого нельзя делать, когда мы изучаем прошедшее? (Именно это делает изучение столь трудным, так как невозможно получить достаточно точную и полную информацию обо всей Вселенной). Этими вопросами занимается эпистемология статистической механики.

Сейчас нам нет необходимости обращаться к детально разработанным представлениям, касающимся современных способов доказательства теоремы Больцмана в статистической механике (теоремы о возрастании энтропии); мы только усложнили бы изложение, не добавив ничего нового по существу.

Достаточно привести простой пример, снова заимствованный у Пуанкаре. Пуанкаре рассматривает проблему квазиравномерного распределения малых планет по их общей траектории; для простоты он принимает, что

эта траектория круговая, а малых планет бесконечно много и они не взаимодействуют между собой. Пусть  $a$  — средняя угловая скорость,  $b$  — начальное угловое положение малой планеты,  $f(a, b)$  — плотность распределения в соответствующей точке  $(a, b)$ . Пуанкаре замечает, что, какой бы ни была непрерывная по отношению к  $a$  функция  $f(a, b)$ , выражение

$$M = \int \int_{-\infty}^{\infty} e^{at+b} f(a, b) da db$$

стремится к нулю, когда  $t$ , возрастая, стремится к положительной бесконечности. Отсюда, например, следует, что, каким бы ни было начальное положение большой планеты, окончательное распределение малых планет будет приближаться к равномерному. Этот результат своей общностью явно удовлетворил Пуанкаре.

Но если  $t$ , убывая, стремится к отрицательной бесконечности, то  $M(t)$  также стремится к нулю. Можем ли мы отсюда заключить, что большая планета, наблюдаемая в данный момент времени, возникла в результате соединения в одно целое однородного роя малых планет? Очевидно, нет. Этот парадокс невозможно разрешить, если не ввести следующее правило: статистическая механика приспособлена для того, чтобы с ее помощью можно было предсказывать будущее, но ее нельзя непосредственно использовать для восстановления прошлого.

Именно с этим и только с этим правилом связана необратимость, которая столь долго обсуждалась в статистической механике. Таким образом, необратимость не выводится, а кладется в основу в качестве исходного принципа. Теперь проанализируем физическое значение этого правила.

*В статистической механике закон возрастания энтропии выводится из принципа запаздывающих действий*

Мы хотим сказать следующее: маловероятная конфигурация, задаваемая в начальный момент в качестве основы для изучения последующего развития системы, никогда не возникает в результате предыдущего естественного развития системы. Для систем с конечным числом степеней свободы выполняется «теорема возвраще-

ния» Пуанкаре, согласно которой, если система уже находилась в некоторой конфигурации, то с течением времени она бесконечное число раз будет оказываться сколь угодно близко к этой же конфигурации. Например, если в стакан воды пущена капля чернил и если через некоторое время она равномерно распределяется по всему стакану, то через достаточно большой промежуток времени чернила снова должны будут собраться в одну каплю. Правда, этого никто не видел, но дело, очевидно, в том, что содержимое стакана хотя и слабо, но взаимодействует с остальной частью Вселенной, так что мы уже не имеем дела с системой с конечным числом степеней свободы.

Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Маловероятная конфигурация всегда является результатом взаимодействия изучаемой системы с другой системой, которое в рассматриваемый момент времени практически прекратилось. Маловероятная конфигурация создается физиком, выпускающим из пипетки каплю чернил в стакан воды; большой планетой, находившейся в состоянии неустойчивого равновесия и неожиданно взорвавшейся; камнем, упавшим в спокойный пруд и создавшим расходящиеся волны, которым передалась энергия камня. Эти примеры иллюстрируют принцип запаздывающих действий.

Предположим, две системы в течение некоторого промежутка времени сильно взаимодействовали между собой, а до и после этого были разделены. В конце взаимодействия каждая система приходит в маловероятное состояние, которое служит началом для последующей эволюции, но при этом само маловероятное начальное состояние не возникает в результате эволюции одной из систем. Когда метеорит попадает в земную атмосферу, он рождает расходящиеся баллистическую и тепловую волны, но не встречает сходящейся волны, возникшей ранее. А если сместить поршень внутри сосуда, в котором находится газ, то отступление от термического равновесия (максвелловского закона распределения скоростей) возникает после смещения, а не до него.

Таким образом, мы приходим к следующим двум положениям:

1. Закон запаздывающих действий по существу не отличается от закона возрастания энтропии.

2. Закон запаздывающих действий — чисто статистический закон, так что к отдельным элементарным явлениям он неприменим.

Обдумывая эти положения, приходим к выводу, что нет какого-либо объективного доказательства применимости закона запаздывающих действий к индивидуальному явлению. Но для индивидуальных взаимодействий даже в квантовой механике существует симметрия между прошедшим и будущим.

*Закон запаздывающих действий может быть обратно выведен из принципа возрастания энтропии*

Возьмем любой из рассмотренных примеров систем с взаимодействием. Характерно то, что если в системе отсчета, связанной с центром тяжести, вычислить кинетические энергии составных частей, то после взаимодействия они будут ближе к равномерному распределению, чем до него; так, при прохождении земной атмосферы метеорит тормозится, а не ускоряется.

На основе проведенного выше анализа мы, наконец, можем сделать вывод, что принцип возрастания энтропии и принцип запаздывающих действий могут быть выведены один из другого, то есть они эквивалентны, а кроме того, они имеют существенно макроскопический и статистический характер.

В частности, для индивидуального элементарного явления принцип запаздывающих действий неприменим.

*Окончательное объяснение необратимости следует искать в масштабах всего космоса.*

*Математически необратимость выражается с помощью начальных условий для всего космоса*

Из предыдущего следует, что при изучении причин необратимости нам всегда приходится включать частную систему в более обширную систему. Переходя от принципа запаздывающих действий к принципу возрастания энтропии и наоборот, мы в конце концов вынуждены рассматривать всю Вселенную. Это прямо противоположно тому, с чем обычно встречаются в физике; дело в том, что источник необратимости нельзя искать в элементарных законах. Если во всех частных случаях эволюция про-

исходит в одном и том же известном направлении, то это неизбежно приводит к выводу, что причина связана с эволюцией всей Вселенной. Здесь мы имеем дело с очень редким для физики примером, когда целое ограничивающим образом влияет на свою часть.

Так все метастабильные равновесия и все «случайные» столкновения между системами, которые до этого «игнорировались», оказываются связанными с громадным запасом маловероятных состояний, которые таятся до сих пор в космосе. Это как бы своего рода «ископаемые», которые сохранило время и которые содержат в себе отпечаток крайне маловероятного начального состояния Вселенной, напоминания о начальном взрыве, как осколки после грандиозного фейерверка. Пространственно-временная эволюция Вселенной подобна гигантскому бесконечно расходящемуся каскаду. Поэтому принцип всеобщей необратимости может иметь лишь следующее выражение: состояние Вселенной на некоторой гиперповерхности (пространственноподобного вида) задано как крайне маловероятное.

*Эквивалентность принципа возрастания энтропии  
и принципа запаздывающих действий в теории  
квантованных волновых полей*

В настоящее время мы знаем, что основной механикой является не ньютоновская, а волновая механика. Поэтому и статистическая<sup>3</sup> механика отныне должна строиться на основе волновой механики.

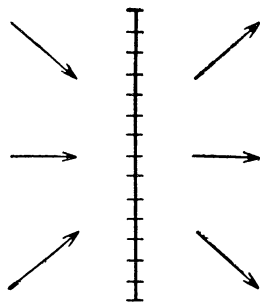
Что касается результата, полученного нами с помощью детального эпистемологического анализа (а именно эквивалентности между принципом возрастания энтропии и принципом запаздывающих действий), то он будет получаться теперь на новой основе.

Вспользуемся простым примером. Рассмотрим плоскую решетку рис. 11, на которую перпендикулярно падает «материальная волна», в свою очередь рождающая конечное число  $g$  расходящихся волн. Без нарушения общности мы можем предположить, что вероятности перехода частицы в любую из плоских расходящихся волн равны между собой. Это, разумеется, должно соответствовать опытному результату, устанавливающему одинаковую интенсивность всех плоских расходящихся волн.

Рассмотрим теперь оптическую проблему обратного волнового движения. Каждая плоская расходящаяся волна может порождаться

одной из  $g$  плоских падающих волн. И если установлено, что частица находится в одной из плоских расходящихся волн, и если, кроме этого, ничего не известно (за исключением факта существования решетки и ее характеристик), то единственное, что мы можем сказать: падающая частица несомненно связана с одной из  $g$  плоских волн, причем вероятности нахождения частицы в каждой из этих волн одинаковы. Однако известно, что в макроскопическом опыте путем «смещения фаз», падающих на решетку  $g$  плоских волн равной интенсивности, невозможно получить пучок частиц с одинаковыми импульсами.

Этот простой пример показывает, каким образом в теории квантованных полей принцип возрастания энтропии и принцип запаздывающих волн оказываются эквивалентными. В квантовой механике запаздывающие и опережающие волны применяются соответственно для вычислений, связанных с предсказанием будущего и с восстановлением прошлого, поэтому почти очевидно, что исключение опережающих волн в макроскопической теории и восстановление прошлого тесно связаны между собой.



Р и с. 11. Опыт с решеткой.

Знаменитая теорема Неймана в следующем смысле устанавливает необратимость процесса квантового измерения: если принять, что макроскопические квантовые волны являются запаздывающими (расходящимися), то отсюда следует, что при измерении происходит возрастание энтропии. Принцип запаздывания волн применяется к интервалам времени, разделяющим два измерения, а закон возрастания энтропии — к интервалам времени, в течение которых производятся измерения. Если же, напротив, допустить макроскопическое существование сходящихся или опережающих квантовых волн, то отсюда будет вытекать закон убывания энтропии. В результате мы попадем в парадоксальную вселенную, рассматривавшуюся Фламарионом и Пуанкаре.

### *Требования теории относительности и кибернетики*

В настоящее время, когда вся физика, включая микрофизику и астрофизику, стала релятивистской, два традиционных понятия стали, строго говоря, запрещенными. Первое связано с разделением событий на два класса: «уже произошедших» и «еще не произошедших» (световой конус делит релятивистское пространство-вре-

мя уже не на две области, как раньше, а на три: прошедшее, будущее и внешняя область). Для двух событий, разделенных пространственноподобным интервалом, больше не существует порядка следования, а это запрещает считать, что будущее еще не произошло, а прошедшее уже произошло<sup>1</sup>.

Теперь все пространственно-временное многообразие следует рассматривать как единое целое.

Это подтверждается существованием релятивистской волновой механики — четырехмерной существенно вероятностной теории. (В современном виде ее построили Томонага, Швингер и Фейнман в 1946—1950 годах.)

В релятивистской физике уже не имеет смысла вопрос, поставленный еще Пуанкаре: почему Вселенная движется во времени к наиболее вероятным состояниям, а не наоборот? Возникает совсем иной вопрос: пространство-время таково, что его расслоение на непрерывно следующие одна за другой произвольные пространственноподобные гиперповерхности упорядочивается по монотонно изменяющимся значениям энтропии; почему же время живых и сознательных существ должно протекать вдоль четвертого измерения в таком направлении, чтобы энтропии систем представлялись возрастающими, а волны — расходящимися, но не наоборот?

Во многих традиционных курсах статистической механики встречается замечание о том, что случай входит в эту теорию только вследствие нашего незнания деталей явлений. Это слишком сильное утверждение, так как многие следствия, вытекающие из возрастания энтропии, бесспорно, объективны и поэтому в конечном итоге не могут быть объяснены чисто субъективным образом. По утверждению Пуанкаре, нужно, чтобы случай был чем-то иным, нежели простым указанием на наше незнание. Дело не в том, будем ли мы знать более или менее точно, куда или откуда полетит один из фотонов, излучаемых Солнцем. Присутствует ли при этом наблюдатель или нет, энтропия Вселенной все равно будет возрастать. Иными словами, выбор ячеек, имеющих физический

---

<sup>1</sup> Это утверждение ошибочно. Каждый данный объект может двигаться только внутри светового конуса, где разделение прошедшего и будущего полностью сохраняется. Только для событий, произошедших с разными объектами (внешняя область), нельзя различить прошлое и будущее.— *Прим. ред.*



смысл в фазовом пространстве, не может быть совершенно произвольным.

Как отметил Бриллюэн, кибернетика очень интересным способом уточнила эту классическую идею, отождествив энтропию с недостатком информации о системе. Но здесь необходимо ввести важное ограничение — Бриллюэн вынужден был ввести различие между «свободной» информацией (или чистой, произвольно определяемой информацией) и информацией, «связанной» с физической энтропией. Бриллюэн констатирует, что это различие необходимо, но тем не менее в некоторых случаях оно заметно затушевывается. Если к тому же добавить, что тонкий механизм превращения информации в негэнтропию<sup>1</sup> остается в высшей степени таинственным (поскольку, например, не вполне обоснованным представляется применение при выводе воображаемых идеально твердых стенок, не обладающих ни трением, ни массой), то это доказывает, что должным образом проблема еще не решена. Но одна вещь представляется нам несомненной: в кибернетике, как и в физике, попытка проведения в жизнь радикального субъективизма приводит к нелепостям; понятие связанной информации должно содержать нечто такое, что имеет объективный смысл.

Таким образом, если мы допустим, что каждому состоянию Вселенной, характеризующему пространственноподобной гиперповерхностью, соответствует объективное значение энтропии, мы должны сформулировать принцип, определяющий известное нам направление течения биологического и психологического времени. Однако не стоит придумывать что-либо новое, так как Бриллюэн уже четко сформулировал подобный принцип, назвав его «физическим принципом информации»: в макроскопическом опыте приобретаемая системой информация (в кибернетическом смысле) может быть связана лишь с уменьшением негэнтропии или, в крайнем случае, с ее неизменностью. Обратно: любая информация, имеющаяся у системы, может создавать негэнтропию, величина которой будет больше или равна количеству имеющейся информации.

---

<sup>1</sup> Негэнтропией называют энтропию, взятую с обратным знаком: если энтропия равна  $S$ , то негэнтропия —  $-S$ . Когда энтропия возрастает, негэнтропия уменьшается. — *Прим. ред.*

Искомый принцип теперь ясен — это принцип возрастания информации, имеющий опытное макроскопическое происхождение, а это приводит к тому, что разумные существа будут пересекать гиперповерхности в направлении, соответствующем возрастанию энтропии и расхождению волн. Прохождение четвертого измерения в обратном порядке столь же нелепо, как и чтение в обратном порядке математической или философской книги, где теория строится на основе последовательного изложения материала. Поэтому не будет большой ошибкой считать, что между сознательной жизнью и логическим мышлением существует очень глубокая внутренняя связь. Это соответствует связи между направлением сознательной жизни и тем, читается ли книга от начала к концу или от конца к началу.

Все, о чем мы говорили выше, фактически является переформулировкой на современном языке общих идей, высказанных Больцманом еще в то время, когда не были известны ни теория относительности, ни кибернетика. Интерес к подобного рода идеям вполне естествен, так как убывание негэнтропии постоянно проявляется на опыте. Именно оно придает конструктивный характер нашим опытам, в том числе и опытам с элементарными частицами, придает смысл нашей истории и нашей жизни и, точнее, смысл всякой истории и всякой жизни. С этим связана не только приобретаемая нами информация, но также и наш разум. Поэтому трудно оставаться безразличным, когда перелистываешь страницы нашей жизни, тесно связанные со страницами великой книги космоса.

## ВРЕМЯ В МИКРОФИЗИКЕ

---

Если время, как это, по-видимому, следует из проведенного выше анализа, является чисто статистическим понятием, то определять или измерять его можно лишь относительно некоторой системы, поскольку о вероятности можно говорить лишь по отношению к некоторому множеству.

Здесь возникают два вопроса: во-первых, как связаны между собой времена, определяемые по различным часам, или, другими словами, как связаны между собой времена различных систем; во-вторых, можно ли определять время для очень ограниченного множества, в пределе состоящего из одной частицы.

Первый вопрос мы рассматривать не будем, так как выше уже отмечался опытный факт, возведенный в ранг принципа: если при измерении времени для двух систем возникает расхождение, то оно всегда может быть объяснено какими-либо неточностями и экспериментальными ошибками. Это утверждение лежит в основе понятия универсального времени.

Последняя статья, написанная Робером Ленньюе, посвящена рассмотрению второго вопроса.

Результаты современной науки в большей или меньшей степени связаны с ее тремя основами: теорией относительности, квантовой механикой и теорией информации. Именно на них должно основываться научное понятие времени, в противном случае мы не сможем учесть подлинные свойства той реальности, на которой основан современный научный анализ, анализ мира, в котором мы живем и с которым мы столь тесно связаны.

## ВРЕМЯ В НОВЕЙШЕЙ ФИЗИКЕ

В истории человеческих знаний физические науки лишь относительно недавно стали играть значительную роль — сначала понятие времени рассматривалось и анализировалось с метафизических позиций. Так называемое «классическое» время рассматривалось как универсальное время, текущее само по себе и не зависящее от особенностей физического мира; наряду с этим и пространство рассматривалось как универсальное — своего рода канва, на которой разворачиваются мировые события.

Метафизическое понятие времени в более или менее явном виде было принято также физиками. Чтобы превратить его в определение физической величины, допускающей измерения, они внесли в него необходимые уточнения.

И лишь непредвиденное развитие физики в последнее пятидесятилетие заставило физиков более тщательно проанализировать понятие времени и внести в него глубокие уточнения, обзор которых мы попытаемся здесь дать.

*Время в классической физике*

Известно, что классическая физика связана с обширной детально разработанной в математическом отношении теорией — классической механикой, которая занимается теоретическим изучением движений тел, то есть их перемещений в пространстве с течением времени. Время в классической механике — величина алгебраическая и является переменной  $t$ , характеризующей положение или состояние движущихся тел. Определение времени, предлагаемое в классической механике, таким образом, чисто математическое.

Физик или астроном, желающий применить классическую механику для изучения и предсказания наблюдаемых явлений, должен определить масштаб времени — то, что мы называем часами. Фактически часы оказываются устройством, позволяющим связать значения какой-либо непрерывно изменяющейся величины со значениями времени. Если речь идет об определении физического масштаба времени, то такое соответствие устанавливается а priori и служит определением времени  $t$ .

Физик, вообще говоря, ничем не связан в определении времени, однако в целях удобства он должен определять его таким образом, чтобы оно соответствовало обычному понятию равномерно текущего необратимого времени. Но этого недостаточно, чтобы физик или астроном смог применять для исследования физического мира уравнения классической механики. Нужно еще, чтобы экспериментальное физическое определение времени соответствовало математическому определению, даваемому в классической механике. Дело в том, что уравнения механики не будут справедливы при использовании любого масштаба времени: если они справедливы для некоторого времени  $t$ , то они останутся верными для нового времени лишь в том случае, если оно связано с временем  $t$  линейным преобразованием:  $t' = at + b$ . Если же переменную  $t$  преобразовать произвольным образом, основные уравнения механики изменятся. Именно поэтому экспериментальное определение времени должно быть таким, чтобы оно было связано с механическим временем  $t$  через посредство линейного преобразования.

Это условие и накладывается на практике, поскольку, согласно замечанию Пуанкаре, наш масштаб времени выбирается таким образом, чтобы уравнения механики оставались справедливыми. Теоретически для этого нужно, чтобы в качестве часов было выбрано такое механическое устройство, которое изучается в классической механике и которое дает возможность установить простое взаимно однозначное соответствие между переменной  $t$  и некоторой пространственной величиной. Если такое соответствие принять в качестве определения времени, то проблема решается путем измерения выбранной физической величины.

Решение проблемы таким путем достигается лишь в первом приближении. На практике невозможно реализовать идеальные часы, то есть реализовать или найти в природе такое устройство или явление, которое строго удовлетворяло бы всем необходимым условиям. В результате точные хронометры, которые мы создаем, должны контролироваться и регулироваться часами, которые предполагаются идеальными и за которые принимается Земля, вращающаяся вокруг своей оси. Однако это не дает полного решения вопроса, так как между астрономическими вычислениями (основанными на теоретичес-

кой или математической шкале времени) и наблюдениями, проводимыми с помощью реальной, земной шкалы времени<sup>1</sup>, существуют малые расхождения, свидетельствующие о том, что земные часы не строго тождественны идеальным часам классической механики. Это справедливо даже после поправки на эффект Дарвина, то есть при учете торможения вращения Земли приливами (приводящего к замедлению на  $8\frac{2}{3}$  секунды в столетие).

Мы подробно останавливались на этих вопросах, чтобы обратить внимание на характер понятия времени в классической физике. Это время является лишь более или менее точной практической реализацией математического времени классической механики. Если, желая углубить понятие времени, мы обращаемся к классической физике, мы не должны надеяться, что найдем здесь какие-либо иные указания о времени, отличающиеся от исходных представлений классической механики. Лишь выйдя за рамки классической физики, мы сможем по-новому взглянуть на понятие времени. При обсуждении подобного рода вопросов философ всегда может не связывать себя конкретными утверждениями, однако в результате его рассуждения становятся неопределенными и спорными. Что касается физика, то ему приходится сталкиваться с новыми совершенно неожиданными фактами, несовместимыми со старыми представлениями, а это побуждает его пересматривать даже самые глубокомысленные постулаты, которые ранее казались достаточно хорошо обоснованными.

### *Время и теория относительности*

Какой точный смысл имеет следующее утверждение: два события А и В происходят одновременно, одно — на Земле, а другое — на удаленной звезде, скажем на Сириусе?

Дорелятивистского физика этот вопрос совсем не затруднил бы. Он сразу же ответил бы: одновременность двух событий означает, что они происходят в один и тот же момент времени. Тот факт, что одно из событий происходит на Земле, а другое на Сириусе, не имеет никакого значения.

---

<sup>1</sup> Имеется в виду время, определенное исходя из допущения о равномерном вращении Земли вокруг своей оси.— *Прим. ред.*

Этот ответ на первый взгляд кажется простым и очевидным, однако, если разобраться глубже, окажется, что его трудно обосновать. В нем неявно предполагается существование универсального абсолютного времени, одинакового для Сириуса и для Земли; только при этом условии приобретает смысл выражение «в один и тот же момент времени». Для дорелятивистского физика постулат об универсальном времени казался совершенно очевидным, поэтому в данном вопросе для него не существовало никакой трудности.

Однако, для того чтобы такой ответ был с точки зрения физика приемлем, нужно его обосновать не только словами. Утверждая, что события А и В одновременны, необходимо указать на способ, который позволил, хотя бы теоретически, проверить такую одновременность. Если отказаться от первого постулата об универсальном характере времени, то способ проверки превратится в определение одновременности. Однако, хотя легко обнаружить одновременность двух событий, происходящих в одном и том же месте, этого уже нельзя сказать о событиях, совершающихся в очень удаленных точках.

Анализ этой проблемы приводит к выводу, что для ее решения необходимо воспользоваться, например, световыми сигналами. Наблюдатели в точках А и В могут обмениваться такими сигналами между собой, а если потребуется, то и с третьим наблюдателем, находящимся вне точек А и В. Но такие сигналы распространяются с конечной скоростью, равной скорости распространения света (предположение о существовании сигналов, распространяющихся мгновенно, недопустимо). Возникает новая серьезная трудность: определение одновременности должно зависеть от скорости света, а также от скоростей систем отсчета, с которыми связаны события А и В.

Представитель классической физики попытался бы обойти эту трудность с помощью понятия абсолютной скорости. Знание абсолютных скоростей рассматриваемых тел (точек А, В и скорости распространения света) позволило бы ему с помощью несложных выкладок обосновать понятие абсолютной одновременности и получить простое определение, о котором говорилось выше.

Подобного рода взгляды господствовали в конце XIX века, когда были поставлены знаменитые опыты Майкельсона и Морли. Основная идея опытов заключа-

лась в следующем. По отношению к пространству, которое в то время считалось заполненным электромагнитным эфиром, свет распространяется с постоянной скоростью  $c$ . В данный момент Земля движется по отношению к этому пространству со скоростью  $v$ . Считалось, что скорость распространения луча света будет заключена в пределах от  $c+v$  до  $c-v$  и должна зависеть от направления относительного перемещения луча, поэтому время распространения между двумя частями оптической установки в каждом из этих случаев должно быть различно; если такое различие удастся обнаружить с помощью явлений интерференции, то появится средство для определения абсолютной скорости Земли в пространстве.

Однако опыты, повторявшиеся много раз лучшими экспериментаторами того времени, неизменно приводили к отрицательному результату. Оказалось, что нельзя обнаружить движение Земли по отношению к пространству, даже если последовательные измерения производить с интервалами в шесть месяцев. Это такой промежуток времени, когда направление перемещения Земли по отношению к пространству меняется на противоположное, и, если исходить из обычных методов, скорость Земли должна измениться на 60 километров в секунду.

Перед физиками возникли большие трудности, и потребовался гений Эйнштейна, чтобы указать выход из тупика. Эйнштейн показал, что абсурдные выводы получаются лишь в том случае, если принять неявные постулаты о существовании абсолютного пространства и абсолютного времени. Что доказывает отрицательный результат опытов Майкельсона и Морли? Фактически он устанавливает лишь независимость скорости распространения света в пустоте от того, в какой галилеевой системе отсчета определяется эта скорость. Если отказаться от понятия абсолютного времени, этот опытный результат, возведенный специальной теорией относительности в принцип, будет полностью совместим с определением времени в классической механике, в которой основные законы динамики предполагаются инвариантными по отношению к переходу от одной галилеевой системы отсчета к другой произвольной галилеевой системе. Развитие теории, таким образом, показало, что время может определяться лишь локально: оно зависит от состояния движения и от положения часов по отношению к наблюдателю.



В частности, замедление течения времени в движущейся системе отсчета для наблюдателя, связанного с неподвижной относительно него системой отсчета, характеризуется множителем  $1 - v^2/c^2$ , где  $v$  — скорость системы относительно наблюдателя, а  $c$  — скорость света. Для движущихся тел, с которыми нам приходится иметь дело в обыденной жизни, отношением  $v^2/c^2$  всегда можно пренебречь, однако оно становится значительным для элементарных частиц, скорость которых приближается к скорости света, — оказывается, процесс замедления времени можно проверить на опыте.

Скорость мезонов космических лучей, попадающих на поверхность Земли, приближается к скорости света. Мезоны образуются в верхних слоях атмосферы и прежде, чем достичь Земли, проходят несколько десятков километров, причем их скорость можно приблизительно определить. Поскольку она очень близка к скорости света, для таких частиц эффект релятивистского замедления часов должен быть чрезвычайно большим. Кроме того, известно, что мезон радиоактивен, то есть он не стабилен и самопроизвольно распадается. Замедлив такие мезоны до очень малых скоростей, можно измерить их среднюю продолжительность жизни. В результате удалось измерить время жизни покоящегося мезона, которое оказалось равным 2 миллионным долям секунды. Если мезон будет двигаться даже со скоростью света  $c$ , то при таком времени жизни до своего распада он не прошел бы более 500 или 600 метров. Однако опыт показывает, что он проходит в 20 раз большее расстояние. Дело в том, что здесь нужно учитывать релятивистский эффект замедления часов, и только теория относительности дает возможность объяснить опытные факты. Пусть, например, в результате наблюдения за мезоном физик находит, что время жизни мезона в покое равно  $2 \cdot 10^{-6}$  секунд, а при движении со скоростью, с которой он проходит через атмосферу, оно возрастает до  $4 \cdot 10^{-6}$  секунд. Рассмотрим теперь часы, связанные с движущимся мезоном. Вследствие их движения показываемое ими время течет медленнее, чем время у наблюдающего их физика. Поэтому, когда на часах физика пройдет время, равное  $40 \cdot 10^{-6}$  секунд, на часах, связанных с мезоном, пройдет лишь  $2 \cdot 10^{-6}$  секунд. Для наблюдателя, связанного с мезоном, время жизни последнего всегда будет равно  $2 \cdot 10^{-6}$  се-

кунды, так как для него мезон находится в покое. Однако для физика, который связан с Землей и по отношению к которому мезон движется, времени жизни мезона, равному  $2 \cdot 10^{-6}$  секунды, будет соответствовать по земным часам  $40 \cdot 10^{-6}$  секунды. Получается непосредственное, очень интересное подтверждение закона замедления времени в движущейся системе отсчета.

Не касаясь других следствий теории относительности, мы в нескольких словах обрисуем возникшее положение. Дорелятивистская физика исходит из представления об абсолютном универсальном времени, не зависящем от пространства и от движения. Теперь эти представления существенно меняются — время становится величиной, тесно связанной с движением и с пространством: существует столько же различных времен, сколько имеется различных движений и точек пространства. При этом различные локальные времена являются временами в математическом смысле, в точности соответствующими постулатам об инвариантности законов динамики и неизменности скорости света при переходе от одной галилеевой системы отсчета к любой другой галилеевой системе.

Теперь посмотрим, каким образом это релятивистское время становится неприемлемым в квантовой физике.

### *Время в квантовой физике*

В основе современной физики лежит понятие квантования. Кратко напомним его смысл. Любая физическая система характеризуется некоторым числом сопоставленных с ней величин: положением в пространстве, скоростью, энергией и т. д. Именно с этими величинами имеет дело экспериментатор, причем любой опыт заключается в измерении одной или нескольких подобных величин. В классической физике принималось, что при соответствующим образом подобранных внешних условиях величины, сопоставленные с системой, могут принимать произвольные значения, по крайней мере в определенных пределах. В противоположность этому новая физика основывается на принципе, подтвержденном на опыте, согласно которому физическая величина в общем случае может принимать лишь дискретную последовательность значений. Поэтому физическая система, например атом,

не может переходить из одного состояния в любое другое состояние.

Волновая механика ставит своей целью:

1. Определять, какие возможные значения может принимать рассматриваемая величина для заданной системы.
2. Зная состояние системы в заданный момент, а также воздействия, которым она подвержена, предсказывать ее состояние в последующий момент  $t$ .

Ответ на второй вопрос в общем случае не вполне определен и не однозначен. Можно делать лишь статистические предсказания — находить вероятности того, что в конечном итоге система окажется в том или ином квантовом состоянии. Система может оказаться в любом состоянии, вероятность которого отлична от нуля. В результате законы новой физики уже не будут детерминистскими законами в обычном смысле этого слова, а лишь вероятностными законами. Статистические законы приводят к вполне определенным результатам только в том случае, когда мы выходим за пределы микроскопических масштабов и рассматриваем систему из очень большого числа элементарных систем; когда вступает в силу закон больших чисел, вероятностные распределения переходят в обычные распределения по состояниям.

Если нарушение классического детерминизма в микроскопическом масштабе столь существенно, как это, по-видимому, следует из современных представлений, то в микроскопическом масштабе необходимо отказаться от старого представления о времени. Фактически в физике время тесно связано с детерминизмом, и любое изменение подхода к одному из этих понятий должно приводить также к изменению подхода к другому понятию.

Теперь мы можем обратиться к основному вопросу: что происходит с понятием времени, когда мы переходим к микроскопическим масштабам? Для ответа воспользуемся специальными часами, часто называемыми радиоактивными часами. Рассмотрим некоторое количество радиоактивного вещества, содержащее очень большое число  $N_0$  атомов, которые в заданный момент  $t=0$  еще не распались. В процессе радиоактивного распада вещества число атомов  $N$ , которые остаются нераспавшимися в последующий момент  $t$ , с возрастанием  $t$  убывает так, что через некоторое время  $T$  остается лишь половина начального количества нераспавшихся атомов.

Параметр  $T$  называется средним временем жизни радиоактивного вещества<sup>1</sup>. В конце второго периода  $T$  останется лишь половина атомов, существовавших в конце первого периода  $T$ , и т. д. Таким образом, существует математическое (экспоненциальное) соотношение между числом нераспавшихся атомов  $N$  для данного момента и временем  $t$ , которое протекло до этого момента. Явление радиоактивного распада и указанное соотношение позволяют дать новое определение времени, причем опыт показывает, что это время будет совпадать с временем классической механики.

Чтобы установить свойства времени в микрофизической области, нужно постепенно уменьшать масштабы радиоактивных часов, то есть постепенно уменьшать начальное число атомов  $N_0$ . До тех пор пока число  $N_0$  остается очень большим, ничего нового не происходит. Как только  $N_0$  станет равным, например, нескольким сотням, идеальная регулярность описанного выше явления нарушится: время, определенное при помощи наших радиоактивных часов, будет испытывать нерегулярные флуктуации по отношению к обычному времени классической механики. Для конкретности предположим, что определенная выше средняя продолжительность жизни нашего вещества равна одному часу. Если в начальный момент  $N_0=100$ , то через 60 минут, вообще говоря, останется примерно 50 нераспавшихся атомов. Многократно повторяя опыт при  $N_0=100$ , мы увидим, что в конце часа будет оставаться, например, 47, 55, 52, 46 и т. д. нераспавшихся атомов. И лишь беря среднее от очень большого числа результатов, мы получим число, почти равное 50. Наблюдая моменты распада атомов, мы сможем констатировать, что они распределяются случайным образом.

Если мы будем исходить не из 100, а из 5 атомов, то можем прождать два часа и не увидеть распада ни одного атома, хотя может оказаться, что всего за полчаса распадется уже 3 атома. Вывод следующий — измерять время в микрофизическом масштабе при помощи радиоактивных часов невозможно: указываемое ими время, которое мы хотим считать собственным временем отдель-

---

<sup>1</sup> Точнее, временем полураспада (среднее время жизни равно  $T/\ln 2$ ). — *Прим. ред.*

ных атомов, по сравнению со временем нашего человеческого масштаба становится совершенно беспорядочным, так что замечательная регулярность, имеющая место для очень больших  $N_0$ , имеет лишь статистический характер<sup>1</sup>.

Рассмотрим это явление несколько подробнее. Пусть радиоактивное вещество содержит только один атом, среднее время жизни которого равно 60 минутам. Связаны ли еще и теперь эти 60 минут с нашим единственным атомом? Да, связаны, в одном случае из двух через 60 минут наш атом еще не распадется. Предположим теперь, что через 60 минут атом еще не распался. Означает ли это, что атом состарился и теперь он ближе к моменту распада, чем был 60 минут назад? Ни в коем случае. Если мы обнаружим, что в конце первых 60 минут наш атом еще не распался, то мы можем утверждать, что в одном случае из двух он распадется через следующие 60 минут. Таким образом, в любой момент атом имеет одну и ту же вероятность распада, или, образно выражаясь, одну и ту же будущность, вне зависимости от того, сколько до этого протекло времени, измеренного в нашем масштабе. Но это означает, что наше время не есть время атома, что вообще нет какой-либо возможности охарактеризовать старение радиоактивного атома и что момент распада не имеет никакого отношения к времени, так как при измерении времени в нашем масштабе мы сопоставляем его с совершенно произвольным «уровнем» жизни атома, причем между этим «уровнем» и моментом образования атома не существует никакой зависимости.

Все, что было сказано о радиоактивных атомах, впрочем, носит общий характер. Такие же соображения применимы к системе нерадиоактивных атомов в том случае,

---

<sup>1</sup> Следует подчеркнуть, что рассматриваемые в настоящей статье «парадоксы» связаны с новым определением времени при помощи случайного процесса. Эти парадоксы не характерны для микромира, а вытекают лишь из принятого «вероятностного» определения времени. Так, например, если взять Советский Союз или земной шар, то полное число рождающихся детей будет пропорционально протекшему времени. Однако если количество рождаемых детей по определению отождествить с истекшим временем и перейти к малым коллективам или отдельным семьям, то мы уже в макроскопическом масштабе приходим к тем же кажущимся противоречиям и парадоксам, о которых говорится в данной статье.— *Прим. перев.*

если на эту систему действует возмущение или же ее состояние с ненулевой вероятностью может переходить в другое состояние.

«Квантовый скачок» индивидуальной частицы в нашем масштабе времени является полностью неопределенным: невозможно установить «постарение» атома, который в момент  $t$  находится в начальном состоянии. Квантовые скачки совершенно случайны и только в очень большом числе опытов проявляется определенная статистическая закономерность. В микрофизическом масштабе понятие времени лишается обычного смысла: все происходит так, словно для микрофизических явлений больше не существует времени.

Но можно пойти еще дальше. До сих пор мы пользовались следующим выражением: «в момент времени (нашего масштаба) атом находился в таком-то состоянии». Это предполагает, что сохраняются понятия времени и одновременности и можно уточнить момент, когда происходит наблюдаемое явление.

Однако в микроскопическом масштабе понятие одновременности, как и понятие момента времени, лишено смысла. Это следует из четвертого соотношения неопределенности Гейзенберга, которое заключается в следующем. Если тщательно исследовать, как мы узнаем о микрофизических явлениях, то выясняется, что для уточнения состояния системы необходимо учитывать энергию, отданную этой системой. Если с помощью измерения мы одновременно определяем момент, когда произошел квантовый скачок, и значение энергии системы во время данного перехода, необходимо, чтобы время наблюдения равнялось некоторому интервалу  $\Delta t$ . Отсюда следует, что момент перехода может быть известен лишь с минимальной неопределенностью  $\Delta t$ . Кроме того, в общем случае энергия также определяется с некоторой неопределенностью, которую мы обозначим через  $\Delta E$ . Можно представить себе идеальный опыт, когда измерительная аппаратура настолько совершенна, что неопределенности  $\Delta t$  и  $\Delta E$  как угодно малы. Однако анализ Гейзенберга и результаты квантовой механики показывают, что нельзя достичь сколь угодно большой точности. По самой природе вещей даже в идеальном опыте невозможно точно узнать момент, когда происходит изменение состояния системы, и значение энергии рассматриваемой си-

стемы. Произведение неопределенностей двух величин по порядку величины равно постоянной Планка  $h$  (или больше ее, если измерение не является идеальным), величина этой постоянной хотя и мала, но отлична от нуля.

Отсюда следует, что для точного знания состояния системы необходимо, чтобы измерение проводилось в течение длительного промежутка времени, а это соответственно приводит к очень большой неопределенности в установлении момента наблюдаемого перехода. Обратно: мгновенное измерение, которое в нашем масштабе времени могло бы достаточно точно локализовать наблюдаемый момент, связано с очень большой неопределенностью в энергии, характеризующей систему. Поэтому невозможно получить точные сведения о явлении, которое локализуется нами во времени. Таким образом, точное знание явления исключает знание момента, в который оно происходит. Понятие момента времени оказывается затушеванным: невозможно строго определить понятие одновременности между двумя микрофизическими явлениями или между микрофизическим явлением и явлением, происходящим в нашем масштабе. А значит, понятие одновременности лишается точного смысла. Своеобразная зависимость между энергией рассматриваемой системы и моментом времени, когда происходит данное явление, показывает, что в конечном итоге время невозможно рассматривать независимо от тех явлений, которые мы хотим описывать при помощи времени.

## *Заключение*

Все большее разрушение классических представлений о времени приводит к тому, что приходится отказаться от первоначального представления о времени как о метафизической реальности, которая существует сама по себе и применима ко всей Вселенной. Согласно сказанному выше, можно высказать предположение, что идея о существовании времени в микрофизическом масштабе вообще лишена смысла<sup>1</sup>. Это и не удивительно. Ведь большин-

---

<sup>1</sup> Эта крайняя точка зрения заведомо не верна. Сами основные законы микрофизики невозможно сформулировать, не пользуясь понятием времени. Свойства времени оказываются иными, чем думали раньше, но само понятие времени остается фундаментальным.—  
*Прим. ред.*

ство наших обычных понятий применительно к микромиру оказывается уже непригодным. Мы были вынуждены глубоко изменить понятия объекта, дегерминизма и т. д., и ничего удивительного не произойдет, если аналогично будет разрушено и традиционное понятие времени. Впрочем, наш анализ не сводится к одному лишь отрицанию. До некоторой степени он также разъясняет природу физического времени, а это может помочь синтезу, объединяющему микрофизику и область обычных явлений.

Понятие момента времени имеет практическое значение, поскольку соотношения неопределенности имеют значение лишь для атомных масштабов, когда нельзя пренебрегать квантом действия, но в макрофизике соотношениями неопределенности можно пренебречь. Само время приобретает смысл в силу закона больших чисел, который приводит к замене случайности и вероятностных характеристик кажущейся регулярностью и определенностью. Поэтому необходимо, чтобы в основе истинного определения времени как в механике, так и в современной физике лежала теория вероятностей. Время — понятие статистическое в такой же степени, как, например, давление газа, и именно статистическая природа времени приводит к результатам, которые кажутся наиболее загадочными, а именно к необратимости. Одна и та же причина приводит к постоянному возрастанию энтропии изолированной системы и к необратимости времени; возрастание энтропии и необратимость времени отражают эволюцию, которая протекает вполне определенным образом, если речь идет об огромном числе элементарных явлений, — когда от микрофизики мы переходим к классической физике.

Время, о котором мы говорили до сих пор, разумеется, время физическое, то есть время, которое имеет смысл в мире неживой материи. Биолог и психолог могут по-другому изучать время, так что аргументы высказанные выше идеи не связаны с биологическим или психологическим временем. Однако, я думаю, невозможно глубоко рассмотреть общее понятие времени, не учитывая результатов, которые получены физикой.

---



ИЗДАТЕЛЬСТВО МИР

35 коп.