

53

4-49

БИБЛИОТЕЧКА · КВАНТ ·  
выпуск 59

А.Д. ЧЕРНИН

# ФИЗИКА ВРЕМЕНИ





БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •  
выпуск 59

---

А.Д. ЧЕРНИН

# ФИЗИКА ВРЕМЕНИ



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1987

ББК 22.61  
Ч-49  
УДК 529(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Ю. А. Осипьян (председатель), академик А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), кандидат физ.-мат. наук А. И. Буздин (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов, академик А. С. Боровик-Романов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик В. Л. Гинзбург, академик Ю. В. Гуляев, академик А. П. Еришов, профессор С. П. Капица, академик А. Б. Мигдал, академик С. П. Новиков, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев

Рецензент: доктор физико-математических наук Д. А. Киржниц

Ч-49 Чернин А. Д.  
Физика времени. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 224 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 59.)  
40 к. 150 000 экз.

Понятие времени — одно из самых фундаментальных в нашей системе знаний. В простой и наглядной форме, без использования математических формул книга рассказывает о развитии научных представлений о времени, об основных идеях современной физической концепции времени. Дается изложение важнейших вопросов физики, связанных с природой времени: однородность времени и закон сохранения энергии, относительность одновременности, световой конус и причинность, время вблизи черной дыры, прошлое и будущее Вселенной, время в микромире, стрела времени.  
Для школьников, студентов, преподавателей, лекторов.

Ч 1704010000-054  
053(02)-87 166-87

ББК 22.61

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

Тайна времени всегда занимала умы людей, издавна волновала их воображение и чувства.

О природе времени, о причине его неудержимого бега размышляли и спорили на протяжении веков. Ускользающую сущность времени пытались уловить еще античные мыслители. В эпоху Возрождения, давшую начало современным наукам о мире и человеке, время понимали уже как реальную, неотъемлемую черту Вселенной и видели в нем вполне определенные свойства, познать и изучить которые можно путем научного исследования. Расцвет физической науки с начала нашего века сделал время предметом прямого экспериментального и наблюдательного изучения; тогда же возникла замечательная теория, раскрывшая глубокие связи между ходом времени, геометрическими свойствами пространства и протекающими в природе физическими явлениями. В наши дни физика времени обогащается новейшими данными космологии и физики элементарных частиц — двух фундаментальных областей современной физической науки, где рождается принципиально новое знание о мире. Проникновение в природу времени продолжается.

В физике нет особого, самостоятельного раздела, специально изучающего время. Не существует отдельной науки о времени — такой, как, например, наука о пространстве — геометрия. Имеется, правда, наука об измерении времени — хронология (*хронос* по-гречески значит время). Но можно сказать, что вся физика в своих принципиальных основах строится на представлениях о времени. Например, старейшая из физических наук — классическая механика — изучает законы движения тел «обычных» размеров и масс. Чтобы открыть эти законы и затем применять их для расчетов машин и механизмов, строительных конструкций, транспортных средств, а в наши дни — и космических аппаратов, потребовалось сначала выработать определенное понимание времени, ясно и точно сформулировать важнейшие его свойства. Это было сделано Ньютоном 300 лет

назад. Когда в первой четверти нашего века возникали теория относительности и квантовая теория, границы физической картины мира далеко раздвинулись и она включила в себя самый большой объект науки — Вселенную как целое и самые малые тела природы — элементарные частицы. Физика наших дней со всеми ее бесчисленными и разнообразными применениями исходит из принципиально новой концепции времени. Вместе с тем фундаментальные идеи современной физики служат основой для дальнейшего развития и углубления наших представлений о времени.

Возникновение и развитие научных представлений о времени, современная физическая концепция времени, трудные и все еще далеко не разрешенные загадки, которые ставит перед нами время и его необратимый бег, — вот о чем рассказывается в этой книге.

Я рад поблагодарить Я. И. Азимова, В. Л. Гинзбурга, Д. А. Киржница и Я. А. Смородинского, прочитавших рукопись книги или отдельные ее части и сделавших ряд ценных критических замечаний. Я глубоко благодарен Л. Э. Гуревичу за многочисленные обсуждения затронутых в книге проблем. Воспроизводимые в книге фотографии часов любезно предоставлены Л. Г. Ченокал и Р. Мартинкусом; им моя искренняя признательность. Рисунки для книги сделал Ф. А. Чернин; его мне особенно приятно поблагодарить.

## ГЛАВА I

### ВРЕМЯ И МЫ

Переживая непосредственные впечатления об окружающем нас мире, а затем целенаправленно изучая и осваивая его, человечество постепенно выработало ряд основных понятий, на которых строятся все наши представления, вся система наших знаний. Одно из важнейших — понятие времени.

Основные понятия о мире — это плод человеческого разума, воображения, наблюдательности, памяти, воли. Ум обладает высокой способностью создавать понятия. Но он не извлекает их готовыми из самого себя. Он не может вылепить их из ничего. Ум создает понятия из материала конкретных знаний, полученных в наблюдении мира, в практической деятельности, в повседневном опыте.

#### Чувство времени

Человек живет во времени и способен тонко чувствовать его. Мы следим за временем, ориентируемся во времени, пользуясь часами, но можем обходиться и без них. Многие более или менее хорошо угадывают время, а некоторые на вопрос «Который час?» отвечают, не глядя на часы, с поразительной точностью.

Конечно, нетрудно угадать, что прошло 45 минут с начала урока или лекции, когда слышишь звонок. Звонок — тоже часы, только они указывают время не в любой момент. Можно узнавать время днем по Солнцу, а ночью по Луне, по их положению на небе. Луна и Солнце — это астрономические часы, подаренные нам природой.

Но как мы узнаем время без всяких часов и без каких-либо ориентиров? Можно ли, например, следить за временем, находясь в закрытом помещении, совершенно изолированном от внешнего мира? Известно, что космонавты, готовясь к космическим полетам, проходят испытания и тренировки в изолированных помещениях, называемых сурдокамерами. Туда не про-

никают извне ни свет, ни звуки. Человек остается один на один со временем. И, оказывается, даже в таких условиях можно хорошо ориентироваться во времени без часов, проделывать по расписанию определенные программой задания, соблюдать режим работы и отдыха, бодрствования и сна.

Давно известно, что человек обладает пятью чувствами — зрением, слухом, осязанием, обонянием и вкусом. Они описаны еще Аристотелем, знаменитым ученым древности, жившим в Греции в IV веке до нашей эры. Но нет ли у нас еще и шестого чувства — чувства времени? Ведь мы действительно чувствуем время, постоянно ощущаем его течение.

В специальных экспериментах люди, проводившие дни и недели в изолированной камере или глубокой пещере, определяли время с довольно высокой, иногда чуть ли не до процента, точностью. Это означает, что, например, продолжительность часа угадывали с ошибкой всего в минуту-другую, а продолжительность суток — с ошибкой, не превышающей получаса. В подобных экспериментах человек никакого сознательного отсчета времени не вел — не считал вслух, не делал отметок или зарубок, как Робинзон Крузо на своем острове. Уверенное чувство времени вполне обходилось без этого, не оставляло человека и не подводило его.

А вот другой эксперимент. Испытуемому давалось перед сном задание проснуться, скажем, ровно в 7 часов — без будильника. И тренированные люди, а среди них были космонавты, полярники, альпинисты, с очень хорошей точностью просыпались в заданный час, хотя обычно они привыкли вставать в другое время.

В чем же дело? Не означает ли все это, что у каждого из нас имеются какие-то внутренние недремлющие часы, которые исправно идут и когда мы бодрствуем, и когда спим?

### **Счетчик времени?**

Если для выполнения какого-то задания космонавту в сурдокамере нужно отсчитывать секунды, он может воспользоваться пульсом. Частота пульса — приблизительно один удар в секунду — выдерживается с неплохим постоянством, а у людей тренированных пульс особенно ровен. Это часы, которые всегда с нами. Пульс связан с ритмическими сокращениями сердца, и можно сказать, что часовой механизм здесь — сердечная мышца, а пульс — сигнал этого механизма, подобный тиканью механических часов.

Пульс хорош для отсчета секунд или минут. Но если нужно отсчитывать часы, сутки, недели или даже месяцы, космонавт

не станет непрерывно держать руку на пульсе. И тем не менее, как мы говорили, человек хорошо чувствует и оценивает как малые, так и сравнительно большие промежутки времени. В этом случае пульс или, скажем, дыхание на роль часов не годятся, да и вообще непрерывный сознательный счет времени невозможен. Тут действуют какие-то другие часы.

Многие исследователи — психологи, физиологи, биофизики, кибернетики — считают, что человек, определенно, обладает внутренними часами, и притом не одними, а многими. По сути дела, на роль часов годится любой орган нашего тела, который, подобно сердцу или системе дыхания, работает ритмически. Нужно, конечно, чтобы его ритм всегда поддерживался более или менее постоянным.

А самых разнообразных ритмов в человеческом организме немало. Известно, что в течение суток периодически меняется температура тела, давление и химический состав крови. Суточные колебания испытывают несколько десятков различных физиологических процессов и время суток указывает не только «желудок — верный наш брегет». Суточный ритм организма согласуется с вращением Земли вокруг своей оси. Имеются и более медленные ритмы, связанные со сменой времен года, то есть с различными положениями Земли в ее годовом обращении по своей орбите вокруг Солнца.

Если органом зрения служит глаз, а органом слуха — ухо, то чувство времени, по мнению специалистов, не связано ни с каким отдельным органом тела. Возможно, непрерывный отсчет времени ведется всеми (или почти всеми) органами, действующими ритмически, а в единый очень сложный часовой механизм их объединяет мозг, точнее, кора головного мозга, где сосредоточены все важнейшие «центры управления» человеческого организмом. В пользу такой точки зрения говорит тот замечательный факт, что ритмические явления непрерывно протекают и в самой коре головного мозга.

### Альфа-ритм

О ритмах головного мозга узнали более 50-ти лет назад. Это открытие было сделано при изучении электрических полей, которые сопровождают работу мозга и возникают в результате сложных физико-химических процессов в нервной ткани. Сами по себе эти поля были обнаружены еще в 70-е годы прошлого века. Оказалось, что если к голове прикрепить пару электродов, то прибор укажет, что между ними возникает электрическое напряжение. Напряжение довольно слабое, всего несколько микровольт, но оно вполне измеримо.



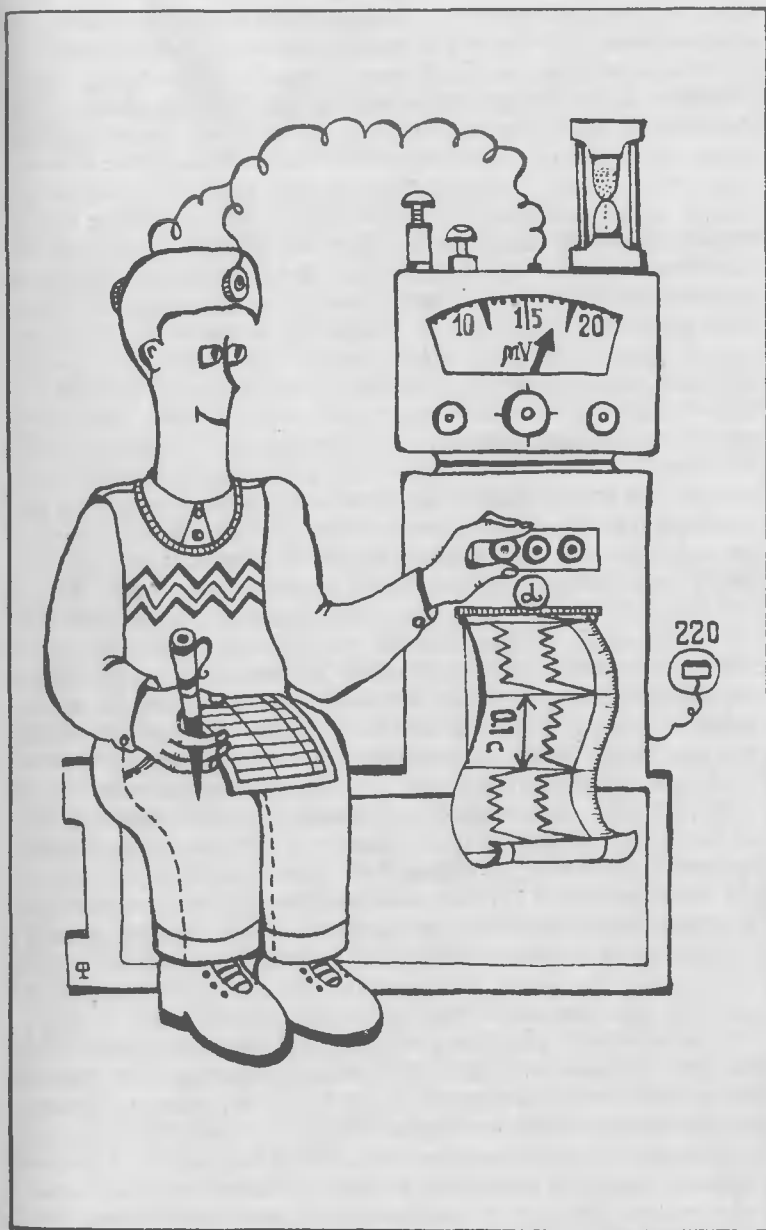
Усовершенствование измерительных приборов позволило в дальнейшем делать записи мозгового электрического напряжения — электроэнцефалограммы. Они представляют собой графики, указывающие значение напряжения в последовательные моменты времени. Это временной ход напряжения. И вот расшифровка таких графиков, полученных при непрерывной записи в течение нескольких минут, показала, что электрическая активность мозга обладает четкой ритмичностью.

Электрическое напряжение между электродами не остается постоянным, оно испытывает непрерывное мелкое дрожание. Довольно отчетливо в этом дрожании выделяются ритмические колебания, в которых последовательные подскоки и спады напряжения происходят регулярно каждую десятую долю секунды. Этот ритм иногда чуть быстрее, иногда чуть медленнее, но он всегда присутствует. Его частота — около десяти колебаний в секунду; это примерно в десять раз выше частоты пульса. Явление таких периодических колебаний, обнаруживаемых по электроэнцефалограмме, получило название альфа-ритма головного мозга.

Знаменитый математик Норберт Винер (1894—1964), основоположник кибернетики, считал, что ритмической активности мозга принадлежит ключевая роль в нашей способности чувствовать время. По его мнению, альфа-ритм представляет собой «самое настоящее тикание наших внутренних часов».

Мы не слышим хода этих часов, не ощущаем его. Мы не можем взглянуть на эти часы. Но что же происходит в нашем мозгу, когда нас спрашивают: «Который час?» Мы не делаем никаких подсчетов в уме или оценок — сколько, скажем, колебаний альфа-ритма произошло с известного нам момента времени. Это невозможно, да и не требуется. Мы как бы сосредоточиваемся на миг, и вот уже ответ готов: «Около двух часов» или «Приблизительно без четверти два», или что-нибудь в этом роде. И как мы уже говорили, многие способны дать очень точный ответ, с ошибкой, например, не более чем пять минут или даже меньше, хотя перед этим давно не смотрели на часы.

Какая-то четко действующая цепочка операций, лишь частично контролируемая сознанием (а скорее, просто «запускаемая» им) ведет от альфа-ритма к ответу на вопрос о времени. Это работает связь между физиологическими ритмами организма, и в первую очередь ритмами мозга, и нашими сознательными представлениями о времени. Но как в действительности это происходит? Как мы узнаем показания наших внутренних часов? Как в нашем мозгу происходит осознание времени? Об этом пока еще слишком мало известно.



Альфа-ритм

И еще вопросы. Почему кажется, что время иногда летит стрелой, а иногда тянется поразительно медленно? Не идет ли время по-разному для того, кто смотрит фильм, и для того, кто ждет, когда освободится телефон-автомат? Не быстрее ли бежит оно на каникулах? Правда, это уже не такие сложные вопросы, и на них можно придумать правдоподобные ответы. Эти ответы свяжут наше ощущение времени с чувствами, которые мы переживаем. Но замечательно, что от наших чувств не зависит темп альфа-ритма, наших главных внутренних часов. Это показали прямые опыты. Небольшие ускорения или замедления альфа-ритма возможны, но они совершенно несущественны по сравнению с кажущимися различиями одинаковых промежутков времени (скажем, двух уроков в школе и сеанса в кино).

### Живые часы

Электрическая активность мозга создается согласованным действием большой группы нервных клеток в коре головного мозга. Каждая клетка способна генерировать очень слабые электрические поля, потенциалы и токи. Кроме того, клетка может испытывать колебания — она непрерывно то расширяется, то сокращается, что вызывает колебания и ее собственного электрического поля. Очень важно, что колебания всех клеток, составляющих многочисленный коллектив, происходят не беспорядочно, а как по команде: все разом расширяются, затем вместе сокращаются и так снова и снова. Электрические поля клеток при этом складываются, и общее поле всей группы тоже оказывается ритмически колеблющимся. Из-за этого колеблется, мелко дрожит, как мы говорили, электрическое напряжение, записываемое на энцефалограмму.

Электрические (а точнее, биоэлектромагнитные) явления такого рода наблюдаются у всех живых клеток — это не привилегия одних только клеток нервной ткани, из которой состоит кора головного мозга. Электромагнитные эффекты живых тканей или органов давно уже изучаются наукой.

Ритмические колебания, проявляющиеся в электромагнитных эффектах, — общая черта всех живых клеток. Можно сказать, что каждая клетка, обладающая внутренним ритмом, представляет собой живые часы. И неудивительно поэтому, что различного рода ритмическое поведение наблюдается на всех уровнях живого — от отдельной клетки, самого простого одноклеточного организма или растения до высших животных.

Вся живая природа располагает естественными часами, своими внутренними ритмами, живет во времени и постоянно

чувствует его бег. Биологам известны удивительные примеры тонкого чувства времени у пчел, птиц, многих животных. Но лишь человек способен не только жить во времени и переживать время, но и осознавать его, целеустремленно исследовать и изучать.

### От ощущения к понятию

Уже в возрасте нескольких месяцев ребенок стремится активно ориентироваться во времени и пространстве. Это необходимо ему для освоения и изучения окружающего его мира. Но сознательное понятие о времени возникает далеко не сразу.

Раньше и легче дается человеку ощущение пространства. Что такое *здесь* и *там*, становится понятным довольно скоро. *Здесь* — это то, что доступно, что можно разглядеть, потрогать, попробовать на вкус. *Там* непосредственно не доступно, но если приложить усилие, постараться дотянуться или переместиться, то можно превратить *там* в *здесь*.

К году или полутора годам ребенок начинает понимать, что такое *сейчас* — оно похоже на *здесь*. Чуть позднее выясняется и что такое *скоро* — оно похоже на *там*, недалеко. В 3 года становится ясным, что бывает *сегодня*, *завтра* и *вчера*. Только к 7—8 годам складывается наше обычное интуитивное представление о времени как о равномерно и повсеместно текущем потоке мгновений, каждое из которых сначала еще только *будет*, затем оно уже *есть*, а потом превращается в *было*.

В своем развитии ребенок, вероятно, повторяет — в очень ускоренном темпе — тот долгий и давний путь, которым человечество, развиваясь от первобытного состояния, пришло к нашему современному понятию времени. Это тоже был путь ощущения, восприятия, исследования и освоения мира. На самых первых порах источником ощущения и переживания времени было, наверное, стремление превратить желаемое в доступное.

Как говорил еще сто лет назад французский психолог М. Гюйо «время закрыло бы доступ к себе существу, которое ничего не желало бы, ни к чему не стремилось... Будущее — это не то, что идет к нам, а то, к чему мы идем». Цель — действие — достижение. По этому образцу в сознании людей возникла цепочка *будущее — скоро — сейчас*, которая превратилась потом в представление о последовательности мгновений, сменяющих друг друга в общем потоке времени.

Самые древние черты человеческого сознания оставили след в сказках, легендах, былинах, мифах, ритуалах. Их изучение

привело специалистов к выводу, что вслед за представлением о последовательности близких по времени событий у первобытного человека возникало осознание ритмичности, повторяемости происходящего с ним и вокруг него. Эта повторяемость затрагивала и короткие, и более длительные промежутки времени. Постоянная смена дня ночью, смена одной погоды другой со временем года, неизменная повторяемость годовых изменений в природе — эти ритмы и циклы в окружающем человека мире были исключительно важны для его жизни, для его выживания. Уверенность в том, что, например, за холодами снова последует тепло, служила опорой человеку в его суровой, полной опасностей жизни.

Сознание размеренного и неизменного ритма природы рождало в человеке надежду, даже убежденность, что и в его деятельности должна быть повторяемость, регулярность. Очень важна была для человека уверенность в том, что одни и те же действия приведут к тем же результатам. Возможность повторять действия и всякий раз достигать желаемого рождалась из ощущения мировых ритмов и в свою очередь поддерживала и углубляла это ощущение.

Неизменный повтор, ритмичность в природе еще не дают отчетливого ощущения самого времени, но подсказывают чувство промежутков времени, более или менее одинаковых при одинаковых изменениях. Далее возникает и осознание того, что совершение одинаковых повторяющихся действий требует одинаковых промежутков времени. Вслед за этим необходимо, вероятно, соединить впечатление ритмичности с ощущением последовательности. Так, должно быть, возникает понятие о промежутках времени, стоящих друг за другом и составляющих какой-то ряд.

Теперь остается сделать последний шаг — понять, что этот ряд, эта цепь промежутков, не стоит на месте, а постоянно и неудержимо движется, увлекая за собой и нас, и все вокруг.

## Пространство

Среди важнейших понятий, на которых строится вся система человеческих знаний, рядом с понятием времени, а может быть, и прежде него, стоит понятие пространства. Понятие пространства дается ребенку легче, чем понятие времени; мы уже упоминали об этом. Вероятно, и человечество освоилось с ним легче и раньше, а затем люди постоянно использовали — и до сих пор используют — образ и понятие пространства в своих попытках выработать ясное понятие времени, проникнуть в его физическую природу.

Пространство обладает для нас многими явными преимуществами перед временем. Во-первых, его можно видеть. Пространство предстает перед нашим взором как бы целиком, мы видим его сразу и везде. Что же касается времени, то мы его не видим и не слышим; мы ощущаем его, но нам оно дается не целиком: непосредственно мы переживаем только его краткий миг, одно лишь мгновение *сейчас* из всей череды мгновений.

Во-вторых, в пространстве мы можем свободно перемещаться, двигаться в трех направлениях (или лучше сказать, в трех измерениях): влево — вправо, вверх — вниз, вперед — назад. Но у нас нет свободной подвижности во времени. Мы не можем по нашему произволу вернуться в прошлое, остаться навсегда в настоящем, совершить поездку в будущее и возвратиться обратно.

Обозримость пространства, возможность перемещаться в нем дали, вероятно, первый толчок исследовательской мысли человека. Способность человеческого разума создавать понятия впервые ясно проявила себя, по-видимому, в выработке понятия пространства. Различные грани, стороны, свойства пространства постепенно открывались человеку в зрительных образах и впечатлениях движения, а затем складывались в единое целое. Знание о пространстве фактически первым прошло путь от непосредственного опыта к понятиям, от понятий к строгой науке.

Более трех тысячелетий назад на берегах Нила, Тигра и Ефрата, люди уже располагали глубокими и точными сведениями о том, что такое линия, плоскость, объем. Они могли измерять длины и площади, рассуждали о взаимных отношениях линейных, плоских и объемных, трехмерных фигур. Знание развивалось благодаря практической деятельности строителей, землемеров, путешественников, оно питалось ею и питало ее. Человеческая любознательность, воображение и память строили из отдельных конкретных данных общую науку, способную давать правильные ответы на любые вопросы в самом широком разнообразии условий.

В античном мире эта наука окончательно оформилась в III веке до нашей эры во времена Евклида, и главным образом благодаря именно ему. Евклидова геометрия — наука о пространственных отношениях тел в физическом мире — и по сей день остается основой основ точного знания. Она служит образцом ясности, стройности и цельности для всех наук о природе.

## Пространство и время

Знакомство с временем шло у человечества вслед за осознанием и изучением пространства. Понятие времени пробуждалось и формировалось, вероятно, по примеру понятия пространства. Не только в детском сознании, но и в первоначальном сознании человечества образы *сейчас* и *скоро* возникли сначала как двойники наглядных и очевидных образов *здесь* и *близко*.

Естественным было стремление и все другие временные отношения, узнаваемые из жизни, опыта, строить и представлять себе по примеру пространственных отношений. В пространстве все ясно, в нем как будто давно уже нет волнующих загадок, но время остается для нас полным тайн. Наука о пространстве — геометрия — существует очень давно и получила широкое развитие и распространение; наука же о времени не имеет даже собственного названия (хронометрия?). Уходящее глубокими корнями в прошлое стремление изучить время по образу пространства еще далеко не исчерпало себя. Усилия современных исследователей опираются на весь опыт изучения мира — донаучный и научный, и самая грандиозная из современных физических идей, идея относительности Эйнштейна, — это тоже попытка мыслить время по образу и подобию пространства.

Идея относительности объединяет пространство и время, она присоединяет время к пространству в качестве нового, четвертого измерения. Мы еще будем подробно об этом говорить. Сейчас же обратим внимание на то, что новое измерение — время — рассматривается как бы наравне с тремя пространственными измерениями, а вместе все это четырехмерное образование объявляется четырехмерным пространством. (Хотя и четырехмерным, но именно пространством, а отнюдь не, например, четырехмерным временем. Это, очевидно, уступка нашему чувству, которое пространства, так сказать, не боится и не видит в нем ничего недоступного уму.)

Свести время к пространству, пусть и не впрямую, а искусным образом сконструировав единое пространство-время с четырьмя измерениями, — это блестяще удалось. Все отношения в таком четырехмерном мире строятся по существу так же, как и пространственные отношения в обычном трехмерном мире.

Дело в том, что сама по себе геометрия не содержит никаких специальных ограничений на число измерений. Геометрия Евклида действует и в объеме (три измерения), и на плоскости (два измерения), и на прямой (одно измерение). Матема-

тически можно развить и ее четырехмерный вариант — в этом нет ничего особенного....

В теории Эйнштейна используется, правда, не евклидова геометрия, а более общая геометрия Римана. Но сейчас стоит подчеркнуть не это, а то замечательное обстоятельство, что самая тонкая идея современной физики использует именно пространственные, геометрические представления в попытке проникнуть в тайну времени. Такой подход был успешным на заре человеческого знания, он остается плодотворным и сейчас.

Но все-таки есть во времени нечто, что никак не сводится к пространственным соответствиям, не имеет аналогов в геометрии. Это прежде всего его неударжимый бег.

Время течет и притом всегда в одном направлении — от прошлого к будущему. Это всегда поражало и поражает человека в его размышлениях о времени.

Течение времени — это особое свойство времени, очевидное для всех, но все еще остающееся и до сих пор недостаточно понятным и исследованным. О различных попытках разрешить эту загадку времени мы еще расскажем в дальнейшем, в предпоследней главе книги.

А сейчас — немного о самом слове *время*.

### Имена времени

В древности верили: дать имя — значит создать. Именам человека, героя, бога, любого предмета или явления приписывалась особая важность, иногда даже магическая сила. Острое внимание к обозначению посредством специального слова, к именам вещей характерно и для самих первых шагов знания, и для всей последующей науки. Но прежде чем дать имя, нужно сначала увидеть, выделить, обособить нечто новое, чего раньше не было или что раньше не осознавалось. И обозначение нового, его имя несет на себе печать этого процесса узнавания и осознания.

Точно не известно, когда в языках человечества впервые проявилось специальное слово для обозначения времени. Первоначально это слово могло, вероятно, означать какие-то впечатления о переменах, о длительности, о повторяемости или цикличности. И только много позже оно стало обозначать именно время как таковое.

В «Толковом словаре живого великорусского языка» В. И. Даля читаем: *«Время — 1) длительность бытия; пространство в бытии; последовательность существования; продолжение случаев, событий».*



Это время вообще — главный и первый по перечислению у Даля смысл слова. К нему пример: «Время за нами, время перед нами, а при нас его нет». Это высказывание несколько философского характера, восходящее к рассуждениям античных мыслителей.

Но слово *время* имеет и еще три значения:

2) *пора, година, срок*, то есть какое-то конкретное время, его момент или отрезок. На это значение слова у Даля два примера, две поговорки: «Придет время, будет и пора. Знай время и место»;

3) *погода, состояние воздуха* (атмосферы, как мы сейчас ска-зали бы). И пример: «Каково время? Ясно, дождь, снег»;

4) *Счастье, земное благоденствие, благосостояние*. Об этом поговорка: «Будешь во времени, и нас помяни». Отсюда и сло-во *временщик*, то есть в первоначальном своем значении счастливец.

Слово *время* мы и сейчас употребляем в двух смыслах — как время вообще и как определенное время, то есть время данного события (*во время войны*), исторической эпохи (*смут-ное время*), или любого действия, явления, происшествия. Но значения *погода* и *счастье*, которые были еще живыми при Да-ле — его словарь вышел в 1863—66 годах, сейчас утрачены. В «Словаре русского языка» С. И. Ожегова (первое изда-ние — 1949 год; в 1984 году вышло шестнадцатое издание) этих значений уже нет; сто лет назад они были «пойманы» Далем, как видно, уже «на излете».

Замечательно, что не только в русском, но и в некоторых других языках одно и то же слово означало или означает и *вре-мя*, и *погода*. Оба эти значения имеют болгарское слово *време* и сербско-хорватское *време*. Как и русский, это языки из сла-вянской семьи языков.

В чешском, тоже языке славянской группы, *время* — это *čas* (читается *час*), а *погода* — *počasí*, слово того же корня. Да и русское *погода* имеет корнем *год*, то есть оно тоже связано с временем, с определенным его периодом. И притом оба слова построены в русском и чешском языках похожим спосо-бом, с той же приставкой *po*.

В польском языке, как и в современном русском, два значе-ния уже разошлись; *время* — это *czas*, а *погода* —  *pogoda*.

Оба смысла — *время* и *погода* — имеются и в словах роман-ской группы языков. Например, французское *temps* означает *время, пора, досуг, погода, ритм*. В испанском языке значения *время* и *погода* имеет слово *tiempo*, в итальянском — слово *tèmpo*. В румынском языке, имеющем и славянские, и романские корни, есть два слова — *timp* и *vrème*, первое романского, а вто-

рое славянского происхождения. Оба они означают одновременно и *время*, и *погода*.

Эти (далеко не полные) сведения об именах времени говорят нам о каких-то глубинных связях между понятием времени и представлениями о природных условиях, в которых живет человек. Природные условия меняются и притом довольно регулярно со сменой времен года. Регулярная повторяемость, цикличность изменений погоды служит очевидным и наглядным проявлением общего течения времени.

Мы уже упоминали о том, что представление о цикличности лежит у истоков нашего понимания времени. К этому можно добавить и некоторые сведения из этимологии, учения о происхождении слов (*этимон* по-гречески значит *истина*). Заглянем в «Этимологический словарь русского языка» А. Г. Преображенского. Он выходил отдельными выпусками с 1910 года; имеется стереотипное издание 1959 года. В этом словаре прослеживается история русских слов вплоть до индоевропейской основы, общей для индийских, славянских, романских, германских и некоторых других языков.

Непосредственным предком нашего слова *время* было древнерусское *веремя*, а более далеким — общеславянское *вермя* или *вертмя*. Индоевропейской основой послужило им слово *uertmen*, похожее на санскритское *vārtman* (санскрит — один из древнеиндийских языков). Последнее означает *путь, колея, след колеса*. А. Г. Преображенский указывает на близость слова *время* к словам *вертеть*, *воротить* и заключает, что его первоначальный смысл — *вращение, коловращение*. То есть опять намек на круговорот и повторяемость. «Называя вещи, мы подражаем их сущности», — говорил Сократ, один из мудрецов античности.

## ГЛАВА 2

### В ПОИСКАХ СУЩНОСТИ ВРЕМЕНИ

Осознать время, силой разума и воображения создать образ и понятие времени, дать, наконец, ему имя — это был один из важнейших шагов в первоначальной истории изучения и освоения человечеством природы и мира. С этого начался длительный путь размышлений и споров, догадок и гипотез о том, что такое время, в чем его физическая сущность.

Уже в VI веке до нашей эры, когда в Древней Греции возникают первые ростки физической науки, складываются убежденность в том, что окружающий нас мир во всей его сложности и изменчивости, сама природа вещей могут быть поняты

лены человеком. За разнообразием, видимой случайностью, несвязанностью и хаосом наших впечатлений стоит единый порядок, общие закономерности, которым подчиняются все явления природы. Цель человека — познать, изучить эти общие законы природы.

### Поток событий и законы природы

Античные мыслители не были всегда единомышленны в своей оценке времени, его значения и роли в мире. Одни видели во времени первооснову мира и всех реальных вещей в нем. Другие, напротив, считали, что самым важным, самым существенным в вещах является как раз то, что остается всегда одним и тем же, что не зависит от времени и никак не подвержено его течению.

Понимание времени, увлекающего мир в непрерывное движение, раньше и ярче всех выразил Гераклит (конец VI — начало V веков до нашей эры). Вот его знаменитые высказывания.

«В одну и ту же реку нельзя войти дважды, ибо воды в ней вечно новые».

«Солнце новое каждый день».

«Все течет, все изменяется».

«Мир является совокупностью событий, а не вещей».

Древний мыслитель проводит идею о том, что изменение и развитие составляют самую суть физического мира. Мир — это совокупность событий, под которыми понимается все, что начинается или возникает, затем длится и, наконец, завершается. Мир находится в состоянии непрекращающихся изменений, и все, что происходит в нем, происходит во времени и принципиально от времени неотделимо. События противопоставляются у Гераклита вещам как каким-то неизменным предметам, лишенным жизни, движения или развития.

Да, мир — поток событий, разнообразных происшествий с физическими телами. Но события эти происходят не хаотически, не случайно и бессвязно. Они следуют единым и общим законам, которым подчиняется весь мир предметов и явлений.

Фундаментальные законы природы неизменны, они справедливы во все времена. Один из самых важных — закон сохранения энергии (о котором, конечно, в античном мире еще не знали). В этом смысле две точки зрения, о которых мы выше упомянули, совсем не обязательно исключают друг друга. Скорее, они друг друга дополняют: все меняется — в соответствии с неизменными законами природы.

Но и это оказывается еще не все. Оказывается, сами эти законы не существуют вне времени, в отрыве от него. Между ни-

ми и временем имеется глубокая внутренняя связь; такую связь выявила современная физика, физика XX века. Это касается, в частности, и закона сохранения энергии. Оказывается, что сохранение энергии в физических процессах вытекает из определенных свойств времени, оно представляет собой их прямое следствие. Об этом мы расскажем в главе 12.

### Великий год

К античности восходит немало вопросов, которые и до сих пор ставят перед нами время и его бег. В Древней Греции спорили о начале и конце времени. Было ли начало у времени? Прекратится ли его бег когда-либо в будущем? Может ли вообще время остановиться?

В рассуждениях античных мыслителей преобладал взгляд на время как на бег по кругу. Вот одно характерное высказывание.

«Время не подобно прямой линии, безгранично продолжающейся в обоих направлениях. Оно ограничено и описывает окружность. Движение времени соединяет конец с началом и это происходит бесчисленное число раз. Благодаря этому время бесконечно».

Такой точки зрения держались столетиями; приведенное утверждение относится к V веку нашей эры и принадлежит Проклу, который суммирует в нем установившийся еще с времен ранней античности взгляд.

Этот геометрический образ строится на сравнении времени с движением по окружности, то есть с помощью пространственной аналогии. Он соединяет в себе два свойства окружности — ограниченность и вместе с тем бесконечность. Перенесение их на время означает, очевидно, что всякое изменение или развитие во времени длится не сколь угодно долго. Все происходит в пределах цикла, соответствующего полному обходу по окружности. По этой причине и само изменение должно быть цикличным: в конце циклов мы приходим к тому, с чего начали.

А потом все повторяется сначала, и так снова и снова — до бесконечности.

В этом мире бесконечных повторений исключается какое-либо разнообразие. Все, что происходит сейчас, уже происходило когда-то, и притом бесконечное число раз, — в прошлых циклах. И в будущем ничего, кроме уже происходившего, не ожидается.

Утешительно, как видно, лишь то, что сам этот цикл может быть очень длинным. Давалась даже оценка этого «великого»

года», как его называли, — 36 тысяч лет. Это таинственное число упоминается в сочинениях Платона, великого мыслителя античности, жившего в V—IV веках до нашей эры \*).

## Время и небо

Представление о цикличности времени имеет глубокие корни в человеческом опыте и сознании. Время всегда ощущалось прежде всего через регулярную смену непрерывно повторяющихся земных и небесных явлений. Ежедневный восход Солнца, ежегодный приход весны — вот главные ориентиры в нашем ощущении времени.

Наблюдения ночного неба позволили древним астрономам открыть периодические движения светил. Они говорили об этом как о вращении небесных сфер, круговом движении небес. Неизменное, невозмутимое циклическое «движение небес» наводило на мысль о непрерывном круговом ходе времени.

Вот что говорил Платон: «...мы не смогли бы сказать ни единого слова о природе Вселенной, если бы никогда не видели ни звезд, ни Солнца, ни неба. Поскольку же день и ночь, круговороты месяцев и лет, равноденствия и солнцестояния зримы, глаза открыли нам число, дали понятие о времени и побудили исследовать природу Вселенной».

Течение времени, его причина и происхождение связывались со Вселенной. У Платона время и Вселенная нераздельны. Он учил, что само вращение небес и вызывает ход времени: Вселенная своим круговращением как бы производит для нас время. И если бы небеса когда-либо разрушились, то время тоже исчезло бы.

Астрономические наблюдения дали представление о времени как одной из первооснов всего окружающего нас мира. Пусть на самом деле время и не производится вращением небес, но мы можем судить о времени по их движению, с их помощью мы можем измерять время.

Циклические астрономические явления — вращение Земли вокруг своей оси и происходящая из-за этого смена суток, вращение Земли по орбите вокруг Солнца и связанная с ним смена времен года — это грандиозные часы природы. По этому образцу, сверяясь с небом, люди во все времена строили свои часы, устройства для счета времени (см. главу 3).

---

\* Концепция великого, или мирового, года была широко распространена и на Древнем Востоке. Там фигурировали гораздо большие длительности — от 8 с лишним миллиардов до почти 200 тысяч миллиардов лет. Представления о времени на Древнем Востоке — особая тема, выходящая за рамки нашей книги.

## Время и движение

Еще в I веке до нашей эры в обширной и полной разнообразных сведений о мире поэме «О природе вещей» Лукреций писал:

«Также и времени нет самого по себе, но предметы  
Сами ведут к ощущенью того, что в веках совершалось,  
Что происходит теперь и что впоследствии позже.  
И неизбежно признать, что никем ощущаться не может  
Время само по себе, вне движения тел и покоя.»

Споры о связи времени с движением велись веками. Платон полагал, что время и движение, особенно движение небес — это просто одно и то же, что они тождественны друг другу.

Такую крайнюю точку зрения оспаривал Аристотель, самый знаменитый из учеников Платона, великий ученый античности. Он говорил, что время и движение, хотя бы даже и движение всей Вселенной, — это все же разные вещи. И правда: о времени мы судим по движениям и сами эти движения происходят во времени. Но движения могут быть быстрыми и медленными, движение можно прервать или возобновить и вызывать. Тела могут двигаться или находиться в покое. А время течет всегда, и ни прервать, ни снова пустить его ход нельзя.

Столетия спустя, в раннем средневековье, об этом говорилось так: если небеса прекратят движение, но гончарный круг будет продолжать крутиться, можно все же надеяться, что каждый его оборот будет отражать и отмерять ход времени.

По мысли Аристотеля, связь времени и движения такова, что время дает движению меру: «время есть число движения». Время считает, пересчитывает одно за другим последовательные состояния движения. Благодаря времени мы получаем количественную меру движения и можем, например, выяснить, какое из движений быстрее, а какое медленнее. Мы бы, наверное, сказали об этом так: время дает движению скорость, и по значению скорости, по этому числу, мы судим о движении, о его быстроте.

Сложные взаимные отношения времени и движения этим отнюдь не исчерпываются. О тонких гранях этих отношений говорил философ Зенон Элейский, живший в V веке до нашей эры. О нем рассказывает Аристотель в своей «Физике».

Зенон знаменит загадками. Загадки, которые он предлагал собеседникам, ставили их в тупик. Они до сих пор не утратили своей остроты и все еще вызывают споры. (Загадки Зенона носят название апорий; *апория* по гречески значит *безвыходность*). Но загадка — только форма рассуждения, способ изложения мысли. По существу же апории Зенона — остроумный анализ времени и движения, предпринятый с целью распознать их взаимные связи. Но прежде всего это — попытка разобраться в собственных способностях судить о времени и движении. В каких образах представляем мы себе эти понятия? Как «работаем» с этими образами в нашем сознании? Выясняется, что здесь не все благополучно.

Вот апория под названием «Стрела». Как мы представляем себе полет стрелы? Ее движение — это изменение положения в пространстве. Летящая стрела в разные мгновения находится в разных местах. В любое определенное мгновение она находится в определенном, единственном положении. Она находится в этом месте, как было бы, если бы она там покоилась. Ее нельзя отличить от другой стрелы, которая находится в том же самом месте и покоится. Это рассуждение можно повторить для каждого мгновения, так что в каждое мгновение наша стрела покоится.

— И это значит, — говорит Зенон, — что никакого движения нет.

— Как же так! — восклицает его собеседник. — Я точно знаю, что движение есть.

— Но я тебе доказал, что его нет, — отвечает Зенон. — Докажи мне, если сможешь, что оно есть.

Здесь и наш читатель спросит себя — в чем же дело? Рассуждение началось с довольно очевидного утверждения, дальнейшее следовало, кажется, вполне логично. Но окончательный вывод... Что-то тут не так.

Попробуем разобраться. Если стрела в каждое мгновение покоится, то как же она переходит из одного положения в другое? Наверное, все дело в «перескоке» из одного положения покоя в другое.

Но переход из одного положения в другое требует все же какого-то времени. И это время тоже состоит из мгновений, в каждое из которых стрела опять-таки занимает определенное место в пространстве, как если бы она там покоилась. Но какое же это движение, если стрела в каждое мгновение покоится... Попытка с «перескоками» не удалась.

Так в чем же решение загадки?

Легче всех решает ее сама стрела — она летит, летит и все тут. А наша задача — в том, чтобы составить себе разумную картину ее движения. И строя эту картину, не зайти в тупик, не натолкнуться на абсурдный вывод.

Описывать полет стрелы, снаряда, камня, мяча, имеющих в начале движения такую-то скорость, направленную под таким-то углом к горизонту, мы учимся в школе на уроках физики. Мы узнаём, что горизонтальная составляющая скорости при полете тела не меняется — в пренебрежении, конечно, сопротивлением воздуха. Направленная же вверх вертикальная составляющая скорости убывает из-за действия силы тяжести. В верхней точке пути она обращается в нуль. Затем вертикальная составляющая скорости растёт по величине — тоже из-за силы тяжести, но теперь она направлена не вверх, а вниз. Исходя из этих соображений, мы легко можем подсчитать и дальность полета стрелы, и максимальную высоту ее подъема, и скорость в каждой точке пути — все, что ни пожелаем. При таком способе действий нас не подстерегают никакие тупики и головоломки. А если у нас к тому же имеется не очень сложное измерительное оборудование, то мы можем провести прямой эксперимент с полетом стрелы. Можем определить, измерить в таком эксперименте все интересующие нас величины и тем самым проверить расчет, проделанный при решении задачи. Можно не сомневаться, что здесь все будет в порядке.

Собеседники Зенона не знали того, что знает сейчас школьник. Динамики, физической науки о движениях тел под действием приложенных к ним сил, тогда еще не существовало. Что могли они противопоставить загадкам Зенона? Прежде всего, сам очевидный факт движения. Вот стихотворение А. С. Пушкина «Движение» — о Зеноне и его собеседниках:

«Движенья нет, сказал мудрец брадатый.  
Другой смолчал и стал пред ним ходить.  
Сильнее бы не мог он возразить;  
Хвалили все ответ замысловатый.  
Но, господа, забавный случай сей  
Другой пример на память мне приводит:  
Ведь каждый день пред нами Солнце ходит,  
Однако ж прав упрямый Галилей.»

Галилей прав в отстаивании взглядов Коперника на устройство Солнечной системы. И очевидность — это и вправду еще далеко не все. Движение, бесспорно, существует, но что в действительности стоит за наблюдаемой нами картиной? Даже описав самым исчерпывающим образом полет стрелы с помощью динамики, мы еще не знаем, что ответить Зенону.



Зенон предлагает нам рассуждать о движении с помощью наглядных, простых и очевидных образов — мгновение, положение в каждое мгновение и т. д. Мы, не подозревая подвоха, следуем за ним... и оказываемся в тупике. Но, видимо, сами эти образы хороши не всегда; они могут указывать только какие-то отдельные свойства движения, но, как демонстрирует нам Зенон, иногда не «работают». Они могут оказаться недостаточными и даже обманчивыми, вводящими в заблуждение.

Разгадать загадку Зенона, пользуясь им самим предложенными образами, кажется, невозможно. Хоть этому занятию и предавались вслед за ним лучшие умы многих поколений. Но как представить себе движение, составленное из неподвижностей? Да и состоит ли оно из них на самом деле?

### Ахиллес и черепаха

Вот еще одна апория Зенона — «Ахиллес и черепаха». Приводим ее в изложении Симплиция, ученого VI века нашей эры.

«...речь идет об Ахиллесе, который, как гласит этот довод, не может догнать черепаху, которую он преследует. Ибо догоняющий должен, прежде чем он догонит преследуемого, достигнуть точки, из которой преследуемый начал свое движение. Но за время, необходимое преследователю для достижения этой точки, преследуемый, воспользовавшись этим, пройдет еще какое-то расстояние. Даже если это расстояние меньше расстояния, пройденного преследователем, поскольку преследуемый движется медленнее, все же он продвинется вперед, так как не стоит на месте...

Таким образом, в течение каждого периода времени, за который преследователь покрывает расстояние, уже пройденное преследуемым, ... преследуемый пройдет еще дальше вперед на какое-то расстояние; и хотя это расстояние постепенно уменьшается в силу того, что преследующий имеет более высокую скорость, оно представляет собой продвижение на какую-то положительную величину...» Между Ахиллесом, как бы быстро он ни бежал, и черепахой всегда останется промежуток — он не догонит ее.

Эта апория вызывала и до сих пор вызывает, пожалуй, еще больше споров, чем «Стрела». Приведем некоторые высказывания о ней, принадлежащие историкам, философам, математикам нашего времени (они собраны в книге Дж. Уитроу — см. список литературы в конце книги).

«... знаменитая апория, которая оказала громадное влияние на развитие науки».

«Эта весьма бесхитростная уловка вовсе не представляет трудностей для ума, должным образом подготовленного в логике и математике».

«Это очень старая и, на мой взгляд, глупая проблема».

«Это неиссякаемая по своей глубине проблема привлекает внимание многих блестящих умов».

«Зенон совершил математическую ошибку, обусловленную его незнанием бесконечных числовых рядов».

Об Ахиллесе и черепахе вспоминает Лев Толстой в «Войне и мире». Он рассуждает об историческом развитии, о законах «исторического движения» и говорит про «неизбежную ошибку, которую ум человеческий не может не делать, рассматривая вместо непрерывного движения отдельные единицы движения». Он полагает, что об этом «софизме древних» полезно и поучительно подумать и историкам. «Для человеческого ума, — пишет Толстой, — непонятна абсолютная непрерывность движения. Человеку становятся понятны законы какого бы то ни было движения только тогда, когда он рассматривает произвольно взятые единицы этого движения. Но вместе с тем из-за этого-то произвольного деления непрерывного движения на прерывные единицы происходит большая часть человеческих заблуждений». Толстой полагает, что «новая отрасль математики, достигнув искусства обращаться с бесконечно малыми величинами, и в других, более сложных вопросах движения дает теперь ответы на вопросы, казавшиеся неразрешимыми» (том третий, часть третья, глава первая). Он тоже, как видно, полагал, что все дело в суммировании бесконечных рядов, и вместе с тем говорил о неизбежной ошибке, «которую ум человеческий не может не делать...».

Задумаемся над тем, что предлагает нам Зенон. Если Ахиллес пробегает один за другим все отрезки пути, как предписывает ему Зенон, то бегун выполняет бесконечное число действий, — ведь мы видели, что этих отрезков бесконечное число. Можно ли выполнить бесконечное число действий за конечное время? Если да, черепаху можно догнать, если же нет...

Зенон заставляет рассуждать о бесконечностях. А наш ум не очень уверенно обходится с ними. При неосторожном обращении бесконечности вполне способны сбить с толку, привести к абсурдным выводам.

Да, кажется нам, как же это может быть — бесконечное число действий за конечное время. Это трудно себе представить... Скорее, это невозможно. Но ведь тогда мы должны сдаться и согласиться с Зеноном: он прав — черепаху не догнать.

А как мы решили бы эту задачу в школе? Очень просто. Скорость черепахи — это, скажем, 1 сантиметр в секунду. Ахил-

лес — хороший бегун, пусть его скорость в тысячу раз больше, что близко к мировому рекорду на стометровой дистанции. Наконец, пусть расстояние между ними в начальный момент составляет 50 метров. Сколько времени Ахиллесу понадобится, чтобы догнать черепаху?

Это время получается делением исходного расстояния на разность скоростей бегуна и черепахи. Ответ: Ахиллес догонит черепаху приблизительно через 5 секунд. Или через 5,005005 секунды — с точностью до шестого знака после запятой.

Никаких бесконечностей в школьной задаче не возникает. Нам не пришлось суммировать «бесконечные числовые ряды». Да разве мы сомневались, что Ахиллесу ничего не стоит догнать черепаху?

Зенон ставит вопросы, задевающие нас за живое. Он знает, как возбудить наш протест против абсурда и заставить думать о том, в чем ум теряется и склонен впадать в заблуждение.

### Мгновение и длительность

В апории «Ахиллес и черепаха» (да, по существу, и в «Стреле» тоже) речь идет о дроблении пути и времени на малые отрезки и кратчайшие мгновения. Но можно ли вообще делить пространство и время на сколь угодно мелкие доли? Возможно ли их неограниченное, бесконечное дробление?

Приведем еще одну апорию Зенона, которая называется «Дихотомия» (*дихотомия* по-гречески значит *деление на два*).

«Наше движение никогда не может начаться, так как, прежде чем пройти какое-то расстояние, мы должны пройти сначала его половину. А чтобы пройти половину, нужно прежде преодолеть четверть и так далее до бесконечности. Следовательно, для того чтобы пройти какое-то расстояние за конечное время, нам нужно осуществить за это время бесконечное число действий». Последнее отвергается как невозможное, но тогда невозможно и движение.

Это похоже на историю с Ахиллесом и черепахой. В обоих случаях возникает бесконечное число все более мелких отрезков пути и промежутков времени. Бесконечностей, очевидно, не возникло бы, если бы такому дроблению существовал предел.

Но что означала бы невозможность беспредельного дробления? Для времени это означало бы, что существуют его неделимые «крупницы», атомы времени.

Если так, то дробление времени, а с ним и пути, должно происходить не до бесконечности. Тогда речь в апориях должна идти о выполнении за конечное время конечного (хотя,

может быть, и большого) числа действий. Против этого, кажется, наш ум не восстает, мы не чувствуем себя сбитыми с толку, и апории, так сказать, разряжаются, с них «снимается высокое напряжение».

Но и независимо от апорий очень важно и интересно узнать, атомарно ли время или оно непрерывно делимо (мы вернемся к этому в главах 12, 13). Но в чем же урок Зенона?

Зенон не собирается, в самом деле, отрицать достоверность движения. Он ищет сущность очевидных явлений и стремится выразить ее в ясных и точных понятиях. И здесь он делает важнейшее открытие: он открывает противоречие. Противоречие, лежащее в самой природе движения.

Противоречия возникают у Зенона не из-за ошибок в рассуждениях. Это не ошибки разума, а отражение сложной, противоречивой самой по себе природы изучаемого явления. Движение противоречиво. Вот что писал об этом, комментируя Зенона в своих «Лекциях по истории философии», знаменитый немецкий философ Георг Гегель (1770—1831):

«... Двигаться означает быть в данном месте и в то же время не быть в нем, — следовательно, находиться в обоих местах одновременно; в этом состоит непрерывность времени и пространства, которая единственно только и делает возможным движение.»

Таков взгляд на природу движения, времени и пространства, таково разрешение апорий Зенона в понимании диалектики — философского учения, признающего существование противоречий в самой действительности, философской «науки о наиболее общих законах развития природы, общества и мышления» (по определению Советского энциклопедического словаря, 1982).

Аристотель называл Зенона первым диалектиком: он впервые указал на сложный, противоречивый, диалектический характер движения и его связей с временем и пространством.

### **Окружность + прямая = спираль**

Время — не прямая, а окружность. Это мнение, как мы говорили, разделяли многие древние мыслители. Но так ли уж непримирима окружность с прямой?

В «Трактате о спирали» Архимед (287—212 годы до нашей эры), последний из крупнейших ученых античного мира, изучает кривую, описываемую телом при его движении по прямой, которая сама вращается вокруг какой-либо оси. Тело участвует, таким образом, в двух движениях — прямолинейном

и вращательном. Цикличность совмещается здесь с поступательным движением.

Архимед не предлагает свою спираль в качестве нового образа времени. Но спираль соединяет в одно целое то, что раньше казалось несовместимым, что противопоставлялось друг другу. когда говорили о наглядном изображении времени \*).

Что же ближе к реальному времени — окружность, прямая или их соединение, спираль? Другими словами, действительно ли время состоит из гигантских повторяющихся циклов? Или оно течет так, что никаких возвратов к прежнему нет? Или возврат возможен, но уже на новом витке спирали, на новом, так сказать, уровне развития мира?

Все три возможности интересны, каждая из них, в принципе, не хуже двух других. Мыслители античного мира предпочитали цикличность по астрономическим мотивам. Но как можно было бы проверить эту идею?

В античной науке прежде всего требовалось, чтобы всякая идея была внутренне непротиворечива, то есть чтобы логические рассуждения, основанные на исходном допущении, не приводили к нелепостям, к абсурду. За этим придиричливо следили. Но этим, собственно, и ограничивались. Раз нет противоречий, идею выдвигали с непреерекаемой убежденностью, с полной, можно сказать, самоуверенностью.

Разум, сила мысли, логика признавались и источником, и высшим судьей идей, и теорией.

Кстати, слово *идея* введено Платоном. Оно означает *то, что доступно созерцанию*. Платон полагал, что все наши идеи — это воспоминания души о том, что она созерцала до ее соединения с телом. В действительности — и мы уже говорили об этом в первой главе книги — идеи и понятия рождаются в сознании людей на основании того, что мы сами видим и изучаем здесь, в окружающем нас мире реальных тел и явлений. Слово *теория* тоже пришло к нам из Древней Греции и означает оно *умозрение*.

Идеи и теории о мире — это не свободное творчество разума, хотя бы и подчиненное строгим правилам логики. Разум

---

\*) На сосудах IV — III тысячелетия до нашей эры археологи находят замечательный узор в виде обтекающей спирали с солнцами. Историк Б. А. Рыбаков пишет: «Главной идеей энеолитического (энеолит — медный век) спирально-солнечного орнамента с его ритмическим многократным повторением бега нескольких солнц, с его мастерским показом непрерывности этого бега я считаю идею Времени». Спиральный узор времени смогли разглядеть и на древнем календаре — жезле из бивня мамонта, найденном недавно в Сибири (см. книгу: Ларичев В. Е. Древо познания. — М.: Политиздат, 1985).



Птичка, сидящая на голове мудреца, видит дальше мудреца

и интуиция исходят из опыта, из впечатлений о мире, из наблюдений мира; они нащупывают, отыскивают в этом материале главное и общее, отбрасывая второстепенное и случайное. Так возникает предпосылка нового знания, его исходная идея. А затем следует разработка возможных следствий и выводов, и все это вместе составляет содержание теории.

Теория должна быть логически непротиворечива. Но одной логики еще недостаточно. Нужно, чтобы теория получала дальнейшее подтверждение на опыте. Выводы теории должны находиться в согласии со всеми известными конкретными фактами, опытными данными, сведениями, почерпнутыми из наблюдений.

Теория может предлагать на проверку не один, а несколько возможных, логически мыслимых вариантов. Выбор между ними и осуществляется сопоставлением с опытом, который отсеивает все варианты, кроме одного — верного.

Античные мыслители не очень заботились о дальнейшем соотношении выдвигаемых ими идей и теорий с реальными данными. Правда, очень непросто проверить, какой из вариантов — окружность, прямая или спираль — служит образом времени. Это настолько трудно, что правильный выбор не удастся, по существу, сделать и до сих пор. Обсуждения различных мыслимых вариантов такого рода, в принципе допускаемых общими законами физики, продолжаются и сейчас. И до окончательного решения очень далеко.

А спираль, придуманная Архимедом, служит еще и образом совсем иного рода. Это наглядный символ развития знания: на каждом новом витке, на все более высоком уровне поступательное движение науки возвращается — с усилением и углублением — к тому, что было найдено, понято и изучено ранее.

В античности впервые были высказаны столь важные, основополагающие суждения о мире, что мы даже не в состоянии точно оценить сейчас их значение. Сам подход к миру, простейшие, элементарные идеи и понятия о нем, кажущиеся нам самоочевидными, были в действительности известны не всегда. То, с чего мы начинаем как с уже готового, было создано для нас в прошлом усилиями разума, воображения и воли многих людей.

Мыслители античного мира сделали первый шаг к современному научному мышлению. Они первые в своем познании мира стали пользоваться логическими рассуждениями, выводами, доказательствами. Они подарили нам геометрию — ясную и точную науку о пространстве. Они передали нам здравые и проницательные суждения о времени, особенно о его связи

с движением, которые служат нам до сих пор. Они начали поиски сущности времени.

Но не могли ли в древности создать и точную науку о времени по образцу науки о пространстве? Почему бы было не взять в качестве исходных представлений простейшие, очевидные свойства времени и принять их в качестве аксиом? А дальше выводить и доказывать следствия, как геометрические теоремы...

Но это предстояло сделать много позже Галилею и Ньютону.

### ГЛАВА 3

## ИСТОРИЯ ЧАСОВ

В физике давно известно: чтобы что-то изучать, нужно прежде всего научиться это измерять. Точная наука начинается с точного измерения.

История измерения и счета времени, история часов, уходит своими истоками в далекое прошлое. Естественные часы природы — Солнце днем и Луна ночью; простейшие устройства, придуманные и изготовленные специально для отсчета времени, все более сложные, надежные и точные часы, которые стали появляться в Европе с XIII—XIV веков; и, наконец, совершенные приборы для измерения времени, создаваемые с середины нашего века и вобравшие в себя все достижения новейшей науки и техники, — вот основные вехи истории часов.

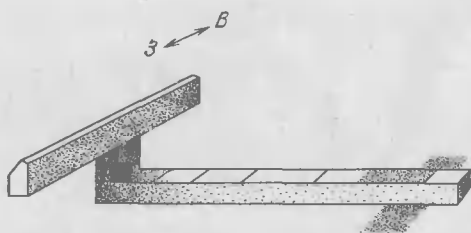
Переломным этапом в развитии знаний стала эпоха Возрождения, величайший переворот из всех, пережитых до того человечеством, как говорил о ней Ф. Энгельс. С этой эпохой начинается новая история, в ней берут начало науки нового времени и лежат корни дальнейшего научно-технического и промышленного развития. Историки склонны утверждать, что у истоков этого развития стоят часы — рядом с паровой машиной.

### Солнечное время

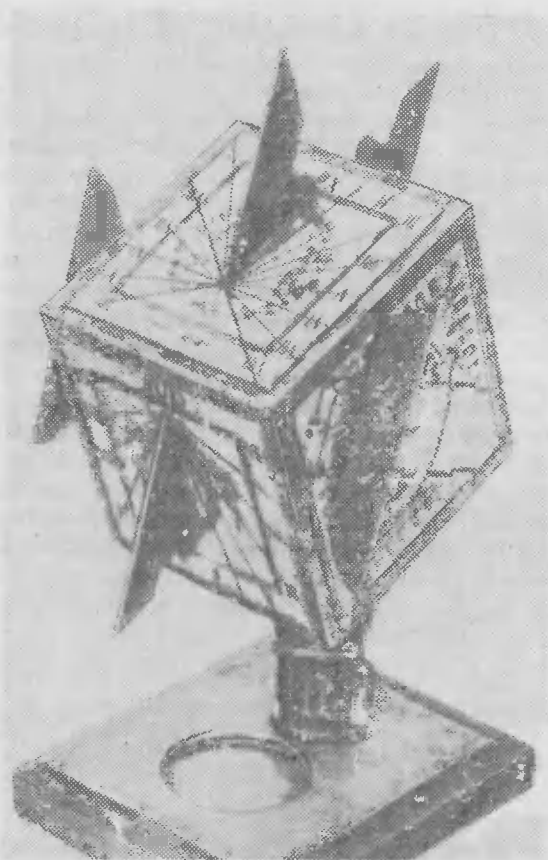
Для наших далеких предков тени, отбрасываемой предметами, было достаточно, чтобы судить о времени дня. Это и были первые часы — солнечные часы. Первое сделанное человеком устройство, которое специально предназначалось для того, чтобы узнавать время, представляло собой просто вертикально поставленный брус.

Солнечные часы, изображенные на рисунке, имеют несколько более сложное устройство. Это часы из Древнего Египта.





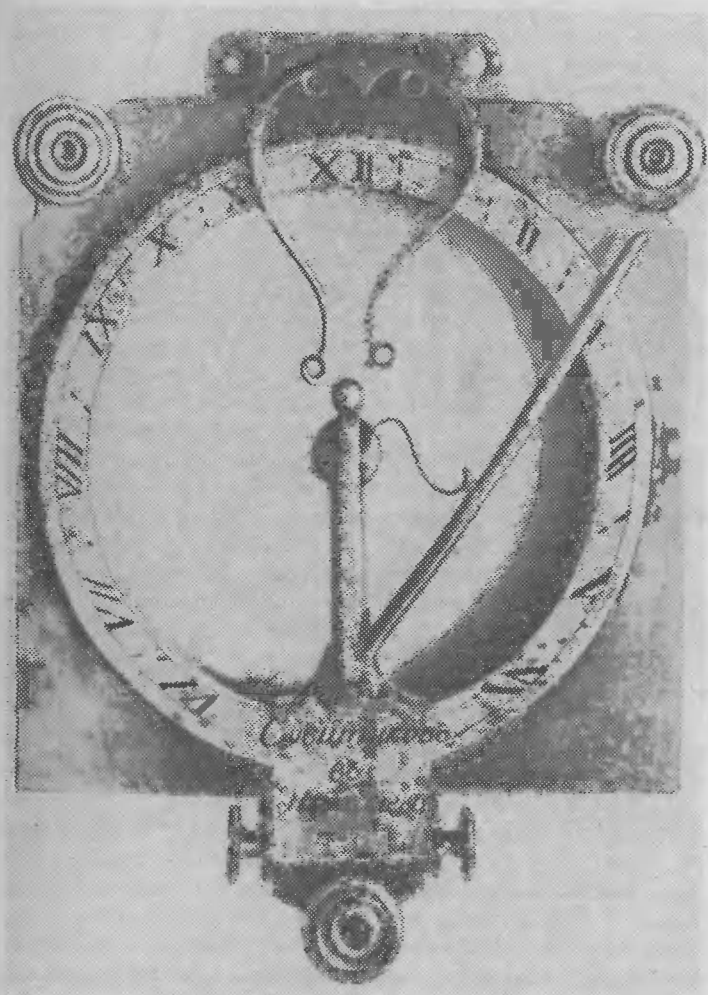
Солнечные часы из Древнего Египта



Солнечные часы «Куб» с пятью указателями

Их ставили утром поперечной переключиной на восток, а после полудня — на запад. Тень переключины падала на основание, где были нанесены черточки, отмечающие часы дня.

Солнечными часами — точнее, их указателями, стрелками — служили, собственно, и знаменитые обелиски Древнего Египта. Они отбрасывали длинные, четкие тени, по которым можно было указать время с точностью до нескольких минут или еще



Солнечные часы мастера Свешникова



Обелиск на площади

точнее. Нужно было только тщательно разметить, проградировать «циферблат» — площадь вокруг обелиска.

Один из египетских обелисков, вывезенный в качестве военного трофея, был установлен императором Августом на Марсовом поле в Риме и тоже использовался как указатель солнечных часов.

В 1430 году в Самарканде великий астроном Улугбек построил грандиозные солнечные часы с указателем высотой до 50 метров

Бывало, что делали и разные причудливые и забавные солнечные часы. Например, известны солнечные часы с линзой и пушкой: увеличительное стекло собирало солнечные лучи в точку и в определенный момент — например, в полдень — поджигало запал пушки. Пушка стреляла, возвещая время всем в округе.

Выстрел «полуденной пушки» можно и сейчас слышать в Ленинграде. Он раздается со стен Петропавловской крепости по сигналу точного времени, передаваемому из Института метрологии им. Д. И. Менделеева.

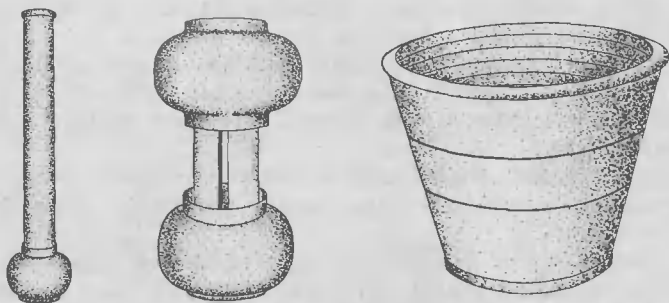
Солнечные часы сослужили службу ленинградцам во время блокады города в минувшей войне. Когда почти все городские часы вышли из строя, на углу Большого проспекта и 9-й линии Васильевского острова поставили деревянные солнечные часы. А самые новые солнечные часы появились в Ленинграде в 1971 году. Они украшают установленный у Синего моста водомерный обелиск, указывающий уровень воды в Неве и других реках города.

Пользуясь солнечными часами, нужно учитывать, что они показывают астрономическое, солнечное время. Принятое у нас «декретное» время опережает солнечное на час. А летом, когда действует «летнее время», нужно прибавлять еще один час.

### «Время истекло»

У солнечных часов имеется очевидное неудобство — они плохо служат в пасмурный день и совсем не годятся ночью. На этот случай у древних были еще и водяные часы. Их находят на раскопках в долине Нила, на территории древних государств Месопотамии и Иудеи, в Китае, Греции. Возраст некоторых находок исчисляется тремя тысячами лет.

У греков водяные часы назывались *клепсидрами*. *Клепсидра*, что буквально означает *похитительница воды*, — это сосуд обычно в виде усеченного конуса, из которого вода медленно вытекала сквозь узкую трубку. Уровень воды в этом сосуде или



Модели водяных часов из музея часов в г. Клайпеда

в другом сосуде, куда вода выливалась из клепсидры, указывал время и днем, и ночью.

В III веке до нашей эры врачи в Александрии научились считать пульс при помощи клепсидры. Тем самым удалось сделать доступными измерению промежутки времени, равные примерно 1 секунде.

Выражения «ваше время истекло», «напрасно лить воду» и т. п., пришедшие к нам из жизни Древнего Рима, постоянно употреблялись в те времена в суде или на общественных собраниях, где за соблюдением регламента следили по водяным часам.

Древние изобретатели сооружали хитроумные водяные часы с целыми каскадами сосудов, со звенящими колокольчиками, с движущимися под струйками воды фигурами. У Платона была клепсидра-звонок, которую он изобрел, чтобы созывать учеников на занятия своей Академии.

В наблюдениях за движениями светил астрономы долго пользовались клепсидрами. Они были в ходу у жрецов Древнего Египта, Вавилона, Персии. Они служили многие века, были они и у знаменитого датского астронома Тихо Браге (1546—1601). С их помощью Тихо измерял скорости планет и накопил очень подробные и точные сведения, из которых впоследствии Иоганн Кеплер (1571—1630), знаменитый немецкий астроном, вывел законы движения планет.

Но точность отсчета времени по водяным часам все же невелика. Они отставали или уходили вперед, так что погрешности редко удавалось сделать меньшими, чем 10 минут за сутки.

В глубокой древности изобрели и всем хорошо известные песочные часы. Они исправно служат нам — в поликлинике, например, — и до сих пор. Они надежны и неприхотливы. В прежние времена ими пользовались мореплаватели. Выражение «корабельные склянки» — это от морских песочных часов.

Довольно долго и во многих странах служили людям огненные часы. Например, в Японии еще лет двести назад были в ходу часы, в которых по очереди горели приставленные друг к другу палочки с различными благовониями. По их аромату можно было, так сказать, обонять время. Существовали и европейские огненные часы — это были просто свечи с нанесенными на них метками.

### Начало Нового времени

В средние века не слишком следили за счетом времени. В церквях и монастырях Европы пользовались самыми простыми солнечными или водяными часами, чтобы узнавать, когда служить ту или иную службу или читать молитву. А в повседневной жизни и вовсе достаточно было взглянуть на небо — где Солнце, и о большей точности не заботились.

Но вот наступает эпоха Возрождения и отношение к времени изменяется. На мышление, представления и знания людей той эпохи, на их отношение к миру воздействовал зарождающийся коренной перелом в производственных и общественных отношениях — начало перехода от феодализма к молодому капитализму, полному внезапно обнаружившихся живых и деятельных сил.

Людям Возрождения был свойствен практический, трезвый взгляд на вещи. Они искали прежде всего простые и верные способы изготовления вещей — тканей, инструментов, механизмов.

Но с той же основательностью, как и о производстве, торговле, политике, они говорили, писали, спорили об искусстве и литературе, о грандиозных, вечных предметах — о звездах, о Вселенной, о беге времени. С XIII века, после тысячелетия почти полного забвения, классическое наследие — труды античных философов, математиков, астрономов и космологов, античное искусство и литература — вновь оказывается в центре всеобщего внимания. Замечательным сводом древнегреческой учености служат произведения Аристотеля. Возрожденные и переосмысленные, достижения античности дают начало новому взлету научных знаний, искусств, всей культуры.

Что люди думали тогда о времени?

Они остро ощущали его неудержимый и необратимый бег, боролись с временем, желая обуздать или перехитрить его. Стремились как можно скорее все успеть, все увидеть, узнать, везде побывать, обо всем услышать, во всем разобраться, все понять, освоить, проверить, пустить в дело. Время воспринималось как поток деятельной жизни, как ритм труда, темп усо-

вершенствования производства. Тогда, как говорят историки, и вошло в обиход выражение «время — деньги».

Люди Возрождения нуждались в ясном и практичном представлении о времени. Они хотели иметь удобное в обращении, четко работающее на практике понимание времени.

Но прежде всего они нуждались в часах. Им нужно было уметь легко, надежно и со всей необходимой точностью считать и измерять время. Время, его темп и его счет приобретали первостепенное, хотя и почти чисто деловое значение.

### Часы на башне

В XIII веке изобретательные и любознательные мастера Италии строят первые механические часы. Принцип их действия прост. Делается горизонтальный вал с осью. На него наматывается веревка и к ее концу подвешивают гирию. Гирия

тянет веревку, та разматывается и вращает вал. Остается приделать к валу стрелку — она будет вращаться и показывать нам время.

Конечно, это только принцип, а на самом деле там были многочисленные колеса, передающие вращение вала к стрелке. Имелись разные хитроумные регуляторы, которые делали вращение вала по возможности более медленным и равномерным.

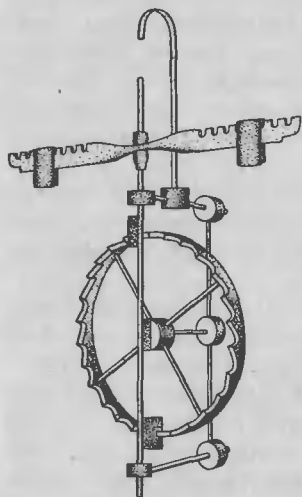
Механические часы были сооружениями внушительных размеров. Огромные часовые механизмы устанавливали на башнях соборов и дворцов. У Тихо Браге были часы с главным колесом почти метрового диаметра.

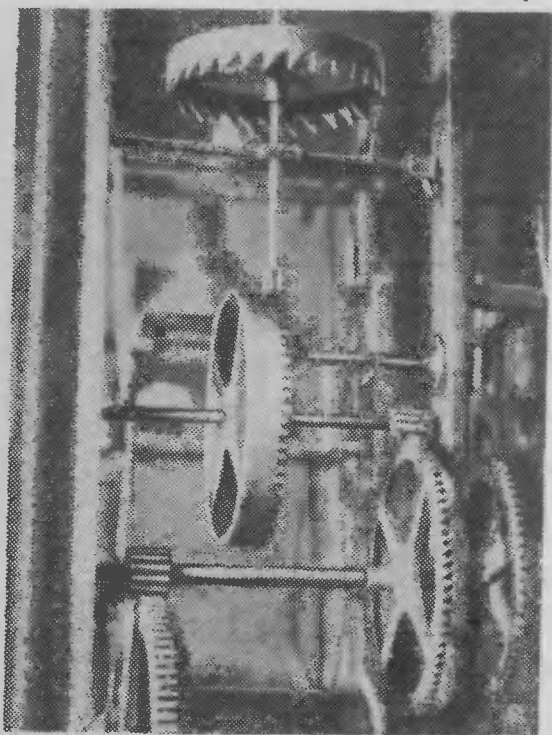
В 1404 году механические часы очень больших размеров появились на Спасской башне Кремля.

Модель механических часов открытой конструкции (XIV век) из музея часов в г. Клайпеда

Их построил мастер по имени Лазарь. Там имелось несколько заводных валов с гириями по семи пудов каждая (1 пуд = 16 кг), отдельные валы для стрелок, для боя, для музыки, которую вызванивали 35 различных колоколов.

Старинные механические часы шли с погрешностью до нескольких минут в сутки. Это не слишком большая точность. И, кроме того, за ними требовался постоянный уход — из-за боль-





Механизм часов XVIII века

шого веса валов, колес и других деталей они все время нуждались в наладке, смазке и т. д.

С XV века появились часы, в которых роль веревки с гирей стала играть пружина. Вес часов сразу сильно снизился. В начале XVI века научились делать переносные пружинные часы, которые весили всего 3 или 4 килограмма. Это был прообраз — еще, правда, тяжеловатый — наших нынешних ручных механических часов.

Сначала различные механические часы имели только одну стрелку — часовую. В середине XVI века к ней добавили вторую, минутную, а еще двести лет спустя и третью, секундную.

### Маятник Галилея

В 1584 году Галилео Галилей (1564—1642), которому было тогда двадцать лет, сделал замечательное открытие. Рассказывают, что, слушая мессу в соборе, он наблюдал,



как мерно раскачивались тяжелые люстры, подвешенные на длинных цепях.

Люстры раскачивались в одинаковом ритме. Они были различной формы и веса, но имели цепи одинаковой длины. Неужели период качаний зависит только от длины цепи и не зависит от формы и веса люстры?

Немедленно был поставлен эксперимент, и вот что установил Галилей.

Два маятника одинаковой длины, один со свинцовым, а другой с пробковым грузом — шариком, качаются в одинаковом ритме, с одинаковым периодом. Период качаний не зависит ни от груза, ни от размаха колебаний\*). Качания маятника исключительно равномерны и могут происходить очень длительное время.

Это был один из первых экспериментов в истории новой физики. Но это было и изобретение нового часового механизма. Галилей предложил измерять время путем счета колебаний маятника. Периоды качаний можно делать по выбору достаточно малыми — чем они меньше, тем точнее будет отсчет времени.

Такова физическая идея. Но часы системы Галилея, маятниковые часы, были изготовлены лишь три четверти века спустя, в 1656 году Христианом Гюйгенсом (1629—1695), нидерландским механиком, физиком и математиком.

Уже первые маятниковые часы были много точнее колесных. Постепенно, по мере новых усовершенствований в механизме, их точность возрастала все более. Лучшие маятниковые часы позволяют отсчитывать время с великолепной точностью — погрешность их хода не превышает сотых или даже тысячных долей секунды за сутки.

В Государственном астрономическом институте им. П. Н. Штернберга в Москве имеются маятниковые часы, сконструированные в 50-е годы нашего века инженером Ф. М. Федченко. Их точность такова, что за сутки они отстают или уходят вперед не более чем на две или три десятитысячные доли секунды. Эта точность превышает астрономическую точность отсчета времени, о которой мы еще расскажем в этой главе.

### Автоколебания

Качания маятника, предоставленного самому себе, могут продолжаться очень долго, но все же рано или поздно они затухают. Это затухание происходит из-за трения

---

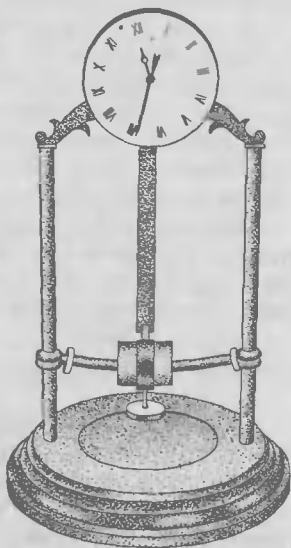
\*) Нужно только, чтобы этот размах был все же не слишком велик.

в подвесе и сопротивления воздуха. Энергию качаний, теряемую из-за этого, нужно восполнять, чтобы маятник качался так долго, как мы хотим. Для этого в маятниковых часах служили и служат пружины или гири. Поставляя маятнику энергию, они в то же время не сбивают его, не мешают ему качаться с его собственным периодом.

Всякий часовой механизм содержит в себе три основные части. Во-первых, это колебательная система, которой в часах Галилея — Гюйгенса служит маятник. Во-вторых, это заводной механизм — гиря или пружина. И в-третьих, это спусковой механизм, который связывает колебательное устройство с заводным механизмом. Эта связь действует так: при определенном положении маятника (или любой вообще колебательной системы) спусковой механизм подталкивает его, сообщает ему толчком энергию из запаса энергии заводного механизма.

Спусковой механизм срабатывает обычно два раза за период и притом вблизи положения равновесия колебательной системы. Для маятника положением равновесия является, очевидно, вертикальное положение. При своих колебаниях он проходит через вертикаль с наибольшей скоростью, и в этот момент следует толчок, который эту скорость еще немного увеличивает. Если заводным механизмом служит гиря, то при каждом толчке гиря опускается на одно и то же расстояние, так что она совершает одну и ту же работу, и колебательная система получает одну и ту же порцию энергии.

В хороших часах не только период колебаний, но и их размах остается все время одинаковым. Размах колебаний называется их амплитудой. У маятника амплитуде соответствуют крайние положения, наибольшие отклонения от вертикали. Амплитуда колебаний не должна зависеть от силы начального толчка, которым запускают часы. Но чтобы они пошли, этот начальный толчок должен быть все же достаточно сильным. Если толчок слишком слаб, то колебательный процесс вообще не установится — колебания быстро прекратятся.



Электромеханические часы

Итак, часы — это устройство, в котором осуществляются колебания с неизменным периодом и амплитудой. И период, и амплитуда колебаний не зависят от силы начального толчка и определяются не ею, а собственными свойствами системы. Такие системы в физике называют автоколебательными.

Часы как автоколебательная система — это, конечно, часы только в собственно техническом смысле слова. В более широком смысле часами может служить любое искусственное или естественное устройство, по которому можно узнавать время.

В главе 1 говорилось, например, о биологических ритмах и биологических часах. Часами может служить любое ритмическое или циклическое явление, если его период выдерживается с достаточным постоянством.

Но даже и цикличность не обязательна. Для отсчета времени подошел бы и вообще любой процесс — естественный или искусственный, если нам хорошо известно, как он развивается со временем. Например, песочные часы или греческие клепсидры — это не циклические устройства. Но как только их градуируют, то есть установят закон поведения во времени, они становятся часами.

### Атомные часы

Точность лучших маятниковых часов — это еще не предел точности в современной науке и технике. Самые совершенные современные часы дают возможность измерять время с точностью почти фантастической — до миллиардных долей секунды в сутки. Это не механические, а атомные часы — дитя физики наших дней.

Они используют строго периодические колебания электромагнитных волн, испускаемых атомами и молекулами.

Еще с XIX века физикам было известно, что атомы и молекулы способны излучать электромагнитные волны в очень узких спектральных линиях. Каждой линии спектра соответствует определенная частота или определенный период колебаний вектора электрического поля в электромагнитной волне. Колеблющийся вектор электрического поля волны и сужит «маятником» атомных часов, а излучающие атомы составляют их колебательную систему.

Рекордные по точности атомные часы представляют собой сложные технические устройства, использующие самую совершенную электронную аппаратуру и такие приборы, как, например, лазер. Это необходимо для того, чтобы все атомы, участвующие в работе колебательной системы, излучали волны согласованно, чтобы колебания электрического поля в волне

можно было четко и без помех считать и переводить в показания на «циферблате».

После создания атомных часов единицей времени — взамен определенной доли суток или года, как это было прежде, — стала «атомная секунда». Это промежуток времени, в течение которого в электромагнитной волне, испускаемой в точно определенной линии излучения атома цезия, произойдет 9 192 631 770 колебаний\*).

### Модель Вселенной

Вернемся в XIV век. Это был век технических изобретений, которые возникали по всей Европе и сразу же входили в жизнь. Усовершенствование часовых механизмов, сооружение все более сложных часов приняло тогда, как говорят историки, характер всеобщего увлечения.

Любопытные часы изготовил в середине XIV века мастер Дж. де Донди из Падуи. Это были не просто часы, а то, что называли астрариумом. Конечно, они показывали время и притом с довольно высокой точностью. Но это еще не все. Астрариум воспроизводил перемещение Солнца, Луны и планет по небесной сфере. И все это в полном соответствии с астрономическими знаниями той эпохи.

Это была вполне удавшаяся попытка построить действующую модель Вселенной, то есть это было воспроизведение Вселенной в действии посредством часового механизма.

Нужно помнить, что в те времена законы движения планет — законы Кеплера — еще не были открыты. Вместо этого имелаась описательная система мира, созданная Птолемеем (90–160 годы нашей эры), великим астрономом древности, жившим в Александрии. Она удачно описывала видимые движения планет, но была чрезвычайно сложной и громоздкой.

Согласно Птолемею, планеты двигались по окружностям, центры которых в свою очередь перемещались вдоль других окружностей и т. д. Движение каждой планеты представляло собою сложение нескольких одновременных круговых движений. Эти круговые движения назывались эпициклами.

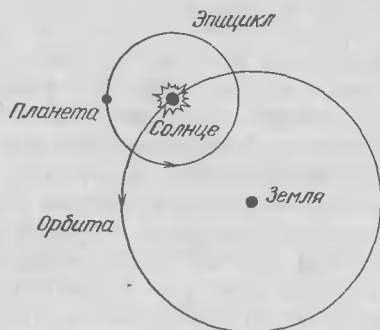
Птолемей считал, что «наблюдаемые небесные явления воспроизводятся неизменными круговыми движениями». В простейшем случае нужно считать, что Солнце движется вокруг Земли по большой окружности, а планета обращается по малой

---

\*) О новейших достижениях в этой области см. статью: *Басов Н. Г. и др.* Миллион лет с точностью до секунды // *Наука и жизнь*. — 1984. — № 6 и книгу: *Завельский Ф. М.* Время и его измерение. — М.: Наука, 1987.

окружности, центром которой служит Солнце. Но для объяснения всех деталей и тонкостей в видимом движении планет нужно было добавлять новые окружности — эпициклы. Всего их было 39 для объяснения движений Солнца, Луны и пяти известных тогда планет — Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна.

Система была неестественно громоздкой, и вся ее сложность происходила из того, что Птолемей, как и другие астрономы вплоть до Коперника, считал Землю неподвижной. Земля



Круговые движения планеты по Птолемею

находилась у него в центре мироздания. Поэтому систему Птолемея называют геоцентрической.

Но нужно отдать должное системе Птолемея — это была первая и весьма полная система мира, которая с немалой пользой служила людям на протяжении четырнадцати веков.

Многочисленные цепляющиеся друг за друга колеса астрариума воспроизводили эпициклы Птолемея. А вся эта часовая машина представляла собою систему Птолемея «в металле», как говорят инженеры.

Модели Вселенной, подобные астрариуму, наглядным и очевидным образом представляли любому человеку устройство Вселенной.

Система Птолемея — это тоже модель Вселенной. Но в отличие от астрариума, она воспроизводит мир в теоретическом виде — в виде чисел, таблиц, графиков. Она позволяет вычислять наперед пути небесных светил и эти предсказания проверяются потом наблюдениями.

В современной науке тоже строятся модели Вселенной или, как еще говорят, космологические модели. Они описывают уже не Солнечную систему с ее планетами, а весь мир звезд и галактик, ставший доступным астрономическим наблюдениям. Эти модели имеют теоретический, физико-математический ха-

рактер. Модель Вселенной, созданная в 1922—24 годах в Петрограде замечательным советским математиком и механиком А. А. Фридманом (1888—1925) лежит в основе современной космологии — науки о Вселенной как целом. О ней мы подробно расскажем в главе 10.

### Астрономические часы

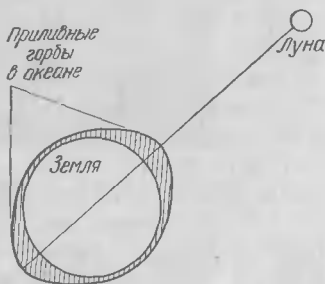
Часы мастера из Падуи показывают Солнечную систему в действии. Но и Солнечная система в свою очередь — это наши надежные, неизменно действующие часы. А главные наши часы — это сама Земля.

Вращение Земли, регулирующее во времени всю нашу жизнь, совершается с большой равномерностью. Его даже считали идеально периодическим, ибо не замечали никаких признаков замедления или ускорения.

Впервые в абсолютной точности этих естественных часов усомнился Ньютон. А в 1754 году Иммануил Кант (1724—1804), знаменитый философ и космогонист предположил, что вращение Земли может замедляться из-за морских приливов и отливов. Приливы обязаны действию Луны на земной океан: тяготение Луны вызывает подъем воды по линии Земля — Луна в обе стороны.

Вращение Земли и движение Луны непрерывно поворачивают эту линию и заставляют приливную волну бежать по океану вслед за Луной. Академик А. А. Михайлов, астроном Пулковской обсерватории, сравнил приливные выступы в океане с тормозными колодками на колесе трамвая\*). Эти «колодки» привязаны к Луне незримыми нитями тяготения и из-за этого они действительно притормаживают вращение Земли. Как колодки тормозят колесо трением о него, так и приливная волна, набегая на отмели и заливая берег, тормозит Землю.

Предсказанное Кантом замедление вращения Земли было обнаружено и надежно измерено только в середине нашего века. Оказалось, что из-за этого продолжительность суток увеличивается приблизительно на 0,0015 секунды за сто лет.



Прилив в океане

\*) См. книгу: Михайлов А. А. Земля и ее вращение. — М.: Наука, 1984. — Вып. 35. — (Б-чка «Квант»).

Так оценивается точность хода астрономических часов «Земля». Погрешности, связанные с постепенным слабым замедлением вращения Земли, очевидно, незначительны с точки зрения всех наших повседневных дел, да и большинства нужд техники и науки\*). Астрономические часы служили прекрасным образцом и эталоном точного хода для любых часов во все времена, пока 25—30 лет назад не появились атомные часы с их исключительно высокой точностью. Именно по атомным часам удастся контролировать вращение Земли и регистрировать в нем даже самые незначительные отклонения от равномерности.

### Часы «Пульсар»

В 1967 году астрономы Кембриджского университета (Англия) открыли на небе импульсные источники излучения, которые получили название пульсаров. Астрономия и до этого знала немало звезд, блеск которых так или иначе меняется. Некоторые из них (так называемые цефеиды) обнаруживают довольно регулярные периодические изменения блеска. Попеременное усиление и ослабление яркости происходит у этих звезд с периодом от нескольких дней до года. Это тоже астрономические часы, хотя и с не очень высокой точностью хода.

Пульсары резко выделяются среди всех переменных звезд. Дело не только в том, что они излучают импульсы как в видимом свете, так и в радиодиапазоне и в диапазоне рентгеновского и гамма-излучения. Важнее всего два замечательных обстоятельства.

Во-первых, периоды пульсаров очень коротки. Типичный период — всего 1 секунда. Но есть и рекордсмены: пульсар в созвездии Лисички имеет период 1,5 миллисекунды.

Во-вторых, период следования импульсов выдерживается у пульсаров с поразительной точностью. У некоторых из них сколько-нибудь заметные изменения периода могут накопиться лишь за миллионы лет. Это самые точные естественные часы.

Как выяснилось, пульсары представляют собой очень компактные звезды с радиусом всего 10—15 километров\*\*). Как и Земля, они вращаются вокруг своей оси, но это очень бы-

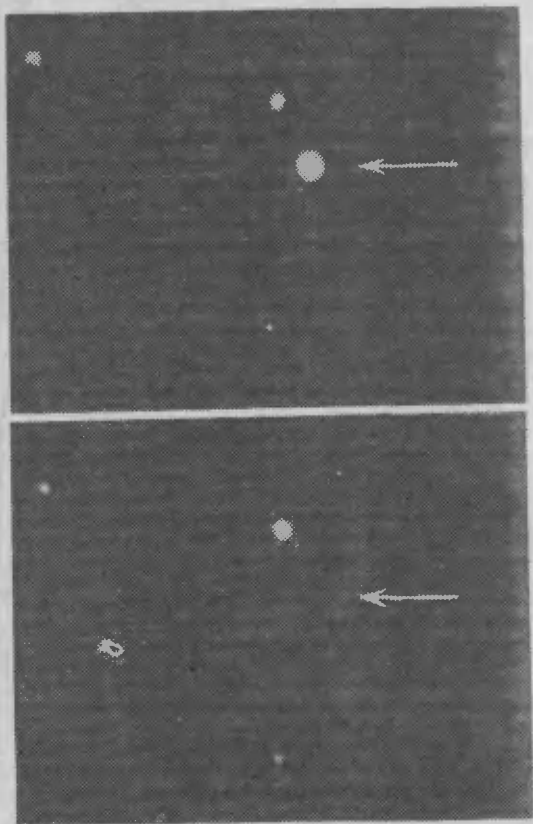
---

\*) Время, измеряемое по вращению Земли вокруг ее оси, принято называть всемирным. Можно вести отсчет времени и по орбитальному движению Земли вокруг Солнца; в этом случае говорят об эфемеридном времени.

\*\*) Эти звезды состоят главным образом из нейтронов, и потому их так и называют нейтронными. См. о них, например, в книге: Чернин А. Д. Звезды и физика. — М.: Наука, 1985. — Вып. 38. — (Б-чка «Квант»).

строе вращение. Звезда-пульсар в созвездии Лисички совершает 667 оборотов в секунду.

Эффект пульсаций возникает из-за того, что пульсары испускают излучение не сразу во все стороны, а узким пучком.

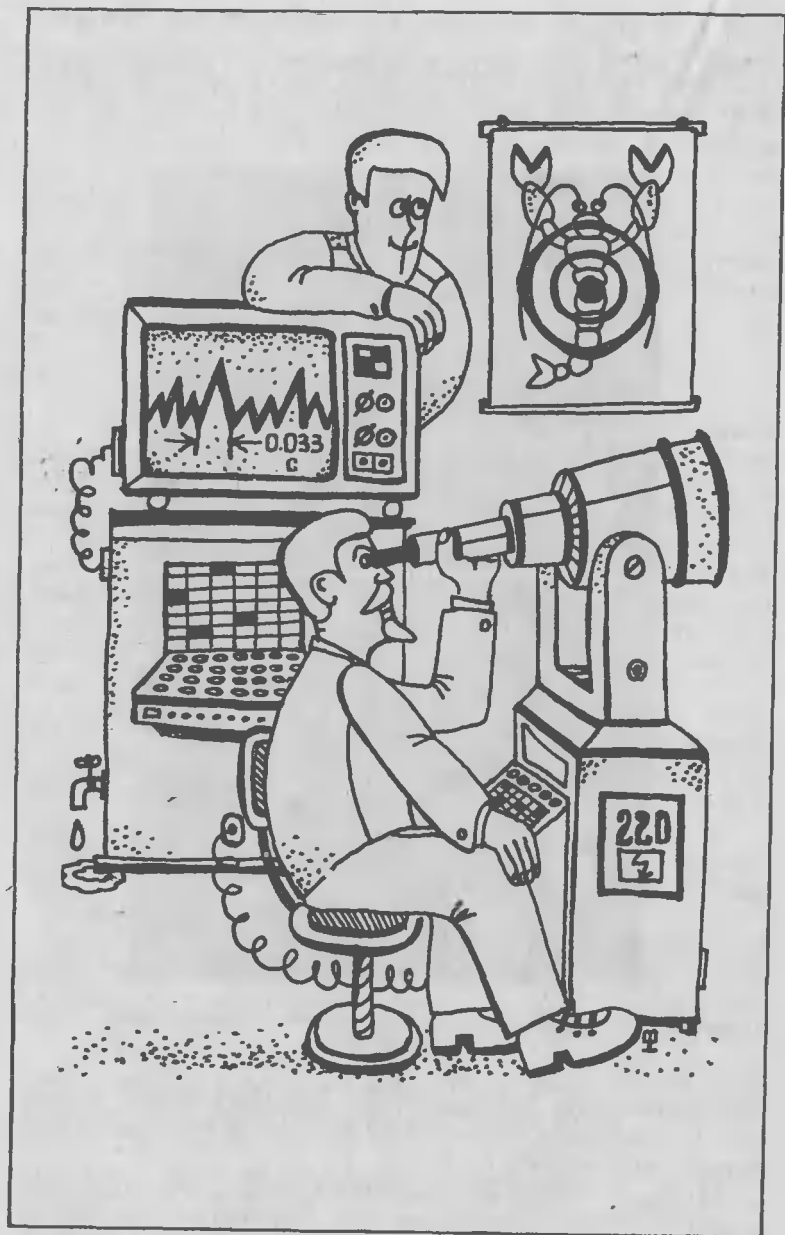


Пульсар, обнаруженный в центре Крабовидной туманности, имеет период 0,033 секунды

И этот пучок, как луч прожектора, вращается вместе со звездой. Раз за период луч пробегает по Земле и тогда наши приемники регистрируют сигнал.

Сколь бы строго ни соблюдался период пульсаров, они и другие астрономические и вообще естественные часы все же уступают по точности рукотворным атомным часам, в которых воплотились достижения современной науки и техники.





Когда-то слова «астрономическая точность» означали максимальную, почти недостижимую в жизни точность. Сейчас вместо этого приходится говорить «атомная точность» — на то и атомный век.

#### ГЛАВА 4

### АБСОЛЮТНОЕ ВРЕМЯ

Самое значительное научное достижение эпохи Возрождения — это учение Коперника (1473—1543). Взамен дальнейших попыток усовершенствования геоцентрической системы Птолемея, предпринимавшихся вплоть до его времени, Коперник предложил хорошо известную теперь всем идею: Солнце находится в центре планетной Системы, а Земля и остальные планеты обращаются вокруг него.

Прежде всего, система мира стала от этого много проще, понятнее и естественнее. В гелиоцентрической системе Коперника все стало на свои места. Но не менее важно и то, что это было торжество новых взглядов на природу, на Землю и небеса, свободных от церковных догм и предрассудков в науке. Это был поворот от умозрений к конкретному опыту, прямым астрономическим наблюдениям. С этого начались замечательные успехи естественных наук нового времени. У их колыбели вместе с Коперником стояли Галилей и Ньютон.

На этом новом пути стало возможным создание механики, физического учения о механических движениях. Мы называем сейчас механику Галилея и Ньютона классической; она дала первую научную теорию времени.

#### Галилей

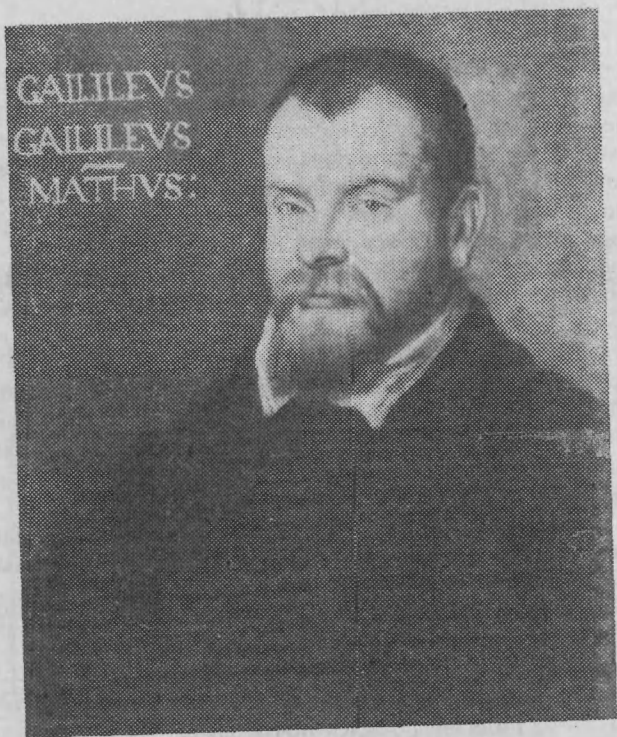
Галилей родился почти на целый век позже Коперника. Ему суждено было привести идею о гелиоцентрической системе к полному признанию. Физический эксперимент и астрономические наблюдения были его стихией, и они щедро наградили его самыми блестящими открытиями.

В 1610 году Галилей направил на небо изобретенный им новый инструмент — телескоп, и открытия немедленно последовали одно за другим. Галилей обратил телескоп к Млечному пути и установил, что это не сплошная белесоватая полоса света, а совокупность множества звезд. Так была открыта наша Галактика — звездная система, насчитывающая сотни миллиардов звезд, одной из которых является наше Солнце.

Наблюдая в телескоп Юпитер, Галилей открыл четыре его больших спутника. Это были луны Юпитера, и наша Луна ока-

залась, таким образом, уже не единственным спутником в Солнечной системе.

Настоящим триумфом гелиоцентрической системы Коперника стало открытие Галилеем фаз Венеры. С этого времени сомнения в системе Коперника окончательно отпали, ибо смена



Галилео Галилей

фаз Венеры с полной очевидностью указывала на ее вращение вокруг Солнца.

Хорошо известны физические эксперименты, которые производил Галилей. Мы уже говорили об экспериментах с маятниками, из которых родилась идея маятниковых часов. Эксперименты со свободным падением тел дали представление о важнейших свойствах земного притяжения, о законах движения под действием притяжения. Галилей установил, что вертикальная скорость любого свободно падающего тела возрастает в поле тяжести пропорционально времени. Все тела, независи-

мо от их массы, размеров, формы, падают с одинаковым ускорением\*).

Глубокие размышления над различными видами движений в окружающем нас мире привели Галилея к принципу относительности. В современной формулировке его можно кратко выразить следующим образом:

Во всех лабораториях, которые движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, движение тел происходит по одинаковым законам.

### Относительность

Галилей разъяснял это положение различными наглядными примерами. Вот путешественник в закрытой каюте спокойно плывущего корабля. Он не замечает никаких признаков движения. Если в каюте летают мухи, они отнюдь не скапливаются у задней ее стенки, а свободно летают по всему объему. Если подбросить мячик прямо вверх, он упадет прямо вниз, а не отстанет от корабля, не упадет ближе к корме.

Из принципа относительности следует, что между покоем и движением — если оно равномерно и прямолинейно — нет никакой принципиальной разницы. Разница только в точке зрения.

Например, путешественник в каюте корабля с полным основанием считает, что книга, лежащая на его столе, покоится. Но человек на берегу видит, как корабль плывет, и он имеет все основания считать, что книга движется и при том с той же скоростью, что и корабль. Так движется ли на самом деле книга или покоится?

На этот вопрос нельзя, очевидно, ответить просто «да» или «нет». Спор между путешественником и человеком на берегу был бы пустой тратой времени и слов, если каждый из них настаивал бы только на своей правоте и отрицал точку зрения партнера. Они оба правы, и чтобы согласовать позиции, им нужно только признать, что книга покоится относительно корабля и движется вместе с кораблем относительно берега.

Этот вывод полностью согласуется со здравым смыслом и с любым экспериментом, который мы пожелаем провести, чтобы это проверить.

Каюта корабля — это одна из лабораторий, о которых идет речь в нашей формулировке принципа относительности, а берег — другая. Лабораторией можно считать любое место, любое помещение, в котором мы находимся, когда производим

\*) Три столетия спустя Эйнштейн увидел в этом один из самых фундаментальных принципов физики (см. главу 8).

наблюдения или эксперименты. Лаборатория — это то, относительно чего наблюдается у нас движение или покой, с чем мы связываем свою точку зрения. И слово *относительность* в названии принципа Галилея не скрывает в себе ничего, так сказать, особенного; оно не имеет никакого иного смысла, кроме того, который мы вкладываем в утверждение о том, что движение или покой — это всегда движение или покой относительно чего-то, что служит нам лабораторией.

Рассуждая о книге, путешественнике, корабле, мы взяли для определенности конкретную ситуацию и произвели то, что Эйнштейн называл мысленным экспериментом. Это воображаемый опыт, который мы можем производить «в уме», не прибегая ни к каким приборам, оборудованию или инструментам. От этого сила и убедительность наших выводов ничуть не страдают. Напротив, мы можем получать таким путем надежные и к тому же довольно общие выводы, которые сами по себе, очевидно, не зависят от конкретных (и в этом смысле случайных) условий мысленного эксперимента. И вот вывод Галилея: движение и покой относительны.

### Инерция

Принцип относительности утверждает, что законы движения тел одинаковы во всех лабораториях, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Какому же закону движения соответствует относительность движения и покоя?

Это закон инерции, тоже установленный Галилеем. Он гласит: тело, на которое не действуют другие тела, движется равномерно и прямолинейно.

Нужно сказать, что в повседневной жизни нам никогда не приходится иметь дела с телами, на которые не действуют другие тела. На Земле на все тела действует Земля — притягивает их к себе. Кроме того, каждое движущееся тело испытывает сопротивление воздуха или еще и трение о дорогу, рельсы и т. п. Мячик может долго катиться по полу, но он обязательно замедляет свое движение и рано или поздно должен остановиться. Это подсказывает, скорее, заключение, противоположное закону инерции, — кажется, для того, чтобы тело продолжало движение и не останавливалось, его нужно подталкивать, воздействовать на него силой со стороны. Такой вывод и сделал в свое время Аристотель. Он утверждал, что движение возможно только тогда, когда на данное тело воздействуют другие тела.

Галилей решительно пошел против авторитета Аристотеля, который в те времена был непререкаем у ученых и к тому же поддерживался всей силой и властью католической церкви. Галилей понял, что движение тел останавливается из-за трения и сопротивления воздуха. Другими словами, тело в действительности испытывает внешние силы — силы трения и сопротивления — и именно из-за них не может продолжать свое движение сколь угодно долго.

Как это можно проверить? Нужно провести эксперимент, в котором можно было бы силы трения и сопротивления уменьшать, сводя их по возможности на нет. Тогда движение должно продолжаться все дольше и дольше. Это и в самом деле показывает опыт. И теперь остается сделать еще один шаг и провести уже не лабораторный, а мысленный опыт, в котором трения и сопротивления вовсе нет. Его результат очевиден: движение будет продолжаться без конца, оставаясь все время равномерным и прямолинейным. Любое тело, однажды приведенное в движение, двигалось бы вечно в отсутствие воздействий на него со стороны.

Когда тело движется равномерно и прямолинейно, всегда можно вообразить лабораторию, которая двигалась бы точно так же, как это тело. Собственно, лабораторию можно поместить на это тело или даже просто взять само тело в качестве лаборатории. И тогда относительно такой лаборатории тело будет, очевидно, покоиться.

Это, конечно, не означает, что между покоем и равномерным движением вообще нет никакой разницы. Но понятия покоя и движения приобретают смысл лишь тогда, когда указана точка зрения — лаборатория, в которой ведется наблюдение.

Содержание принципа относительности Галилея этим отнюдь не исчерпывается, и мы будем еще снова и снова возвращаться к нему. Обратим внимание на то, что у Галилея четко определены лаборатории, в которых «действует» принцип относительности — это лаборатории с равномерным и прямолинейным движением. Согласно установившейся традиции, такие лаборатории называют инерциальными. Часто вместо слова *лаборатория* говорят *система отсчета*, вкладывая в это тот же смысл. Все законы механики Галилея — Ньютона формулируются для инерциальных лабораторий, или систем отсчета.

Но что же такое инерция? Это краткое название того, о чем говорит закон Галилея: это сохранение равномерности и прямолинейности движения в отсутствие внешних воздействий.

## Ньютон

Исаак Ньютон (1642—1727) родился в год смерти Галилео Галилея.

«Счастливым Ньютоном, счастливое детство науки!... Природа была для него открытой книгой, которую он читал без усилий. Концепции, которыми он пользовался для упорядочения



Исаак Ньютон

данных опыта, кажутся вытекающими самопроизвольно из самого опыта, из замечательных экспериментов... Водном лице он сочетал экспериментатора, теоретика, мастера... Он предстал перед нами сильным, уверенным и одиноким; его радость созидания и ювелирная точность проявляются в каждом слове и каждом рисунке». Это слова Эйнштейна из предисловия к одному из изданий книги Ньютона «Оптика», слова, полные восхищения и преклонения перед образом «этого блестящего гения».

В другой статье о Ньютоне Эйнштейн писал: «Цель Ньютона заключалась в том,

чтобы дать ответ на вопрос: существует ли простое правило для полного вычисления движений небесных тел нашей планетной системы по заданному состоянию движения всех этих тел в один определенный момент времени?».

Это была грандиозная задача. Ньютон дал положительный ответ на этот вопрос, и, самое главное, он нашел свое «простое правило».

Для этого потребовалось прежде всего выяснить связь между внешним воздействием на тело и тем изменением в состоянии его движения, к которому это воздействие приводит. Чтобы характеризовать различные состояния движения, Ньютон пользуется понятиями скорости и ускорения, четко определенными его предшественником Галилеем.

Если скорость неизменна по своей величине и направлению, то движение равномерно. Если скорость меняется, то возникает ускорение. Ускорение возникает и тогда, когда движение равномерно, но не прямолинейно; например, равномерное вра-

щение по окружности — это движение с ускорением, хотя и при неизменной величине скорости. Сейчас все это кажется нам простым и очевидным. Но нужно помнить, что до Галилея понятия скорости и ускорения оставались еще довольно смутными.

Ньютон установил, что существует связь между силой и ускорением: ускорение прямо пропорционально силе. Но чтобы сделать эту связь полностью определенной, потребовалось ввести новое понятие — понятие массы. Если сила, действующая на тело, и его ускорение известны, то масса тела есть отношение силы к ускорению. Это одна из формулировок закона Ньютона. Его принято называть вторым законом движения, а первым называют закон инерции. Третий закон утверждает равенство действия и противодействия.

Законы механики Галилея — Ньютона мы изучаем с детства; в школе они достаются нам уже в готовом виде, и потому очень трудно представить себе сейчас, какая сила мысли потребовалась, чтобы найти эти законы, извлечь их из экспериментов и наблюдений.

Еще одним замечательным достижением Ньютона было установление закона всемирного тяготения: два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. И это относится к любым телам — камню на Земле или планете в небе.

### Классическая механика

На основании открытых им законов механики Ньютону удалось объяснить до мельчайших деталей движение Луны и планет, явление океанских приливов, вызываемых тяготением Луны, и многое, многое другое. Казалось, вся Вселенная охвачена теперь теоретической мыслью, в ней не осталось уже чуть ли ничего, что не поддавалось бы объяснению и самому детальному описанию на основании «простого правила», которым и стала механика Галилея — Ньютона вместе с законом всемирного тяготения.

Механику Галилея — Ньютона принято называть классической — с тем же правом и основанием, с каким это определение прилагается к геометрии Евклида. Двадцать веков отделяют классическую механику от классической геометрии. Но мы воспринимаем одну как прямое продолжение другой. Так, по видимому, смотрели на свою науку и ее создатели. Геометрия во все века оставалась привлекательной и неотразимой. Самый взгляд на вещи воспитывался ею и питался ее образами. Гали-



лей писал, что мир представлялся ему книгой, «написанной математическим языком в виде треугольников, кругов и других геометрических фигур».

### Инерциальные часы

Чтобы измерить скорость и ускорение, нужно иметь часы. Часы указывают нам, за какое время тело прошло данный путь. Деля путь на время, находим скорость. Так в случае равномерного движения; в случае неравномерного движения отношение пути к времени дает среднюю скорость тела. Точно так же определяется и ускорение — только вместо пути нужно брать скорость и делить изменение скорости (разность ее значений) на время, за которое скорость изменилась на данную величину.

Механика не существует без времени, и время присутствует в ней, по существу, на тех же правах, на каких пространство присутствует в геометрии.

Измерять время хотелось бы идеально точными, строго ритмично идущими часами. Если же часы то отстают, то спешат, измерения времени, а с ними и измерения скорости и ускорения окажутся неверными. Так равномерное движение покажется нам из-за этого неравномерным.

Выходит, что законы классической механики подразумевают не только инерциальность системы отсчета, лаборатории, в которой проводятся наблюдения. Требуется еще и ритмичность хода часов, по которым отсчитывается в лаборатории время.

Однако же, как проверить часы, как оценить точность, ритмичность их хода?

Есть только один способ — тот же, что и для определения инерциальности лаборатории. Нужно наблюдать за движением тела, не подверженного внешнему воздействию и, пользуясь нашими часами, измерять время, необходимое этому телу для прохождения разных отрезков пути. Если мы найдем, что его скорость на всех этих отрезках одинакова, — значит, наши часы идут достаточно точно.

Такие ритмично идущие часы называют инерциальными.

Но вот что особенно важно. Как бы ни двигались друг относительно друга различные инерциальные часы вместе с различными инерциальными лабораториями, все они показывают одно и то же время. Не только каждые из них идут в неизменном ритме, но этот ритм у всех часов одинаков. Пользуемся ли мы покоящимися часами в нашей собственной лаборатории

или смотрим на движущиеся мимо нас часы других лабораторий и ведем по ним отсчет времени — результат измерений всегда один и тот же.

### Время классической механики

Все инерциальные часы в мире показывают одно и то же время.

Но откуда следует это столь сильное заключение? Точность хода каждого отдельных часов можно проверить и установить с помощью наблюдения за телом, не испытывающим действия сил. Это так, но ведь утверждается, что все такие часы имеют не только постоянный, но и синхронный — все в одном ритме — ход.

Это утверждение нельзя вывести логически из принципа относительности или из закона инерции. Оно не выводится; в механике Галилея — Ньютона оно принимается в качестве аксиомы, играющей ту же роль, что и аксиомы геометрии Евклида.

Ход всех инерциальных часов одинаков. Без этого здание классической механики рушится. Но законы классической механики со всей возможной точностью подтверждаются в огромной области наблюдаемых явлений природы — от движения небесных тел до движений мельчайших частиц, атомов и молекул газов. Значит, верна и исходная аксиома. Добавим — верна во всей этой области явлений.

Классическая механика утверждает синхронность всех инерциальных часов. Тем самым она фиксирует в действительности фундаментальное свойство времени — той физической реальности, для измерения которой и служат часы.

Исследуя движения разнообразных тел природы, земных и небесных, классическая механика выяснила, как мы видим, не только законы, которым подчиняются все эти движения. Она установила и нечто большее: в мире существует время, общее для всех этих тел и одинаково измеряемое всеми инерциальными часами.

Это единое, всеобщее и универсальное время называют абсолютным временем. Абсолютное время отсчитывается для всей Вселенной и ход его везде и всегда одинаков.

Открытие абсолютного времени — таков важнейший результат классической механики. Это достижение стало возможным благодаря ясному и, можно сказать, конструктивному подходу к проблеме времени, принятому Ньютоном. Фактически при построении классической механики он исходил из идеи абсолютного времени как из рабочей гипотезы.

«Гипотез не измышляю», — говорил Ньютон. Но это была гипотеза — гипотеза, к которой подводил весь существующий опыт механики и в первую очередь наблюдения и идеи Галилея, открытие им законов движения маятника, изобретение на их основе надежных маятниковых часов. Их мерный ход наводил на мысль о непрерывном и всеобщем мировом времени. Под их ритмичный ход, можно сказать, и строилась новая физика Галилея и Ньютона и прежде всего их механика, которая стала классической теорией абсолютного времени.

Всеобщий, абсолютный характер времени в механике Галилея — Ньютона самым решительным и очевидным образом проявляется во взгляде на одновременность событий. Раз имеется полная согласованность, синхронность хода всех часов, то два каких-то события, одновременность которых мы установили по каким-то одним часам, будут одновременны и по всем другим часам тоже. Одновременность — факт, не зависящий от системы отсчета. Это понятие не относительное, а абсолютное: что одновременно, то одновременно с любой точки зрения, в любой инерциальной системе отсчета.

### Время в «Началах»

Вот как сам Ньютон определяет время в знаменитой книге «Математические начала натуральной философии», вышедшей ровно 300 лет тому назад, в 1687 году\*). «Абсолютное, истинное математическое время, само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью».

Это определение дается в самом начале «Начал».

Под «истинным математическим временем» Ньютон понимал то время, которое фигурирует в математической формулировке законов движения. Абсолютное время служит как бы идеальной мерой длительности всех механических явлений. Оно идеально в том же смысле, в каком идеально равномерное и прямолинейное движение: Строго равномерного движения мы не наблюдаем из-за трения и иных обстоятельств, которые нужно считать случайными. От них, правда, можно избавиться в той или иной степени, и чем слабее их влияние, тем ближе мы к идеалу равномерного движения.

Точно так же и со временем. То время, которое мы можем реально измерять — это только приближение к идеальному,

---

\*) Перевод ее с латыни сделал знаменитый математик и механик академик А. Н. Крылов.

«истинному математическому» времени. В этих измерениях нам мешают случайные обстоятельства, от которых окончательно никак не избавиться и можно только стремиться свести их к минимуму.

Вот что Ньютон говорит об этом реально, с неизбежными ошибками измеряемом и реально употребляемом времени: «Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как то: час, день, месяц, год».

Ньютон учит нас не слишком доверять и таким, казалось бы, точным часам, как астрономические часы «Земля». Никто не поручится за то, что они идут строго равномерно. Скорее, наоборот — как все в природе, вращение Земли не идеально. «Ибо естественные солнечные сутки, принимаемые при обыденном измерении времени за равные, на самом деле между собой не равны».

И вообще: «Возможно, что не существует (в природе) такого равномерного движения, которым время могло бы измеряться с совершенной точностью. Все движения могут ускоряться или замедляться, течение же абсолютного времени изменяться не может. Длительность или продолжительность существования вещей одна и та же, быстры ли движения (по которым измеряется время), медленны ли, или их совсем нет».

Даже если его нечем измерять, абсолютное время все равно существует и течет идеально равномерно. Любые же измерения только приближаются в той или иной степени к абсолютному времени, а то время, которое дают реальные часы с их отнюдь не идеальной точностью, Ньютон снабжает снижающими эпитетами — «относительное», «кажущееся», «обыденное».

### **Абсолютное время, абсолютное пространство**

Физические тела движутся во времени и пространстве. Через их движения проявляются свойства времени и пространства. Время и пространство определяют самый характер движений, изучаемых классической механикой.

Вот что классическая механика говорит нам о свойствах времени.

1. Время существует само по себе и своим существованием не обязано чему бы то ни было в мире.

2. Ходу времени подчиняются все тела природы, все физические явления. Но сами эти тела и явления не оказывают никакого воздействия на ход времени.

3. Все моменты времени между собой равноправны и одинаковы: время однородно.

4. Ход времени всюду и везде в мире одинаков.

5. Ход времени одинаково равномерен в прошлом, настоящем и будущем.

6. Время простирается от настоящего неограниченно назад в прошлое и неограниченно вперед в будущее.

7. Время обладает одним измерением.

8. Промежутки времени отмеряются, складываются и вычитаются, как отрезки евклидовой прямой.

Таково абсолютное время классической механики.

Пространство рассматривается ею тоже как абсолютное. Это означает, что оно по своим свойствам не зависит от всего того, что в себя вмещает, и остается всегда и везде одинаковым и неизменным. Вот что классическая механика говорит о свойствах пространства.

1. Пространство существует само по себе и своим существованием не обязано чему бы то ни было в мире.

2. Пространство вмещает все тела природы и дает место всем ее явлениям, но не испытывает на себе никакого их воздействия.

3. Пространство всюду и везде одинаково по своим свойствам. Все его точки равноправны и одинаковы — оно однородно. Все направления в нем также равноправны и одинаковы — оно изотропно.

4. Во все времена пространство неизменно одно и то же.

5. Пространство не имеет границ.

6. Пространство простирается неограниченно во всех направлениях и имеет бесконечный объем.

7. Пространство обладает тремя измерениями.

8. Пространство описывается геометрией Евклида.

Каждое из свойств времени и пространства, утверждаемых классической механикой, не противоречит ни повседневному опыту, ни экспериментам или наблюдениям, с которыми эта наука имеет дело. Хотя и нельзя сказать, что все эти свойства с одинаковой простотой, очевидностью и однозначностью могут быть найдены и извлечены из непосредственного опыта.

Можно ли, например, назвать какие-либо факты, которые прямо указывали бы на бесконечность объема пространства? Физика такими фактами не располагала во времена Галилея и Ньютона, не располагает она ими и теперь. Точно так же нет никаких фактов, которые указывали бы на бесконечность длительности времени в обоих направлениях.

А вопрос об объеме пространства и длительности времени — это, несомненно, важнейший вопрос об окружающем нас

физическом мире. Классическая механика его не решает. Она действует так, «как будто» пространство и время неограниченны по объему и длительности, и при этом она не сталкивается ни с какими противоречиями во всей огромной области явлений, где эта наука применяется.

Означает ли такое отсутствие противоречий полное и безоговорочное подтверждение всех принятых механикой свойств времени и пространства? Строго говоря, нет. Ведь сколь бы ни велика была область применимости классической механики, фактически она все же ограничена. Поэтому строгий ответ и должен быть отрицательным. Но мы можем с полным основанием утверждать, что во всей области применимости классической механики пространство и время «ведут себя» так, как если бы они были неограниченны и бесконечны по объему и длительности.

То же относится и к другим принятым в классической механике свойствам времени и пространства. Они представляются нам естественными и даже самоочевидными. Но наше чувство естественного и наше понимание очевидности воспитаны опытом, который по неизбежности всегда остается ограниченным. И за границами этого опыта мы уже не можем доверять нашему непосредственному чувству и пониманию. Но новый опыт, новые данные и сведения, почерпнутые из физических экспериментов и наблюдений, могут значительно расширить границы понимания и многое изменить даже в самых простых взглядах на мир. Так это постоянно и происходит в науке.

Так произошло и с физической наукой о времени, пространстве и движении. Рамки ее были необычайно расширены новейшей физикой XX века. Современное понимание мира много шире и глубже, чем во времена Ньютона. Выяснилось, что разные свойства времени и пространства, одинаково безоговорочно принимаемые и утверждаемые классической механикой, на самом деле по-разному «выдерживают напор» новых данных и сведений и некоторые из них определенно должны быть пересмотрены; другие же должны быть поставлены под вопрос и подвергнуты строгой проверке в нынешних или будущих экспериментах и наблюдениях.

Все это, однако, не отменяет классическую механику. В своей области применимости — огромной, но ограниченной, как мы это теперь понимаем, — она была и остается целиком оправданной и полностью справедливой. По словам Эйнштейна, одного из первых творцов новейшей физики, выводы, к которым пришел Ньютон «при современном ему состоянии науки были единственно возможными и, в частности, единственно плодотворными». Классическая механика как теория меха-

нических явлений определенного круга и масштаба исправно служит нам и поныне. На ней основаны все практические применения механики — от простейших устройств до самых сложных машин и механизмов. Это вместе с тем и ясная, удобная в повседневной практике физическая концепция времени.

## ГЛАВА 5

### ВРЕМЯ И СВЕТ

Говорят, что Эйнштейн немало удивил однажды своих собеседников, сказав, что никогда не понимал, что такое абсолютное время, — то есть того, что, как всем казалось, было общеизвестно.

Конечно, он знал об абсолютном времени, о его роли в классической механике все, что было известно. Но его взгляду на физический мир с самого начала была чужда вечная универсальность, принципиальная неизменность абсолютного времени. Почему время всегда и везде течет в одинаковом темпе? Чем этот темп задается и что его контролирует? Неужели существует какой-то способ регулировать ход времени сразу и одновременно во всей Вселенной?

Эти вопросы побуждали к критическому анализу физики Галилея и Ньютона.

Эйнштейн прекрасно видел, что на практике классическая механика действует безупречно. Два столетия она шла от одного достижения к другому и ничто, казалось, не предвещало каких-то препятствий, заминок или неудач. Но Эйнштейн испытывал внутреннюю неудовлетворенность идейной стороной, самой основой классической науки. В этой основе виделись ему непоследовательность и противоречия.

Из глубоких раздумий о реальном мире физических явлений, из критического анализа классической механики с ее концепцией абсолютного времени и абсолютного пространства родилась теория относительности Эйнштейна, которой суждено было произвести настоящий переворот в физике. К этому успеху привели Эйнштейна не только собственные научные усилия, но и замечательные результаты, достигнутые в той же области исследований его предшественниками и современниками, Дж. К. Максвеллом в Англии, Х. Лоренцом в Голландии, А. Пуанкаре во Франции.

Ключом к созданию теории относительности послужило, прежде всего, понимание особых свойств света, которые оказались удивительным образом связанными со свойствами времени.

Альберт Эйнштейн (1879–1955) писал о физической науке на рубеже XX века: «Несмотря на то что в отдельных областях она процветала, в принципиальных вещах господствовал догматический застой». А его интересовали именно «принципиальные вещи». И здесь он был смолоду решителен; порвав с давно уже устоявшимися и привычными для физиков представлениями о времени и пространстве, он стал на новую точку зрения и не отступил, когда созданная им теория привела к выводам, которые многим, если не всем, казались поначалу странными, парадоксальными, а то и вовсе нелепыми.

Любимым чтением в детстве и юности были у Эйнштейна научно-популярные книжки по физике и математике. В двенадцать лет в руки ему попала небольшая книга по геометрии Евклида. Она, как говорят биографы, произвела на будущего ученого впечатление чуда. Впоследствии он не раз вспоминал о первых впечатлениях от классической геометрии: «Тот не рожден для теоретических исследований, кто в молодости не восхищался этим творением».

В 1905 году, когда ему было 26 лет, Эйнштейн опубликовал научную работу «К электродинамике движущихся тел» и краткую заметку, посвященную формуле  $E = mc^2$ . С этого началась теория относительности. А формула Эйнштейна стала самой знаменитой физической формулой XX века. К 1916 году разработка теории относительности была им завершена.

Эйнштейн говорил, что теория относительности — это дом с двумя этажами. Первый этаж — так называемая специальная теория относительности (1905 год), а второй — общая теория относительности (1908–1916 годы). На обоих своих «этажах» теория Эйнштейна имеет дело с самыми фундаментальными



Альберт Эйнштейн



представлениями о физическом мире, предмет которых — теория времени, пространства и тяготения.

За теорией относительности с первых же лет после ее создания ходила слава непостижимой, вокруг нее возникали легенды. Утверждалось, что во всем мире теорию Эйнштейна понимают три человека, включая ее автора. Позже говорилось, что не три, а двенадцать, но уже без автора. Сам Эйнштейн шутил: «С тех пор как на теорию относительности навалились математики, я сам перестал ее понимать».

Сейчас теория относительности стала неотъемлемым, обязательным элементом физического мировоззрения и физического образования. На нее опираются, ее так или иначе используют в своих исследованиях физики, работающие в самых разнообразных областях. Без нее немыслимы такие разделы науки, как теория элементарных частиц и космология, первая из которых исследует самые малые тела природы, а вторая — самый большой ее объект, Вселенную как целое. Вместе с развитием физики, с расширением различных применений теории относительности вокруг нее постепенно рассеивался туман таинственности, и теперь она предстает перед всеми в своей глубине, ясности и стройности.

Математическая сторона теории относительности непроста. Но принципиальная основа теории не скрывается за математической формой, сколь бы сложной она ни была. Исходные идеи новейшей физики и главные ее результаты глубоки, но по самому существу просты и потому, к счастью, допускают такое изложение или объяснение, при котором многое становится ясным и без формул.

### Система отсчета

В специальной теории рассматриваются явления, для которых силы тяготения в любых их проявлениях слабы или вовсе несущественны. Общая теория — это теория пространства, времени и тяготения.

Может показаться, что в идейной своей основе специальная теория относительности не очень далеко отходит от классической механики. В ней, например, по-прежнему действует принцип относительности. Но теперь его распространяют не только на движения тел, то есть на механические явления, но и вообще на все физические явления. Вот что говорит Эйнштейн.

«Представим себе двух физиков, у обоих есть по физической лаборатории, снабженной всеми мыслимыми физическими приборами. Лаборатория одного из физиков находится в открытом поле, а лаборатория другого — в вагоне поезда, быстро не-

сущегося в определенном направлении. Принцип относительности утверждает: два физика, применив все приборы для изучения всех существующих в природе законов — один в неподвижной лаборатории, другой в вагоне, найдут, что эти законы одни и те же, если вагон движется равномерно и без тряски. Если сказать в более абстрактной форме, то это выглядит так: согласно принципу относительности законы природы не зависят от поступательного (равномерного) движения систем отсчета».

Когда Эйнштейн говорит: «представим себе...», он предлагает нам проделать мысленный эксперимент. В данном случае речь идет о мысленном эксперименте с двумя лабораториями, которые мы должны считать инерциальными. Лаборатория, связанная с Землей, может вполне считаться инерциальной. Хотя мы понимаем, что, это, конечно, лишь приближение к идеальной инерциальности. Ведь Земля вращается вокруг своей оси, а вращение — это движение с ускорением. Если можно было бы связать систему отсчета с Солнцем, она была бы ближе к инерциальной, но все равно не строго инерциальной. К счастью, для многих реальных лабораторных экспериментов слабая неинерциальность лабораторий практически несущественна. А в мысленном эксперименте мы и вовсе этой малой неинерциальностью можем пренебречь.

Принцип относительности Эйнштейна охватывает все физические явления, все типы взаимодействий в физике, все физические процессы. Ему подчиняются, в частности, электромагнитные явления. Для наших дальнейших рассуждений это особенно важно: мы будем говорить о свете, о скорости его распространения, об обмене световыми сигналами. Распространение света — это явление электромагнетизма, свет представляет собою электромагнитные волны определенных частот.

### Скорость света

Специальная теория относительности расширяет принцип относительности Галилея. Кроме того, она добавляет еще одно новое положение: скорость распространения света (в пустоте) одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Но почему так важна эта скорость, что суждение о ней приравнивается по значению к принципу относительности?

Все дело в том, что скорость света — это самая большая из всех скоростей в природе, предельная скорость физических взаимодействий. Долгое время ее вообще считали бесконечной. Так думал, например, Аристотель. Правда, серьезные рассу-

ждения, которые приводились в древности в пользу такой возможности, кажутся нам сейчас не слишком надежными.

Например, Герон Александрийский рассуждал так. Если вы ночью повернете голову к небу, закрыв глаза, а затем внезапно откроете их, то вы увидите звезды немедленно. Раз между мгновением открытия глаз и мгновением, когда мы впервые видим звезды, не протекает никакого времени, свет распространяется мгновенно.

Это звучит для нас не очень убедительно. К тому же нужно сказать, что по мнению древних греков зрительные образы возникают вследствие излучения из глаз, а не вследствие испускания света (или его рассеяния) видимыми телами. Они держались, так сказать, «радиолокационной» теории зрения: чтобы что-то увидеть, нужно послать из глаз сигнал, а затем принять его обратно, — это отражение создаст и принесет нам видимый образ тела.

Скорость света долго еще считали бесконечной. Так думал, например, Кеплер, который прямо писал об этом в 1611 году.

Галилей был другого мнения. Он предложил не спорить, а проделать эксперимент. Пусть два человека, снабженные сигнальными фонариками, станут подальше друг от друга, насколько это возможно, и один из них включит свет. Другой должен включить свой фонарь, как только этот свет увидит. Время обмена сигналами можно измерить, а зная расстояние, нетрудно определить и скорость света. Галилей пытался проделать такой опыт, но его «экспериментальной технике» это было все же не под силу.

Эксперимент почти по такой же схеме провел позднее, в 1675 году, датский астроном Олаф Кристенсен Рёмер (1644—1710). Это был астрономический эксперимент, и «фонарем» служил ему один из открытых Галилеем спутников Юпитера — во время своих затмений. Конечность скорости света была подтверждена.

А в земных, лабораторных условиях опыт Галилея осуществил в 1849 году французский экспериментатор Ипполит Физо (1819—1896), которого Эйнштейн назвал в одной из своих работ гениальным физиком. В усовершенствованном варианте опыт был повторен затем в 1874 году. Он дал для скорости света величину 300—330 км/с. Современное наиболее точное значение скорости света получено с помощью атомных часов. Оно составляет 299 792 456,2 м/с с точностью до погрешности эксперимента, которая оценивается как  $\pm 0,2$  м/с.

Это — огромная скорость по сравнению с обычно наблюдаемыми скоростями в окружающем нас мире. Она и вправду чуть ли не бесконечно велика.

Например, линейная скорость вращения Земли на экваторе равна 0,5 км/с; скорость космической ракеты — 12 км/с, скорость Земли в ее орбитальном движении вокруг Солнца — 30 км/с; скорость самого Солнца в его движении вокруг центра Галактики — около 250 км/с. Скорость движения всей Галактики вместе с большой группой других галактик — относительно других таких же групп — еще примерно в два раза больше.

Вместе с Землей, Солнцем и Галактикой мы летим в космическом пространстве, сами того не замечая, с огромной скоростью, измеряемой несколькими сотнями километров в секунду. Это действительно огромная скорость, но все же и она еще мала по сравнению со скоростью света.

### Ни прибавить, ни убавить

Большой спутник движется по орбите вокруг Земли и с него, как с космодрома, запускается ракета — автоматическая межпланетная станция к Венере. Это не мысленный эксперимент, так уже не раз бывало в истории советских космических исследований. Представим себе, что запуск производится строго в направлении движения «орбитального космодрома». Ясно тогда, что относительно Земли ракета будет иметь скорость, равную сумме двух скоростей: скорость ракеты относительно «орбитального космодрома» плюс скорость самого этого «космодрома» относительно Земли. Скорости двух движений складываются, и потому ракета получает довольно большую скорость. Она может преодолеть притяжение Земли и улететь к другой планете.

А теперь другой эксперимент. Со спутника испускается луч света по направлению его движения. Относительно спутника, откуда он испущен, свет распространяется со скоростью света  $c$ . Какова скорость распространения света относительно Земли? Ответ: эта скорость — не больше  $c$ , она есть  $c$  и только  $c$ .

Если свет испускается не по движению спутника, а в прямо противоположную сторону, то и тогда относительно Земли свет будет распространяться со скоростью, не меньшей  $c$ , а снова равной этой величине.

Это — иллюстрация того важнейшего утверждения, которое положено в основу специальной теории относительности. Движение света принципиально отличается от движения всех других тел, скорость которых меньше  $c$ . Скорости этих тел всегда складываются с другими скоростями. В этом смысле скорости относительны: их величина зависит от точки зрения. Например, скорость человека, идущего вдоль вагона поезда по его

ходу, может быть 1 метр в секунду. Это скорость относительно поезда. Но скорость человека относительно Земли, или относительно лаборатории в поле (вспомним мысленный эксперимент Эйнштейна), будет равна сумме: 1 метр в секунду плюс скорость поезда, которая может составлять, например, 30 метров в секунду. Итак, скорость человека относительно лаборатории в поле равна 31 метру в секунду. И вообще, когда мы говорим о скоростях, мы всегда должны сказать, относительно чего мы их измерили, ибо эти скорости относительны, они зависят от системы отсчета.

А скорость света не складывается с другими скоростями. К ней ничего ни прибавить, ее никак ни убавить. Скорость света абсолютна, она всегда одна и та же и, говоря о ней, нам не нужно указывать систему отсчета.

### Абсолютный рекорд

Эйнштейн пришел к мысли об абсолютности скорости света логическим путем. И подвели его к этому заключению теоретические исследования электромагнитных процессов в движущихся телах. Все опытные, экспериментальные данные об этих процессах приводят к такой теории электромагнетизма, из которой в качестве неизбежного следствия вытекает постоянство скорости света в пустоте.

Абсолютность скорости света не противоречит принципу относительности и полностью совместима с ней. Постоянство этой скорости — закон природы, а потому — именно в соответствии с принципом относительности — он справедлив во всех инерциальных системах отсчета.

Эйнштейн положил принцип относительности и закон распространения света в основу специальной теории относительности в качестве исходных аксиом.

В пользу постоянства скорости распространения света определенно говорят прямые эксперименты. Эйнштейн особенно ценил эксперимент голландского астронома и космолога де Ситтера (1872—1935). Это был астрономический эксперимент, основанный на наблюдениях двойных звезд. Наблюдения показали, что скорость света не зависит от скорости звезды, испускающей свет. Факт постоянства скорости света неизменно подтверждался и многочисленными последующими экспериментами.

Возможны ли в природе скорости движения, превышающие скорость распространения света в пустоте? Специальная теория относительности и весь опыт физики отвечают на этот вопрос отрицательно. Скорость света — это верхний предел для

скорости перемещения любых тел природы, для скорости распространения любых волн, любых сигналов. Она максимальна — это абсолютный рекорд скорости.

Стоит напомнить, что со скоростью света распространяются в пустоте все электромагнитные волны, а не только волны из «видимого» диапазона частот, соответствующих зрительной способности человеческого глаза воспринимать электромагнитное излучение. Скорость распространения любых электромагнитных волн равна «рекордной» скорости  $c$ . Радиоволны, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение — все они имеют в пустоте эту скорость. Последние известия по радио и вообще любые сообщения мы можем передавать с этой предельной скоростью — но никогда не быстрее. Поэтому часто говорят, что скорость света — это предельная скорость передачи информации.

Но это — также и предельная скорость передачи любого воздействия от одного физического тела к другому. Как бы это воздействие ни передавалось — с помощью других тел или частиц, с помощью электромагнитных или любых других полей, оно не может опередить свет. И обратная реакция одного тела на воздействие другого, его противодействие не вернется быстрее, чем свет. Принято поэтому говорить, что скорость света — это предельная скорость любых физических взаимодействий, да и вообще всех мыслимых взаимодействий в мире.

Скорость света потому и играет такую важную роль, что она является универсальной, абсолютной и предельной скоростью для всякого движения, распространения, обмена сигналами, для передачи любого взаимодействия.

### Одновременность

Проведем один мысленный эксперимент. Допустим, что имеются две лаборатории — одна в чистом поле, как сказано у Эйнштейна, а другая в вагоне поезда, несущегося мимо нее. Эксперимент будет состоять в том, чтобы измерять время, необходимое свету для прохождения определенного пути.

Пусть на передней и задней стенках вагона имеются источники света, лампочки. Физик «поездной» лаборатории находится посередине вагона, на равном расстоянии от обоих источников света. Эксперимент устроен так, что вспышки света достигают «поездного» и «полевого» физиков одновременно — тот момент, когда они поравняются друг с другом. Сигналы приходят к каждому из них одновременно. Какие выводы можно из этого сделать?

Физик в «поездной» лаборатории говорит: «Сигналы были испущены из точек, находящихся от меня на равных расстояниях, и пришли одновременно; следовательно, они и испущены были одновременно».

А вот что говорит физик в «полевой» лаборатории: «Когда середина вагона со мной поравнялась, обе лампочки были на равных расстояниях от меня. Но свет был испущен раньше, когда вагон только приближался ко мне. И совершенно ясно, что при испускании света передняя стена вагона была ближе ко мне, чем задняя. Так как оба сигнала распространялись с одинаковой скоростью и пришли ко мне одновременно, пройдя при этом разный путь, лампочка на задней стенке вспыхнула раньше, чем на передней».

Сравнивая сообщения обоих физиков, мы должны констатировать следующее: два события — испускание светового сигнала с передней и задней стен вагона — одновременны в одной лаборатории и неодновременны в другой. Совершенно неважно, какова действительная разница во времени. Пусть она очень мала. Принципиально важно, что одновременность или неодновременность оказались понятиями, зависящими от точки зрения, — они оказались относительными.

Это утверждение представляет собой следствие двух аксиом специальной теории относительности: аксиомы относительности и аксиомы постоянства скорости света. Оно кажется нам неожиданным; но мы должны признать, что оно не противоречит логике и простому здравому смыслу, которыми мы пользовались в нашем мысленном эксперименте.

Но сам эксперимент все же необычен, слишком далек от повседневного опыта. Ведь чтобы разница во времени была заметна, так сказать, невооруженным глазом, нужна скорость поезда, практически совпадающая со скоростью света. С такими скоростями в повседневной жизни мы никогда не имеем дела. Потому результат эксперимента и удивляет нас.

Он удивляет нас еще и потому, что наши представления о времени и движении так или иначе воспитаны классической механикой; время заведомо считается абсолютным, а с ним абсолютной считается и одновременность.

Могла ли одновременность оказаться абсолютной в нашем мысленном эксперименте? Очевидно, для этого необходимо и достаточно, чтобы скорость света была бесконечной. Тогда любые расстояния свет покрывал бы без затраты времени, в мгновение ока, как говорится.

Но Галилей и Ньютон, создавшие классическую механику, знали, что скорость света конечна. Ньютон прямо писал в своей «Оптике»: «свет тратит... около семи или восьми ми-

ну: на прохождение от Солнца к Земле» (вторая из этих цифр — 8 минут — правильна).

Они не знали, однако, что скорость света в пустоте — совсем особая скорость; они не знали, что она абсолютна. Для них скорость света оставалась хотя и очень большой, но всего лишь одной из многих возможных скоростей в мире. Иначе они сами, наверное, создали бы теорию относительности.

### Относительность времени

Мысленный эксперимент, который мы провели вслед за Эйнштейном, побуждает к дальнейшим размышлениям. В «поездной» лаборатории физик измерил два промежутка времени  $t_1$  и  $t_2$ . Один из них,  $t_1$ , есть время, затраченное светом на путь от передней стены вагона; второй,  $t_2$ , — это время, затраченное на путь от задней стены. Эти промежутки по его данным равны:  $t_1 = t_2$ .

В «полевой» лаборатории тоже измерены два промежутка времени  $\tilde{t}_1$  и  $\tilde{t}_2$ . Но они оказались различными. Время, затраченное на путь от задней стены, больше времени, затраченного на путь от передней стены:  $\tilde{t}_1 > \tilde{t}_2$ .

Может ли промежуток времени  $\tilde{t}_1$  равняться промежутку времени  $t_1$ ? Может ли промежуток времени  $\tilde{t}_2$  равняться промежутку времени  $t_2$ ?

На оба эти вопроса сразу мы, очевидно, не можем ответить *да*. Но было бы и неразумно на один из них ответить *да*, а на другой — *нет*. Мы ощущаем в наших вопросах определенного рода симметрию — оба они, так сказать, об одном и том же. Поэтому скорее следовало бы ответить *нет* на оба вопроса.

Если немного порассуждать, то можно выяснить, что время  $\tilde{t}_1$  больше, чем  $t_1$ , а время  $\tilde{t}_2$  меньше, чем  $t_2$ .

Итак, подведем первые итоги нового взгляда на время.

Два физика изучали одни и те же события, только в разных лабораториях, разных системах отсчета, движущихся друг относительно друга. Они измеряли промежутки времени между этими событиями, а события состояли в испускании света и его приходе от передней и задней стен вагона. И вот оказалось, что сам промежуток зависит от того, в какой лаборатории эти события фиксируются. Это означает, что промежуток времени между двумя событиями есть величина относительная.

Да и само время оказывается относительным. Ведь что такое время, как не череда своих промежутков.

Нельзя просто сказать «сейчас такой-то час». К этому нужно добавить «в такой-то системе отсчета», чтобы высказывание приобрело смысл.



Открытие относительности времени вызвало настоящий переворот в физической науке. Оно означало коренную ломку самых фундаментальных, самых первичных и исходных представлений о мире, созданных всем предшествовавшим развитием науки и, прежде всего, классической механикой Галилея — Ньютона. Время перестало быть абсолютным — что же произошло тогда с классической механикой? Неужели крах после двух столетий торжества?

Нет, новейшая физика не отменила классическую механику. Очевидным образом обнаружилось, что механика Галилея и Ньютона не столь универсальна, как на то надеялись ее творцы, а за ними и все другие физики XVIII—XIX веков (и последние чаще всего даже в большей степени). Но вся классическая теория остается в силе, если рассматривать только такие движения, скорость которых много меньше скорости света. По сравнению с этими малыми скоростями скорость света столь велика, что фактически ее можно считать бесконечной. А при таком условии сводится на нет относительность одновременности (мы уже говорили об этом), а с ней и относительность самого времени вообще.

Новейшая теория указала границы и пределы применимости классических представлений: механике Галилея — Ньютона подвластны только относительно медленные движения. И в этих ясно осознаваемых границах классическая механика продолжает и до сих пор жить полнокровной жизнью, неизменно прибавляя все новые и новые успехи к и без того уже внушительному списку своих достижений.

Когда же нужно изучать быстрые движения или распространение электромагнитных волн, классической теории для этого уже явно недостаточно. Здесь требуется теория относительности, и чем ближе скорости движений к скорости света, тем заметнее и значительнее эффекты относительности, или, как говорят, релятивистские эффекты. В следующей главе мы расскажем о таких явлениях, где эти эффекты, и в первую очередь относительность времени, действуют в полную силу.

Классическая механика обрела свои рамки, нашла свое настоящее место в нашей системе знаний о физическом мире. Тем самым она получила и новое обоснование своим исходным предпосылкам. Она стала частным случаем новой, более общей теории, рамки которой много шире, а основания надежнее и глубже. Теория относительности включила в себя классическую механику в качестве своей не вполне точной, приближенной формы, достаточной для «работы» с относительно медленными движениями.

Вместе с тем — и это гораздо важнее — теория относительности произвела принципиальный пересмотр природы времени. Это было решительное преодоление догматизма и застоя в «принципиальных вещах». Это был огромный шаг вперед на пути к проникновению в самую сущность времени, которое стало теперь не только предметом описания, но и объектом прямого исследования — теоретического и экспериментального.

## ГЛАВА 6

### СОБСТВЕННОЕ ВРЕМЯ

Инерциальные лаборатории, которыми мы пользуемся в наших мысленных экспериментах, снабжены, как говорит Эйнштейн, «всеми мыслимыми физическими приборами». Из этих приборов самый важный для нас — часы, инструмент для измерения времени. С помощью часов мы отмеряем промежутки времени, фиксируем одновременность или неодновременность событий.

Относительность времени означает, очевидно, и относительность в самом ходе часов, в их ритме. В мире уже нет единого и всеобщего времени, которое заставляло бы все часы идти «в ногу» как по команде «раз-два, раз-два». Несколько совершенно одинаковых часов, никак не отличимых друг от друга, когда они стоят рядом в лаборатории, резко расходятся в своих показаниях, когда какие-то из них приходят в движение и летят относительно других со скоростью, приближающейся к скорости света.

Продолжая знакомство с различными свойствами относительного времени, мы выясним в этой главе, где одинаковые процессы идут быстрее — рядом с нами или в движущемся мимо нас вагоне поезда, в летящем самолете, на ракете. Мы узнаем о реальных, а не только мысленных экспериментах и наблюдениях, в которых изучается темп бегущего времени.

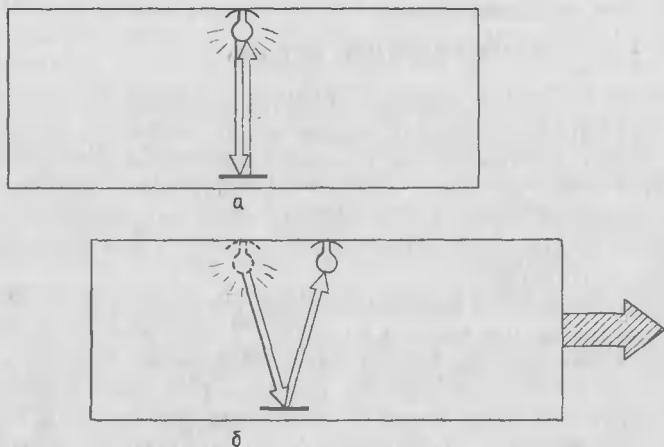
#### *Время здесь и время там*

Начнем с нового мысленного эксперимента, в котором, как и раньше, два физика ведут наблюдения в двух инерциальных лабораториях.

Пусть в вагоне «поездной» лаборатории имеются источник света, фонарик, который располагается на потолке, и прямо под ним на полу зеркало. Эксперимент состоит в том, что оба наших физика, каждый в своей лаборатории, будут следить за тем, как свет распространяется сверху вниз, от фонарика к зеркалу и обратно, от зеркала к фонарику.

Эксперимент проведен, и физик «поездной» лаборатории сообщает: «свет упал по вертикали на зеркало и, отразившись от него, прошел тот же путь в обратном направлении. Общий путь света равен удвоенной высоте вагона».

Иную картину наблюдал «полевой» физик: «Свет падал с потолка к полу по наклонной прямой и, отразившись от зеркала, проделал путь по другой наклонной прямой, так что



Мысленный эксперимент с источником света и зеркалом

в общей сложности свет проделал путь в виде латинской буквы V». Это и понятно. Ведь пока свет шел от потолка к полу, пол и зеркало вместе с ним переместились вперед по ходу поезда. Чтобы достичь зеркала, свет должен был двигаться по наклонной прямой. После отражения свет устремился обратно к фонарику на потолке, но за время движения света от потолка к полу и обратно потолок, а с ним и фонарик переместились вперед по ходу поезда, и, чтобы догнать фонарик, свет двигался по наклонной прямой. Итог: общий путь света больше удвоенной высоты вагона».

Сопоставим эти сообщения. По измерениям «полевой» лаборатории свет прошел явно большее расстояние, чем по измерениям «поездной». Вместе с тем мы знаем, что скорость света одинакова для обеих лабораторий. Значит, с точки зрения «полевой» лаборатории свет путешествовал дольше, чем с точки зрения «поездной».

Время между двумя событиями, измеренное из разных систем отсчета, оказывается, таким образом, различным. В той системе, где сами эти события произошли, время между собы-



Замедление времени



То же, но с учетом уменьшения длины вдоль направления движения — это тоже эффект теории относительности

ниями меньше, чем в другой системе, которая движется относительно нее и из которой наблюдают те же события.

Последние два предложения специально составлены так, чтобы не пользоваться названиями лабораторий — «поездной» и «полевой». Ведь мы хорошо понимаем, что движение относительно, и потому «полевая» лаборатория покоится только относительно поля, но движется относительно поезда. Если эксперимент с фонариком и зеркалом произвести в «полевой» лаборатории, то мы получим от наших физиков в точности те же сообщения, только теперь они поменяются ролями. О вертикальном пути света сообщит «полевой» физик, а о V-образном — «поездной».

Мы видим, что промежуток времени между событиями, происходящими «здесь у нас», всегда короче, чем промежуток времени между теми же событиями, когда они происходят «там у них».

Время событий, происходящих в данной инерциальной лаборатории, называется собственным временем, когда оно измеряется по часам той же лаборатории (системы отсчета).

Когда мы измеряем время между происходящими с нами самими и рядом с нами событиями, пользуясь нашими собственными часами, то видим на наших часах наше собственное время. Собственное время всегда короче всех других времен, которые измеряют по своим часам другие наблюдатели, глядя на происходящее с нами или у нас.

И здесь имеется, конечно, полная взаимность. Ведь другим, когда они наблюдают за нами, все, что с нами происходит, представляется замедленным. По их часам мы тратим больше, чем они, времени на те же действия. Они считают, что леденец у нас во рту тает медленнее, чем у них. Их собственный леденец уже растаял, а нас они видят еще с леденцом. Нам же, разумеется, медлительными кажутся «они» — те, кто проносится мимо нас в воображаемом поезде Эйнштейна или на ракете. И их леденец, как мы считаем, тает дольше.

### Быстрые пионы

К счастью, относительность времени незаметна в повседневной жизни, так как скорости всех относительных движений очень малы по сравнению со скоростью света. А иначе «весьма бы усложнился трезвый быт».

Относительность времени и все связанные с нею эффекты, бесспорно, существуют всегда, но при малых скоростях движений они совершенно неуловимы, ускользают от наших ощущений и даже от самых чувствительных приборов.

Другое дело — явления при больших скоростях, приближающихся к скорости света. Такие явления постоянно встречаются в физике элементарных частиц. Электроны, протоны, мюоны, пионы и другие частицы нередко рождаются очень быстрыми в тех или иных процессах в микромире. Их также специально ускоряют на установках, которые так и называются ускорителями. На самых больших ускорителях частицы разгоняются до больших скоростей, действительно приближающихся к скорости света. Тогда-то относительность времени оказывается не то что уловимой, а просто очень сильной.

Расскажем об одном из реальных экспериментов. Пионы (или, иначе, пи-мезоны), упомянутые выше среди других частиц бывают трех видов — положительные, отрицательные и нейтральные в соответствии с имеющимся у них электрическим зарядом. Все они неустойчивы, самопроизвольно распадаются и живут очень недолго. Среднее время жизни положительного пиона составляет 25 миллиардных долей секунды.

Мы называли время — так скажем же, в какой системе отсчета. Это среднее время жизни в системе, в которой пионы покоятся, то есть в их собственной системе отсчета.

Иногда вместо среднего времени жизни частиц говорят о времени полураспада; это время, за которое число распадающихся частиц уменьшается вдвое. Оно составляет приблизительно 69 % среднего времени жизни (0,69 — натуральный логарифм числа 2, взятый с точностью до первых двух цифр после запятой), для пионов это — 17 миллиардных долей секунды.

Большой коллектив распадающихся частиц представляет собой удобные часы: по числу частиц, распавшихся или выживших к данному моменту, можно измерять промежутки времени. Эти часы указывают время в собственной системе отсчета частиц. Если число положительных пионов уменьшилось вдвое, значит, по их собственным часам прошло 17 миллиардных долей секунды. Если частиц стало вчетверо меньше, значит, прошло 34 миллиардных секунды и так далее.

В реальном эксперименте пионы удастся разогнать до скорости, составляющей 90 % скорости света. И вот оказалось, что быстро движущиеся пионы живут дольше, чем неподвижные. По лабораторным часам, мимо которых проносились пионы, их среднее время жизни составило 57 миллиардных секунды. Это в два с лишним раза больше времени жизни покоящихся частиц. Соответственно измеренное по лабораторным часам время полураспада летящих пионов составило 39 миллиардных секунды.

Результат эксперимента со всей определенностью демонстрирует относительность времени, о которой говорит теория.

С нашей точки зрения, то есть по часам нашей лаборатории, быстро летящие пионы распадаются, «тают» медленнее, чем такие же частицы, покоящиеся в нашей лаборатории. Когда число летящих пионов стало вдвое меньше исходного, от покоящихся пионов осталось менее четверти их исходного числа.

Можно сказать, что с нашей точки зрения, по часам нашей лаборатории, все события *здесь у нас* происходят вдвое быстрее, чем *там у них* — у летящих пионов.

Чем больше скорость, с которой проносятся мимо нас частицы, тем медленнее они распадаются, тем дольше — для нас — живут. Если бы пионы удалось разогнать еще сильнее, скажем, до скорости, составляющей 99,9999 % скорости света, время жизни этих частиц, измеренное по лабораторным часам, возросло бы в сотни раз. Чтобы довести время их жизни до нескольких секунд, надо сообщить частицам скорость, которая отличалась бы от скорости света на  $10^{-14}$  процента. А чтобы жить — для нас — вечно, их скорость относительно нас должна совпасть со скоростью света. Но последнее невозможно: со скоростью света не могут двигаться никакие частицы, масса которых отлична от нуля\*).

### Красное, зеленое, голубое

Возможно, многие слышали шутку про находчивого водителя, который проскочил перекресток на красный свет светофора, а когда его остановили, стал оправдываться тем, что красный свет показался ему зеленым — физика это допускает, если вы движетесь навстречу источнику света.

— Но при какой скорости? — спросили его.

— Легко прикинуть — что-то около 75 % скорости света.

— В таком случае вы будете оштрафованы за превышение скорости.

Красный свет действительно покажется зеленым или даже голубым, если мчаться навстречу источнику света с достаточно большой скоростью или если сам источник света очень быстро движется к нам навстречу. Более полувека назад астроном из Пулковской обсерватории А. А. Белопольский воспользовался этим физическим эффектом, чтобы измерять скорости звезд.

---

\*) Напомним, что частиц с нулевой массой известно не так уж много. Это, собственно, только фотон — квант света. Нулевую массу должен также иметь, согласно теории, гравитон — гипотетическая частица, квант тяготения, предсказываемый общей теорией относительности (см. главу 13); возможно, нулевую массу имеют нейтрино: сами эти частицы надежно регистрируются, но точно измерить их массу пока не удается.



Если звезда летит на нас, ее свет кажется нам более голубым, если от нас — более красным.

Физики знали об этом эффекте изменения цвета при движении источника еще раньше, с середины прошлого века. Цвет света зависит от длины волны электромагнитных колебаний. Чем больше длина волны видимого света, тем ближе цвет к красному краю спектра; чем меньше она, тем цвет ближе к голубому краю спектра. Длина волны в испускаемом источнике свете не совпадает с длиной волны в принимаемом свете, если имеется относительное движение источника и приемника: когда источник и приемник сближаются, длина волны в принимаемом свете оказывается короче, чем в испущенном; если же они удаляются друг от друга, длина волны, наоборот, возрастает.

Наглядно это можно представить так: когда источник и приемник сближаются, волна как бы сжимается, а когда они удаляются друг от друга, волна растягивается.

Такая зависимость цвета и длины волны от движения источника света называется эффектом Доплера, по имени открывшего его австрийского физика.

Эффект Доплера распространяется на любые волновые, периодические процессы. Он влияет и на звук — на высоту тона, которая зависит от длины волны звуковых колебаний. Каждый мог заметить это по гудку поезда — его тон кажется более высоким, когда поезд приближается к нам, и более низким, когда он удаляется. Высокому тону соответствуют более короткие длины волн звуковых колебаний, а низкому, наоборот, более длинные\*).

Говоря об эффекте Доплера, можно пользоваться вместо длины волны света (или звука) ее периодом. Период — это длина волны, деленная на скорость света (или звука), то есть время, за которое свет (звук) пробегает расстояние, равное длине волны. Тогда эффект Доплера означает возрастание периода волны при удалении источника от приемника и уменьшение его в противоположном случае.

Особая роль света в физике делает эффект Доплера для света очень важным фактом, который с новой стороны открывает нам свойство относительности времени.

---

\*) Нужно заметить, что, в отличие от света, звук может распространяться только в какой-либо среде, но не в пустоте. Среда служит и системой отсчета: если относительно нее движется источник звука, а приемник покоится, то изменяется частота принимаемого звука. Если же источник покоится, а приемник движется относительно среды, то изменяется скорость распространения звука. Для света существенно лишь относительное движение источника и приемника.

## Эффект Доплера

Эффект Доплера возникает по простой причине — из-за конечности скорости распространения света. Его наглядное объяснение, которое мы сейчас дадим, целиком на этом основывается и не требует каких-либо других физических соображений.

Представим себе, что после многолетнего полета возвращается космический аппарат и он летит к Земле, прямо по направлению к нам. Пусть этот аппарат посылает нам один за другим два световых сигнала. сначала один, а через год после первого второй. Допустим, что скорость аппарата составляет 0,2 скорости света. Тогда за время между посылкой сигналов аппарат приблизится к нам на 0,2 светового года. (Световой год — расстояние, которое свет проходит за 1 год.) Это значит, что путь второго сигнала от аппарата до нас на 0,2 светового года короче, чем путь первого сигнала, и он будет принят на земле через 0,8 светового года после первого.

Мы видим, что промежуток времени между приемом двух сигналов короче, чем между их испусканием. Таков главный вывод нашего рассуждения. Разумеется, мы брали какие-то определенные скорости и расстояния только для примера. Наш общий вывод от конкретных цифр не зависит. Промежуток времени между приемом сигналов всегда короче, чем между их испусканием, если источник и приемник сближаются.

Точно так же можно рассмотреть и пример, в котором источник и приемник удаляются друг от друга. Нетрудно догадаться, что в этом случае результат окажется обратным: промежуток времени между приемом двух сигналов будет длиннее, чем между их испусканием.

А отсюда всего один шаг до объяснения эффекта Доплера. Действительно, наше общее заключение о промежутках времени относится к промежуткам любой длительности. И можно взять в качестве исходного промежутка какой угодно интервал времени. Например, мы можем взять время между двумя максимальными значениями электрического поля, следующими одно за другим в электромагнитной волне, то есть промежуток времени, равный периоду волны. Те же два соседних максимума будут зарегистрированы приемником света, и промежуток времени между их приходом даст нам период принятой волны. В этом случае одним из двух сигналов будет служить первый максимум в волне, а другим — второй, следующий сразу за ним.

Ясно, что в таком случае период принятой волны не будет совпадать с периодом испущенной волны, если расстояние меж-

ду источником и приемником света изменяется со временем. Когда они сближаются, период принятой волны короче исходного периода испущенной волны. Когда же источник и приемник удаляются друг от друга, период принятой волны будет, наоборот, длиннее.

Но в этом и состоит эффект Доплера. И все дело здесь именно в конечности скорости распространения света. Стоит только представить себе, что свет имеет бесконечную скорость, и эффект исчезнет — период света не будет зависеть от движения источника и приемника. Тот «выигрыш» во времени, который мы получали в примере с космическим аппаратом, летящим к Земле, сразу, очевидно, теряется: свету все равно, с какого расстояния лететь; он мгновенно, без затраты времени достиг бы нас, будь его скорость бесконечной.

### «Световые» часы

Свет — это распространяющиеся в пространстве периодические колебания электрического и магнитного полей. Этим колебательным процессом можно воспользоваться для измерения времени, и тогда световая волна будет служить нам часами. Эти часы указывают нам на относительность времени.

Действительно, источником света может быть, например, атом, испускающий свет строго определенной длины волны или периода. Но излученный им свет, дойдя до нас, имеет уже не тот период (и не ту длину волны), если источник и приемник движутся друг относительно друга. Сравнивая этот период с периодом излучения точно такого же атома, находящегося в нашей лаборатории, у приемника света, мы найдем, что период принятого света не совпадает с периодом излучения атома в нашей собственной системе отсчета. При этом период принятого света может быть и больше, и меньше периода излучения атома в зависимости от того, удаляется ли от нас или приближается к нам источник. Выходит, что «тик-так» «световых» часов в источнике может доходить до нас «звучащим» и реже, и чаще, чем в нашей лаборатории. Значит, и воспринимаемый нами темп течения времени на движущемся источнике будет отличным от нашего — либо ниже, либо выше нашего собственного.

Но сравним этот вывод с тем, что показал нам первый мысленный эксперимент этой главы. Тогда мы установили, что все действия в движущейся относительно нас лаборатории представляются нам всегда замедленными. Здесь же возможно и замедление, и ускорение. В чем дело?

Ответ, даваемый теорией относительности, таков. В действительности речь идет о двух разных эффектах относительности времени. Эффект, допускающий, так сказать, оба знака — и замедление, и ускорение, возникает лишь тогда, когда изменяется расстояние между источником и приемником, то есть когда они либо удаляются друг от друга, либо сближаются друг с другом. Он определяется величиной и направлением — к нам или от нас — скорости вдоль луча зрения, то есть прямой, которая соединяет нас с источником.

Однако относительная скорость двух лабораторий не обязательно направлена строго вдоль луча зрения. У нее может быть не только продольная, но и поперечная (перпендикулярная) лучу зрения составляющая. Когда источник света перемещается вместе с движущейся лабораторией перпендикулярно к лучу зрения, эффект, связанный с продольной скоростью, просто отсутствует. Остается в этом случае только эффект замедления. Как показывает теория, он не зависит от направления скорости и определяется лишь ее величиной. Поэтому-то эффект и имеет всегда один знак — только замедление.

Этот эффект тоже называют эффектом Доплера, но с добавлением *поперечный*, чтобы отличить его от эффекта, связанного с продольной скоростью, который иногда для ясности называют *продольным* эффектом Доплера \*).

### Разбегание галактик

Самое впечатляющее проявление эффекта Доплера — это знаменитое красное смещение в излучении далеких галактик. О нем стало известно в начале нашего века, когда американский астроном В. М. Слайфер обнаружил, что определенные линии излучения в спектрах некоторых далеких галактик находятся не на своих «нормальных» местах на шкале электромагнитных волн, а сдвинуты по этой шкале в красную сторону.

В 1929 году появилась обстоятельная работа другого американского астронома, Э. Хаббла, в которой был представлен гораздо более обширный материал спектральных наблюдений галактик. Из данных Хаббла следовало, что красное смещение

---

\*) Но поперечный эффект Доплера присутствует и тогда, когда имеется одно лишь продольное движение. В этом случае он накладывается на продольный эффект — усиливает замедление или ослабляет ускорение. Поперечный эффект слабее продольного. Математически он определяется квадратом отношения скорости движения к скорости света: продольный же эффект зависит от первой степени этого отношения. А квадрат величины, меньшей единицы, меньше самой величины.

в спектрах галактик тем сильнее, чем дальше от нас они находятся.

Объяснение этого явления, ставшее теперь уже общепринятым, основывается на космологической теории А. А. Фридмана. Согласно этой теории, созданной еще до открытий Хаббла, галактики и их группы и скопления не покоятся друг относительно друга, а разбегаются друг от друга. Наблюдая за этим движением из нашей Галактики, мы видим, что все наше окружение в мире галактик удаляется от нас. Теория предсказывает, что чем дальше от нас находится какая-то галактика, тем больше скорость ее убегания.

Это предсказание теории и было подтверждено наблюдениями Э. Хаббла.

Действительно, если источник света удаляется от нас, то цвет видимого нами света неизбежно должен измениться. Вследствие эффекта Доплера длина волны и период света, регистрируемые нашими приборами, окажутся больше, чем в собственной системе отсчета источника. Линии излучения любого атома должны представляться нам сдвинутыми к красному концу спектра по сравнению с их «лабораторным» положением, то есть с тем положением на шкале электромагнитных волн, которое установлено по часам, находящимся вместе с атомом в одной лаборатории, в одной системе отсчета.

Так было открыто самое грандиозное по масштабу явление природы — общее разбегание галактик. Объем, занимаемый данными галактиками, постоянно расширяется из-за их взаимного разбегания. Поэтому говорят о расширении Вселенной, понимая под этим увеличение со временем вообще всего объема наблюдаемой области мира.

Наиболее далекие из известных сейчас небесных тел принадлежат к классу звездных систем с очень яркими центральными областями. Это мощнейшие излучатели света во Вселенной. Из центральной области размером с Солнечную систему испускается столько света, сколько дают сотни и тысячи галактик, подобных нашей Галактике с ее ста миллиардами звезд. Эти источники получили название квазаров. Наиболее удаленные из них очерчивают границу видимой Вселенной. Красное смещение в их свете столь велико, что длины волн и периоды увеличены три, четыре и даже в пять раз.

О разбегании галактик, о пространстве и времени Вселенной мы будем еще говорить в главе 10.

## Сверхсветовые скорости?

Не так давно произошло одно астрономическое открытие, которое поначалу необычайно всех изумило. Удивительные открытия в астрономии следуют в последние двадцать лет одно за другим\*). Но это... Судите сами — открыты движения со сверхсветовыми скоростями.

Вот точные факты астрономических наблюдений.

В 1974 году в самом центре довольно далекой галактики, которая значится под номером 120 в 3-м Кембриджском каталоге, произошла яркая вспышка. Возникла светящаяся область, которая прямо, можно сказать, на глазах увеличивалась в размерах. Светящееся пятно разрасталось, и за полгода его радиус увеличился практически от нуля до 3-х световых лет. С какой же скоростью расширялось пятно?

Один световой год — это путь, который свет проходит за один год; но чтобы за полгода пройти расстояние в три световых года, требуется скорость, в шесть раз превышающая скорость света. Выходит, что с такой скоростью и расширялось пятно.

Другой пример. Одна из галактик в созвездии Ящерицы давно уже привлекла внимание астрономов своим необычным поведением. Наблюдая ее центральную область в декабре 1980 года, астрономы нашли там два ярких пятнышка, расстояние между которыми составляло 3 световых года. Было замечено, что эти светящиеся пятна удаляются друг от друга, и в июне 1981 года расстояние между ними составило уже 5,5 световых лет. За полгода расстояние увеличилось на 2,5 световых года. Следовательно, скорость удаления одного пятна от другого составляет пять скоростей света.

Вот явление, наблюдаемое в центральной области знаменитого квазара, который в 3-м Кембриджском каталоге значится под номером 273. Это был первый открытый квазар. С его обнаружения в 1963 году и начался настоящий каскад замечательных астрономических открытий 60—80-х годов.

Из центра этого квазара выбрасывается светящаяся струя. Ее яркий конец за четыре года удалился от центра на расстояние 20 световых лет. Выходит, он двигался со скоростью, в пять раз превышающей скорость света.

Есть и другие примеры такого рода сверхсветовых движений. Нужно сказать, что почти все они открыты по наблюде-

---

\*) Наши дни с полным основанием называют золотым веком астрономии и астрофизики; о новейших открытиях в мире звезд и галактик можно прочитать в книгах: Чернин А. Д. Звезды и физика. — М.: Наука, 1984. — Вып. 38. — (Б-чка «Квант»); Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. — М.: Наука, 1984.

ниям не в видимом свете, а в радиолучах, с помощью самых крупных современных радиотелескопов. Рекорд (на 1987 год) — скорость, превышающая скорость света в 21 раз!

Теория относительности учит нас, что никакое тело не может двигаться со скоростью, превосходящей скорость света. Как же понимать тогда свехсветовые скорости в ядрах галактик и квазаров?

После первого удивления и даже растерянности астрономы все же догадались, как объяснить это явление. Теория относительности, как оказалось, нисколько не была поколеблена. На-

против, найденное объяснение целиком на ней основывается.

Вот самый простой пример такого объяснения.

Пусть тело движется навстречу нам, — но не строго по лучу зрения, а под небольшим углом к нему. Пусть объект испустил два сигнала по направлению к нам, сначала один, а затем, через определенный промежуток времени, другой. За время между испусканием сигналов тело прошло путь  $OA$  на нашем рисунке. Видимое нами перемещение меньше — оно, очевидно, представляет собой проекцию этого пути на то, что астрономы называют *картинной плоскостью*. Это плоскость, перпендикулярная к лучу зрения. Проекция составляет отрезок  $OB$ .

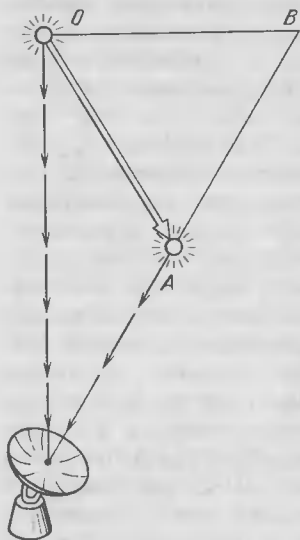
Как астрономы получили свои оценки скорости? Они делили

Видимые свехсветовые скорости — возможное объяснение

видимое перемещение (отрезок  $OB$ ) на время между приемом первого и второго сигналов. Они брали именно время между приемом, а не между испусканием двух сигналов.

Но это разные промежутки времени. Когда источник движется на нас, промежутки времени, как мы знаем, сокращаются — в соответствии с эффектом Доплера. Промежуток между приемом сигналов меньше промежутка между их испусканием. И если скорость источника близка к скорости света, разница между ними может оказаться сколь угодно большой.

При вычислении видимой скорости перемещения мы, так сказать, проигрываем в пути (проекция  $OB$  меньше пути  $OA$ ), но зато можем очень сильно выиграть во времени. Из-за этого



и получается пугающе большое отношение видимого пути к времени между приемом двух сигналов, посланных в начале и в конце этого пути. Это отношение и считали скоростью движения.

Такая «видимая» скорость вполне может оказаться больше скорости света. Но она не совпадает с реальной скоростью движения тела. Реальная скорость равна отношению пройденного пути (*OA* на нашем рисунке) к промежутку времени между испусканием — а не приемом! — сигналов. Как показывают расчеты, она должна быть довольно большой, близкой к скорости света, но при этом никак ее не превышать.

Видимые сверхсветовые скорости — это иллюзия. Она возникает из-за относительности времени. Нельзя вычислять скорость делением пути, пройденного «там», на промежуток времени, измеренный «здесь». Стоило астрономам забыть об этом, и они натолкнулись на парадокс.

К счастью, загадка оказалась не такой уж трудной. Правильный ответ был вскоре найден. Теория относительности и, прежде всего, идея относительности времени в очередной раз восторжествовали.

## ГЛАВА 7

### МИРОВАЯ ЛИНИЯ

Герман Минковский (1864—1909), немецкий математик и физик, много сделавший для разработки математического аппарата теории относительности, разъясняя в 1908 году новые взгляды на пространство и время, заявил: «Отныне понятия пространства самого по себе и времени самого по себе осуждены на отмирание и превращение в бледные тени, и только своего рода объединение этих двух понятий сохранит независимую реальность».

Мы обсудим сейчас это решительное утверждение, постараемся разобраться, что на самом деле скрывается за «своего рода объединением» и «независимой реальностью», о которых говорит один из основоположников новейшей физики.

Далее мы коснемся таких важных тем как причинная связь явлений во времени и абсолютный характер различия между прошлым и будущим.

$$4 = 3 + 1$$

Чтобы изучить какое-то событие в мире физических явлений, нужно прежде всего знать, где и когда оно произошло. Ответить на вопрос *где?* — значит указать место проис-



шествия; ответить на вопрос *когда?* — указать соответствующий момент времени.

Указать место в пространстве мы можем с помощью координат. Каждой точке на Земле отвечают, как известно, две географические координаты — широта и долгота. Это два числа. Например, 60 градусов северной широты, 40 градусов восточной долготы. По этим двум числам легко найти место на карте или на глобусе.

Если летит самолет, то для указания его положения в пространстве нужно задать уже не два, а три числа: географические координаты точки, под которой самолет пролетает, плюс еще высота его полета.

Неважно даже, какими координатами мы будем пользоваться, географическими или какими-либо иными, все равно в общем случае для определения места события нужно всегда знать три числа.

Четвертое число, которое к ним нужно добавить, — это момент времени. Момент задается одним числом.

Все это означает, что пространство трехмерно, а время одномерно. Мир физических событий, каждое из которых определяется четырьмя числами, является из-за этого четырехмерным:  $3 + 1 = 4$ .

«Когда нематематик слышит о «четырёхмерном», его охватывает мистическое чувство, подобное чувству, возбужденному театральными приведениями», — говорит в одной из своих статей Эйнштейн и добавляет, что «тем не менее нет более банального утверждения», чем утверждение о четырехмерности мира. Четырехмерность не означает ничего иного, кроме того, что мир физических явлений «складывается из отдельных событий, каждое из которых описывается четырьмя числами».

Четырехмерность не была изобретением теории относительности. Мир классической физики тоже, очевидно, четырехмерен. Поэтому четырехмерность не нужно было открывать или вновь вводить.

### Время — движение — пространство

Уже классическая физика «объединила» время и пространство: она связала их через движение. Действительно, движение тела можно изобразить на диаграмме путь — время. Допустим, что по горизонтальной оси откладываются моменты времени, а по вертикальной — расстояние от данного тела до исходного пункта, с которого оно начинает свое движение. В простейшем случае тело движется равномерно по пря-

мой. Пусть его скорость составляет 2 метра в секунду. Тогда через секунду после начала движения тело продвинется на расстояние 2 метра от начала, через 2 секунды — на 4 метра, через 3 секунды — на 6 метров и т. д. Таков ряд событий в истории движения тела, за которым мы наблюдаем, событий, разделенных интервалом времени 1 секунда. На нашей диаграмме эти события изобразятся точками. А вся полная история движения тела будет очевидно, представляться совокупностью всех точек на прямой, проходящей через наш ряд событий-точек. Линия, образуемая всеми событиями-точками в истории тела, называется его *мировой линией*.

В простом примере равномерного прямолинейного движения мировая линия представляется прямой на двумерной диаграмме путь — время. Не слишком трудно представить себе, что будет, если тело совершает более сложное движение и может перемещаться не только по прямой, а по плоскости. Тогда каждое из событий в его истории будет описываться тремя числами — двумя пространственными координатами, соответствующими положению данной точки на плоскости, и третьим числом — моментом времени, когда тело находилось в этой точке.

Следующий шаг состоит в том, чтобы допустить движение тела во всем пространстве. Тогда каждой точке пространства придется сопоставить три числа, три пространственных координаты, а событие будет характеризоваться этими тремя числами плюс четвертое число — момент времени, когда тело находилось в данной точке. И это даст нам уже четырехмерное пространство-время.

Четырехмерное пространство-время нельзя изобразить в виде простой диаграммы, его нелегко представить себе наглядно. Но многие принципиальные черты событий в четырехмерном физическом мире можно успешно изучать и на двумерной диаграмме путь — время.

Пространство и время выступают на этой диаграмме совершенно равноправно, как равноправны оси координат — вертикальная и горизонтальная. В таком графическом представлении время и пространство очень похожи друг на друга. Никакой существенной разницы между ними как будто не видно.

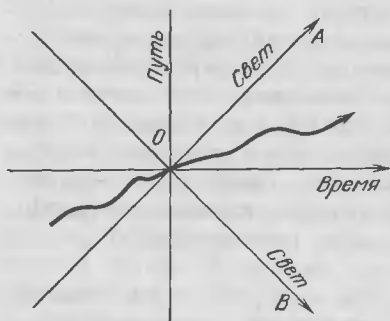
Можно сказать, что движение, поскольку оно происходит сразу и в пространстве, и во времени, связывает и даже как бы уравнивает между собой пространство и время. Посредством движения время и пространство приобретают (или проявляют) общие черты и в результате становятся физическими качествами одной природы.

Это соображение распространяется, очевидно, и на общий случай, когда движение не одномерно, а трехмерно и нужно принимать во внимание все три координаты пространства.

## События и лучи света

Как выглядит мировая линия света? Очень просто: свет распространяется с постоянной скоростью, значит, его мировая линия на диаграмме путь — время будет прямой.

Допустим, луч света выходит из начала координат, из точки, которой отвечает начало отсчета расстояния и начало



Мировая линия на диаграмме путь — время

отсчета времени в некоторой выбранной нами системе отсчета. Если луч распространяется в сторону положительных значений пространственной координаты, вверх по вертикальной оси, то его мировая линия прочертит прямую  $OA$  на нашем рисунке. Если он идет в противоположном направлении, получится прямая  $OB$ . Пусть имеются два луча, которые одновременно вышли из начала координат и пошли в противоположных направлениях.

В пространстве их пути будут просто двумя параллельными линиями: лучи идут вдоль одной прямой в противоположных направлениях. А на диаграмме путь — время их мировые линии будут представляться прямыми, наклонными друг к другу: они исходят из одной точки, но под углом друг к другу.

Треугольник  $AOB$ , очерченный на рис. 16 мировыми линиями света, выделяется как особая область в пространстве-времени. Поскольку скорости всех физических тел меньше скорости света, для тел, вышедших вместе с лучами, одновременно с ними, из начала координат, все события их истории целиком уместятся внутри этой области  $AOB$ . Там проходят все возможные мировые линии этих тел. Тела могут двигаться в пространстве вдоль той же прямой, что и свет, но не обязательно равномерно. Поэтому их мировые линии могут быть и прямыми, если движение равномерно, и кривыми, если оно неравномерно. Но как бы тела ни двигались — равномерно или неравномерно, их мировые линии никогда не пересекут мировые линии света.

Представим себе теперь, что лучи не выходят из начала координат, а приходят в него. Тогда один луч может приближаться со стороны положительных значений пространственной координаты (то есть сверху на нашем рисунке), а другой — со стороны отрицательных (снизу). Первый изобразится мировой линией  $BO$ , а второй —  $AO$ . Луч, пришедший снизу, может далее пойти вверх, минуя начало координат, — это даст ту же мировую линию  $OA$ . А луч, пришедший сверху, продолжит свой путь вниз, по мировой линии  $OB$ .

Теперь на диаграмме изображена вся история лучей, до начального момента и после него. Их мировые линии разделяют нашу диаграмму на три области. Первая из них — это уже знакомая нам область  $AOB$ . Вторая — новый треугольник  $BOA$ . А третья — это все остальное, что лежит вне этих двух треугольников.

Как и первая область, вторая представляет собой область всех событий в жизни любых тел, движущихся со скоростями, меньшими скорости света. Только теперь это — движения, происходившие не после, а до начального момента. Такие движения могут привести эти тела в начало координат.

Третья область сама состоит, как видно по рисунку, из четырех частей. Те две ее части, что лежат справа от вертикальной оси, вне треугольника  $AOB$ , недоступны ни свету, ни любым телам, вышедшим из начала координат. Они в эти зоны никогда не попадут. Другие две части, лежащие слева от вертикальной оси, вне треугольника  $BOA$ , — это зоны движений, для которых, наоборот, недоступно начало координат. Ни свет, ни любые тела, если они начинают свой путь из любой точки этих зон, никогда не попадут в начало координат.

Итак, двумерная диаграмма, такая простая на вид, имеет, как оказывается, весьма глубокий смысл. Она обнаруживает, что пространство-время обладает своим особым строением — оно складывается из трех различных областей, каждая из которых имеет свои собственные свойства и черты. Такая структура пространства-времени отражает в первую очередь тот важнейший физический факт, что в природе существует предельная максимальная скорость движений — скорость света, которая постоянна и конечна.

А что было бы в отсутствие этого предела, при допущении бесконечности скорости света? Тогда мировые линии света на нашей диаграмме «разогнулись» бы и совпали с вертикальной осью. Все пространство-время при этом перестроилось бы: оно разделилось бы не на три, а только на две области. Вся область правее вертикальной оси в этом случае становится доступной для движений, исходящих из начала координат. Точно

так же, начало координат становится доступным для движений, начинающихся в любой точке слева от вертикальной оси. В пространстве-времени исчезают «запрещенные зоны».

Допущение бесконечных скоростей тел или света означает, как нам уже приходилось видеть, переход к представлениям классической механики. При этом исчезает относительность одновременности и вообще относительность времени. Итак, изучение двумерной диаграммы для пространства-времени открывает нам новую грань реального физического мира, ускользающую от старой физики. Реальное пространство-время устроено совсем не так, как это представлялось в классической механике. Оно состоит в действительности не из двух, а из трех физических различных областей.

### Прошлое, настоящее, будущее

Продолжая исследование двумерного пространства-времени на нашей диаграмме, давайте считать, что начало координат означает для нас *здесь и сейчас* в данной системе отсчета. Тогда все, что на диаграмме слева от вертикальной оси, — это прошлое, то, что было до настоящего момента, до *сейчас*. А все, что справа от вертикальной оси, — это будущее, то, что настанет *после*.

Пусть мы включили *сейчас* часы, а сами остаемся на месте. В пространстве мы не перемещаемся, путь равен нулю. Но и когда мы стоим на месте, с нами будут происходить события, которые образуют последовательность точек — нашу мировую линию. Эта линия совпадает, очевидно, с горизонтальной осью (ведь путь все время равен нулю) и продолжается вправо от начала координат. Мы остаемся на месте, но время течет, и потому мы движемся в пространстве-времени.

Если бы мы не стояли на месте, а перемещались в пространстве, то при любом способе движения наша мировая линия оставалась бы внутри треугольника *АОВ*. Любые события, которые с нами произойдут, лежат именно в этой области. Что бы с нами ни случилось, в ней найдется подходящая точка-событие, которая укажет место и время происшествя.

Коротко говоря, область правого треугольника — это для нас область достижимого будущего.

Но что происходило с нами *прежде*, до момента *сейчас*? Начала координат на нашей диаграмме мы можем достичь в том и только том случае, если все точки-события нашей предыстории лежат в области левого треугольника на этой диаграмме. Все, что уже произошло с нами, изображается определенными точками-событиями из этого треугольни-

ка. Область левого треугольника — это область нашего прошлого?

А что же такое для нас третья область, то есть область вне обоих треугольников? Там лежат события, которые наша мировая линия никогда не заденет. Это события, которые не случились с нами в прошлом и наверняка не случатся в будущем. Если вспомнить пространство-время классической механики, то там таких невозможных событий в принципе не существует.

Время, его течение увлекает нас за собой: мы можем стоять в пространстве, но остановиться и стоять во времени невозможно. Наша мировая линия неуклонно продолжается, что бы мы ни делали. Она продолжается гладко и непрерывно — у нее нет разрывов и она не делает петель. Мы не можем перепрыгнуть в будущее, минуя то, что отделяет нас от него. И мы не можем дважды побывать на одной вертикали, то есть в одном и том же моменте времени.

Мировая линия не может из будущего повернуть назад в прошлое или настоящее. Что было, то уже произошло и больше не вернется. События прошлого и будущего выстроены вдоль мировой линии раз и навсегда, и их порядок, их следование одного за другим никак не изменить, не перевернуть, не перепутать. И это с любой точки зрения: в любой системе отсчета ни одно событие не выпадет из нашей мировой линии, и все они сохраняют неизменной свою очередность.

Порядок следования событий вдоль нашей мировой линии не относителен, он абсолютен. Абсолютно поэтому и разделение событий нашей истории на прошлое и будущее. И то же относится вообще к любому физическому телу.

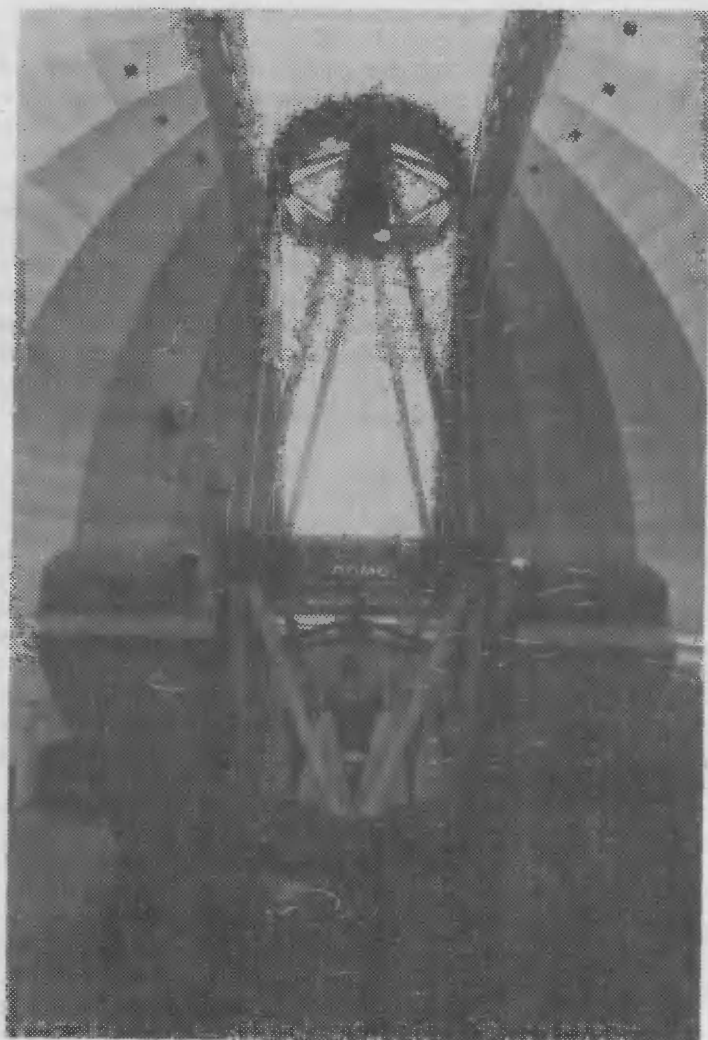
### Машина времени

Можем ли мы видеть прошлое? Способны ли мы проникнуть в будущее?

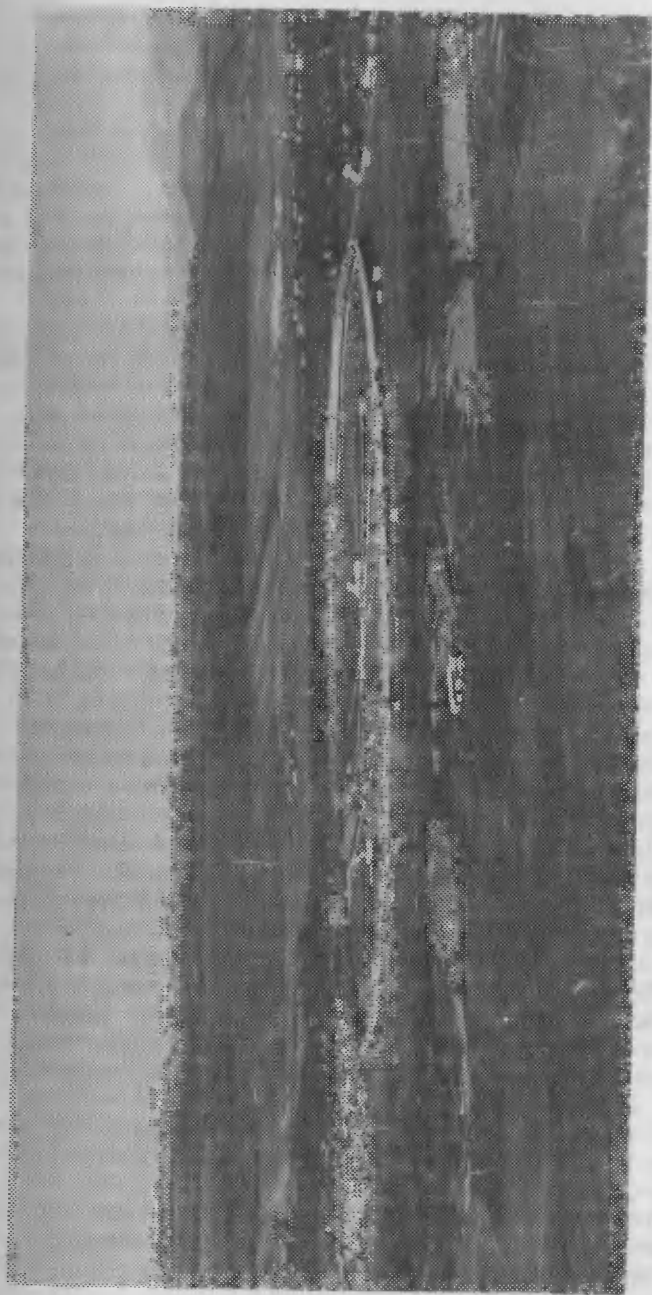
Недолго думая, кто-то, возможно, на оба эти вопроса сразу ответил бы «нет».

Но не будем торопиться и в поисках ответа снова обратимся к диаграмме, представляющей нам пространство-время с тремя его различными областями.

Только не стоит, пожалуй, ограничиваться и дальше лишь одним пространственным измерением. Если включить в нашу картину все три пространственных измерения, в ней, собственно, ничего особенно не изменится. Но только вместо треугольников нужно будет говорить о конусах в четырехмерном пространстве-времени. Все прошедшее лежит в конусе прошлого, все грядущее — в конусе будущего. И есть область вне этих ко-



Самый большой в мире оптический телескоп с диаметром зеркала 6 м  
(Зеленчук, Северный Кавказ)



Радиотелескоп с диаметром колыа 6 м (Зеленчук, Северный Кавказ)



нусов — это то, что с нами прежде не случалось и никогда после не случится.

Конус, очерченный мировыми линиями света, называют световым конусом.

Поверхность конуса прошлого для нас сейчас особенно интересна. На ней лежит все то, что мы в данный момент можем видеть. Действительно, видеть — значит принимать глазом световые лучи. Но лучи распространяются с конечной скоростью. Значит, мы можем видеть только то, что уже произошло.

Можно сказать и сильнее: если мы что-то и видим, то только прошлое.

Вот ответ на первый из наших вопросов.

Но что доступно нашему зрению? Зрительные образы создаются у нас теми лучами, которые достигли нас именно сейчас. И несут они нам то, что, так сказать, собрали по дороге, проходя через точки-события, расположившиеся вдоль мировых линий этих лучей. Эти точки события могли, конечно, и сами испустить свет. В любом случае все эти точки и в самом деле образуют поверхность конуса прошлого.

Те лучи, которые достигли нас в данный момент, прошли разный путь. Одни шли всего мгновение, а другие путешествовали по дороге к нам очень долго. Это может быть луч от настольной лампы на нашем столе и луч от звезды на ночном небе за окном. Первый шел к глазу всего несколько миллиардных долей секунды, а другой многие годы.

Лучи скользили вдоль поверхности конуса прошлого и принесли нам разные картины прошлого. Картину настольной лампы, какой она была миг назад, и картину звезды, какой она была многие годы назад.

За время распространения света от настольной лампы с этим источником света вряд ли что-нибудь успеет произойти. А за время, затраченное светом от звезды на свое путешествие, она сама могла, например, уже потухнуть.

Мы видим разное прошлое. Картину Солнца мы видим с запаздыванием на восемь минут. А далекие квазары мы наблюдаем такими, какими они были почти десять миллиардов лет назад. Тогда не было еще ни Земли, ни Солнца — возраст Солнечной системы «всего» около пяти миллиардов лет.

Чем дальше путешествовал свет, чем дальше от нас находится его источник, тем дальше вглубь времен проникаем мы взором.

Современный телескоп, позволяющий видеть далекое прошлое нашего мира, — это и есть настоящая машина времени.

А как же с путешествием в будущее?

Если мы куда-то и движемся, то только в будущее. Да мы и не можем не двигаться. Поток времени неудержим, и он увлекает за собой неизбежно все и вся. Мы можем проникнуть в будущее: именно это, только это мы постоянно и делаем.

### Причина и следствие

Видеть в лучах света мы можем только поверхность конуса прошлого. Но знать мы можем обо всех событиях внутри этого конуса.

Часть из этих событий случилась с нами самими, на том отрезке нашей мировой линии, который лежит в конусе прошлого. О многом могут рассказать нам другие. Ничего недоступного знанию в конусе прошлого нет.

Для нас закрыта только та область прошлого, которая лежит вне этого конуса. О событиях, которые там разыгрываются, мы в данный момент не можем знать ничего. Мы и сами там не были, не был там никто другой, с кем мы сейчас и здесь могли бы говорить, и даже лучи света оттуда не приходят.

Можно сказать, что имеется непроницаемый барьер, который заслоняет от нас область прошлого вне конуса, ограниченного светом. Это то, что в физике называют горизонтом событий. Это горизонт всякого знания о прошлом.

Классическая механика с ее бесконечными скоростями и абсолютным временем такого ограничения не знала. Она предполагала, что мир можно видеть весь и сразу — в один и тот же момент единого мирового времени. Для нее не существовали барьеры видимости — такие, которые были бы принципиально непроницаемы. Если имеется достаточно яркий источник света, то его можно увидеть с какого угодно расстояния — так думали до создания теории относительности.

Теория относительности говорит, что источник можно увидеть, если он загорелся достаточно рано, чтобы его свет успел еще нас достичь, застать нас там, где мы сейчас находимся.

То, что лежит вне конуса прошлого, нам недоступно. Но и мы сами недоступны для этой внешней области: никакое воздействие, никакие сигналы оттуда не могут нас достичь. Там лежат события, которые никак не способны повлиять на нас сейчас.

А что же на нас влияет?

На нас способны влиять все события внутри конуса прошлого и на его поверхности. Если на нас что-то воздействует, то только те события, которые произошли в конусе прошлого.

Если нас достигают сигналы, то только из этой области. И если с нами что-то здесь и сейчас происходит, то причина этого лежит именно там.

Конус прошлого — это множество событий, которые в принципе могли бы оказать воздействие на нас здесь и сейчас.

Можно сказать, что конус прошлого — это вместе с тем и конус всех причин, следствия которых мы наблюдаем здесь и сейчас.

На нас воздействует лишь прошлое из светового конуса. Но можем ли мы сами в ответ на это воздействовать на прошлое? Нет, наша собственная мировая линия в прошлое никогда не вернется. И мы не можем посылать в прошлое какие-либо сигналы. В прошлом — и в конусе, и вне его — нет таких событий, которые мы могли бы хоть как-то изменить.

Но мы можем активно воздействовать на будущее. Будущее — это область событий, еще не происшедших, на которые в принципе может влиять то, что мы делаем здесь и сейчас.

### Сегодня и вчера

Среди переводов с английского у С. Я. Маршака имеется стихотворение под названием «По теории относительности»:

«Сегодня в полдень пущена ракета.  
Она летит куда быстрее свега  
И долетит до цели в шесть утра  
Вчера.»

Возможны ли такие чудеса? Если и в самом деле допустить, что скорость ракеты больше скорости света, то это вполне возможная вещь.

Полет ракеты нужно рассматривать в двух системах отсчета. Пусть одна система отсчета — это поверхность Земли, на которой находится стартовая площадка для запуска ракеты. Представим себе, хоть это и невообразимо, что относительно этой системы отсчета ракета летит со скоростью, в пять раз превышающей скорость света, и пусть она достигает цели в полночь, то есть через 12 часов полета. В этой системе отсчета все более или менее в порядке: цель достигается после запуска.

Рассмотрим полет ракеты из другой системы отсчета, которая движется с большей скоростью в том же направлении, что и ракета. Если скорость системы отсчета действительно доста-

точно велика (но, конечно, не превосходит скорости света), то порядок событий с точки зрения наблюдателя в этой системе окажется обращенным. Сначала ракета достигает цели, а затем взлетает со стартовой площадки. Цель достигается в шесть утра, то есть 30 часов тому назад. С помощью формул специальной теории относительности можно подсчитать, что так будет в системе отсчета, которая движется относительно Земли со скоростью  $3/5$  скорости света.

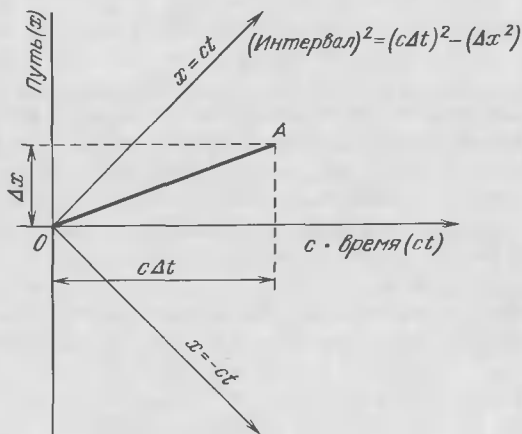
Какова мораль этого немыслимого эксперимента? Мировая линия сверхсветовой ракеты лежит вне светового конуса с вершиной в момент и в точке запуска. Два события — запуск и попадание в цель — разделены в пространстве на слишком большое расстояние. Расстояние между событиями в пространстве больше, чем разделяющий их промежуток времени, умноженный на скорость света. Такие события не могут, очевидно, лежать на мировой линии реальных тел, ибо все тела движутся со скоростью, не превосходящей скорость света. Столь сильно разделенными в пространстве могут быть лишь события, происшедшие не с одним, а с разными телами. И вот для таких событий порядок их следования во времени оказывается относительным. То событие, которое в одной системе отсчета случилось позже, в другой системе отсчета может оказаться, наоборот, более ранним. Иными словами, понятия раньше и позже лишены в этом случае абсолютного смысла и являются относительными. Ясно, что при этом невозможна причинная связь: ведь то, что в одной системе отсчета было следствием, может в другой оказаться причиной.

Временной порядок следования событий необратим, когда эти события находятся в пределах светового конуса друг для друга. И именно для таких событий имеет смысл сама принципиальная необратимость времени, то есть невозможность переставить местами прошлое и будущее.

### Интервал

На диаграмме путь — время два любых события можно соединить прямой и тогда образуется прямоугольный треугольник, гипотенузой которого служит эта прямая, а катетами — расстояние между событиями в пространстве и промежуток времени между ними. Чтобы придать обоим катетам одинаковую размерность, будем считать, что по горизонтальной оси откладывается не просто время, а время, умноженное на скорость света. На рисунке один катет обозначен символом  $\Delta x$ , а другой —  $c \Delta t$ . События обозначены буквами  $O$  и  $A$ , и первое из них взято в качестве начала координат.

По теореме Пифагора квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Это хорошо известно из геометрии. Но здесь у нас не просто геометрия, а геометрия пространства-времени. И гипотенуза нашего треугольника должна вычисляться по другому правилу. Нужно возвести в квадрат катеты, как и



К понятию интервала

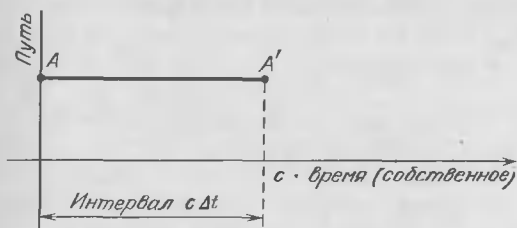
в обычной геометрии. Но квадрат гипотенузы равен не сумме, а разности квадратов катетов. Именно: из квадрата  $(c\Delta t)^2$  нужно вычесть квадрат  $(\Delta x)^2$ . Корень квадратный из этой разности называется интервалом между событиями.

Самое замечательное то, что определенный таким образом интервал не зависит от системы отсчета. В какой бы системе отсчета ни вычислять интервал между двумя данными событиями, он окажется всегда одним и тем же. Это похоже на обычную геометрию: расстояние между точками всегда одно и то же, в какой системе координат его ни вычислять. Можно пользоваться прямоугольной системой, можно выбрать косоугольную, полярную и вообще какую угодно систему координат — результат всегда один и тот же.

Но почему интервал, расстояние между событиями в пространстве-времени вычисляется по такому необычному правилу? Ведь, казалось бы, треугольник, нарисованный на нашей диаграмме путь—время, — это вполне обычная фигура планиметрии, то есть евклидовой геометрии на плоскости. В том-то, однако, и дело, что это именно диаграмма, а отнюдь не само пространство-время. Для простоты рисунка мы опустили две пространственные координаты. Это не принципиально. Важнее всего то, что одна пространственная координата в комбинации

со временем составляют вместе все же не плоскость (с ее двумерной евклидовой геометрией), а пространство-время. Геометрию пространства-времени называют псевдоевклидовой. (*Псевдос* по-гречески значит *ложь*.) Такая «лжеевклидова» геометрия и отличается от евклидовой тем, что в теореме Пифагора нужно брать не сумму квадратов катетов, а их разность.

Если система отсчета связана с данным телом, то в этой собственной системе отсчета тело покоится, его положение в пространстве не меняется. Поэтому мировая линия тела изображается на диаграмме путь—время прямой, параллельной оси времени. А это время — собственное время тела (можно, как выше, считать, что по горизонтальной оси откладывается не



Интервал в собственной системе отсчета

время, а время, умноженное на скорость света; это, конечно, сути дела не меняет). Отсюда ясно, что если взять какие-то два события  $A$  и  $A'$  на мировой линии тела (см. рисунок), то в этом случае разделяющий их отрезок собственного времени равен просто интервалу между событиями, деленному на скорость света.

Далее, так как интервал одинаков во всех системах отсчета, то это соображение дает нам рецепт вычисления собственного времени тела, когда оно наблюдается из другой системы отсчета, движущейся относительно него. Для этого нужно найти интервал между событиями по известному нам правилу («лжетеореме» Пифагора), а затем разделить его на скорость света. Это и будет собственное время.

Отсюда, между прочим, лишний раз видно, что собственное время всегда короче любого промежутка времени, измеренного по другим, не собственным часам: ведь интервал, а с ним и собственное время выражаются именно через разность.

Мы рисуем диаграмму путь—время, но не можем изобразить на листе бумаги псевдоевклидово пространство-время. Конечно, все дело в том, что сам лист бумаги — это евклидова плоскость. Отличие евклидовой плоскости от двумерного псевдоевклидова пространства-времени особенно хорошо видно,

когда проводятся мировые линии света. На диаграмме путь — время — это лучи, составленные из точек-событий. Но в пространстве-времени интервал между любыми двумя событиями на мировой линии света равен нулю: так получается из нашего определения интервала. Мировые линии света имеют, можно сказать, нулевую длину в пространстве-времени. Поэтому равен нулю и интервал собственного времени между любыми событиями в истории луча света.

Конечно, никакие реальные часы нельзя заставить двигаться вместе со светом, со скоростью света. Но если часами считать сам свет, то эти часы не идут, они стоят — на них всегда один и тот же час собственного времени. Таковы свойства света: у него особые взаимоотношения с временем.

### Бег времени

Знакомясь с событиями и мировыми линиями в пространстве-времени, мы многое узнали о том, что в действительности означает объединение времени и пространства в новую «независимую реальность», о которой говорил Минковский. В новой физике, познающей эту реальность, — немало старого, заимствованного из классической физики. Так, естественно, и должно быть. Но имеются в ней и совершенно новые, особые черты.

В первую очередь это — существование трех областей пространства-времени: мира событий нашего прошлого, мира событий нашего будущего и третьей области, где содержатся все остальные события, которые не имеют никакого отношения ни к нашему прошлому, ни к нашему будущему. В этом еще раз проявляется относительность времени, — точнее, невозможность существования абсолютного времени, которое было бы единым для всех систем отсчета, для всех наблюдателей, находящихся в различных лабораториях, и которое делило бы все события в мире только на общее для всех прошлое и общее для всех будущее (тогда в пространстве-времени были бы, как мы говорили, лишь две области).

В этой структуре, содержащей три области, время выступает на равных правах с пространством. Но все же оно играет свою собственную роль, и полного «поглощения» времени четырехмерием не происходит: отличие времени от пространства имеет неустранимый внутренний характер. Время не сводится просто к еще одной, дополнительной размерности пространства. В каком-то отношении — например, в том, что касается двух осей на нашей диаграмме путь — время, — различие между временем и пространством может маскироваться или действи-

тельно исчезать и не проявляться. Но уже и самые простые особенности мировых линий в пространстве-времени очевидным образом обнаруживают такие своеобразные качества времени, которые нельзя ни скрыть, ни устранить.

Действительно, мы можем находиться в одном и том же месте в какой-то инерциальной системе координат, и тогда наша мировая линия будет горизонталью на диаграмме путь — время. Но возможна ли вертикаль в качестве мировой линии? Нет, никогда, ни в какой системе отсчета мы не можем застыть во времени, остаться в одном его мгновении. И все дело, конечно, в том, что время не стоит на месте, а с ним и все в мире движется от прошлого к будущему — необратимо, безостановочно и только в одном направлении.

Но откуда у времени этот неудержимый бег с его неизменной направленностью? Это один из тех вопросов в физике, которые до сих пор остаются открытыми. Вопрос этот не решается теорией относительности, ни специальной, ни общей. Теория относительности — и это отчетливо звучит в высказывании Минковского — с большой глубиной и полнотой объясняет, описывает и анализирует те свойства времени, которые объединяют его с пространством, роднят с ним. Неудержимость и направленность — особенное, неповторимое свойство времени.

В предпоследней главе книги мы снова вернемся к этому и познакомимся с некоторыми гипотезами, стремящимися объяснить бег времени и его направление.

## ГЛАВА 8

### ВРЕМЯ И ТЯГОТЕНИЕ

Специальная теория относительности дала начало новой физике времени. Дальнейшие шаги к пониманию природы времени связаны с общей теорией относительности, которая углубила и расширила идею относительности времени.

Общая теория относительности родилась из размышлений над самыми простыми, но и самыми «принципиальными вещами», если вспомнить это выражение Эйнштейна. Почему время, решительно влияя на все явления природы, на все физические тела, само не испытывает в ответ никакого обратного влияния этих явлений и тел? Может ли время вообще существовать само по себе без всякой связи с физическими процессами в мире?

А если обратиться к пространству: неужели это только неизменное вместилище всех тел природы, пустая арена для разыгрывающихся на ней явлений? Существует ли оно вообще,



если оно пусто, то есть если в нем ничего нет и ничего не происходит?

Специальная теория относительности решила много вопросов, но на эти она бессильна ответить. Здесь нужны были какие-то новые идеи, имеющие столь же глубокий смысл, как принцип относительности и постулат о постоянстве скорости света. Важнейшей из этих новых идей стало представление об особой роли тяготения в физическом мире. Рассуждения о свете привели к созданию специальной теории относительности, а идея тяготения — к общей теории относительности, в которой время лишилось своей странной неподатливости и — вместе с пространством — оказалось зависящим от физических процессов в мире, от распределения и движения в нем физических тел. «Передатчиком» их обратного влияния на время и пространство служит тяготение.

### Всемирное тяготение

Новейшая физика и здесь отталкивается от классической физики, спорит с ней и вместе с тем основывается на ней. Ньютон был первым, кто разгадал всемирную роль тяготения. Он понял, что земное тяготение, наше притяжение к Земле и падение созревшего яблока представляют собой явления той же природы, что и движение Луны вокруг Земли и обращение планет вокруг Солнца.

Все тела природы притягиваются друг к другу. Сила притяжения, действующая между двумя телами, прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Таков закон всемирного тяготения Ньютона. (Вместо слова «тяготение» говорят еще и «гравитация» — оно означает просто то же самое.)

В физике известны и другие примеры сил притяжения. Два разноименных электрических заряда притягиваются друг к другу с силой, которая, как мы знаем, прямо пропорциональна произведению зарядов и — как сила тяготения — обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Это действительно похоже на закон Ньютона. Однако электрические силы могут быть не только силами притяжения, но и силами отталкивания, когда заряды одноименны. Эти силы и вовсе отсутствуют, если у тел нет зарядов.

Силы же тяготения, гравитация — это всегда силы притяжения. И для их действия не требуется никаких особых зарядов, всякое тело имеет массу, и потому оно должно испытывать действие этих сил и создавать их. Можно сказать, что масса тела это и есть его неотъемлемый «гравитационный заряд».

Гравитационное взаимодействие — одно из четырех фундаментальных взаимодействий, к которым сводится все разнообразие взаимных физических воздействий всех тел природы. Три других взаимодействия — это всем знакомое электромагнитное взаимодействие, а также сильное взаимодействие (скрепляющее, например, частицы в атомных ядрах) и слабое взаимодействие (ответственное, например, за радиоактивный распад ядер). Два последних взаимодействия проявляются только в микромире — мире атомных ядер и элементарных частиц. Электромагнетизм известен нам по многим явлениям природы, по разнообразным его применениям в технике, науке, в повседневной жизни. Действие электромагнитных сил проявляется и в мире элементарных частиц; оно заметно в мире звезд и галактик. Свет, столь многое давший теории относительности, — это тоже, конечно, проявление электромагнетизма. Но там, где нет зарядов, электрических и магнитных полей, — там нет и электромагнетизма.

Из четырех взаимодействий природы одна только гравитация обладает свойством неустранимости и всеобщей универсальности. Она действует всюду и везде — от микромира до всей Вселенной. Недаром со времен Ньютона тяготение называют всемирным. Но вся важность этого факта была впервые осознана только Эйнштейном.

Эйнштейн придавал исключительное значение и другому свойству тяготения, тоже давно уже известному. Силы тяготения сообщают разным телам одинаковое ускорение. Все тела в данной точке пространства падают в поле тяготения с одинаковым ускорением. Этот замечательный факт открыл еще Галилей. Согласно легенде, он наблюдал падение различных тел с наклонной Пизанской башни и установил, что все они, независимо от массы, размера, формы и вещества, из которого сделаны, достигали земли за одинаковое время. Историки науки не находят, кажется, подтверждения тому, что это было именно на Пизанской башне; но несомненно, что Галилей первым обратил внимание на эту особенность тяготения и исследовал ее в экспериментах со свойственным ему стремлением к точному знанию, полученному из опыта.

Позднее движение тел в поле тяготения изучал Ньютон с помощью тонких экспериментов, в которых он использовал маятники. В своих «Началах» он писал: «Но другими уже давно наблюдалось, что (с поправкой на слабое сопротивление воздуха) все тела спускаются на одинаковое расстояние за одинаковые промежутки времени, и с помощью маятников это свойство промежутков времени может быть установлено с большой точностью».

Ньютон исследовал «это свойство промежутков времени» в связи с той ролью, которую играет масса тел в их динамике.

### Принцип эквивалентности

Роль массы в физике двояка, как двояк и способ ее измерения. С одной стороны, массу тела можно определить с помощью измерения ускорения, испытываемого телом под действием какой-то известной силы. По второму закону Ньютона масса есть отношение силы к ускорению. Определяемая таким путем физическая характеристика тела служит, как говорят, мерой его инертности и ее называют инертной массой.

Но с другой стороны, массу можно определить и другим способом — путем измерения силы, с которой она притягивается к другому телу, например к Земле. В этом измерении проявляется «гравитационный заряд» тела, и потому определенную таким путем массу называют тяжелой, или гравитационной, массой.

Чтобы все тела падали с одинаковым ускорением, достаточно, очевидно, чтобы для каждого из них инертная масса равнялась гравитационной.

Две роли массы — как меры инертности и как «гравитационного заряда» — и изучал Ньютон в своих экспериментах с маятниками. По его данным, инертная и гравитационная массы совпадают с точностью до десятых долей процента. За все времена от Галилея и Ньютона до наших дней ни при каких обстоятельствах не было замечено никакого различия между инертной и гравитационной массой какого-либо тела.

Изобретательные опыты, поставленные в конце XIX века венгерским физиком Р. Этвешем, дали совпадение масс с точностью до миллионной доли процента. В измерениях, проведенных недавно в Московском университете В. Б. Брагинским и его сотрудниками, точность возросла еще в 10 тысяч раз.

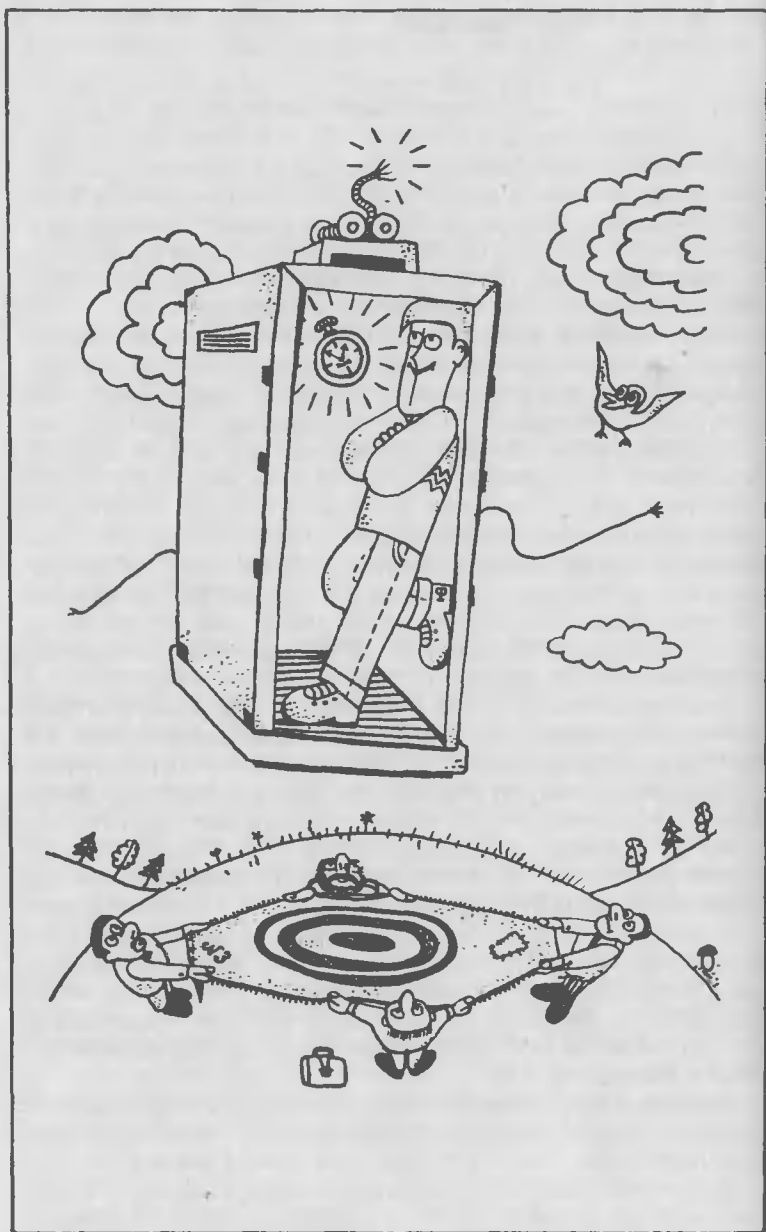
Равенство инертной и гравитационной масс возведено Эйнштейном в ранг фундаментального принципа физики. Совпадение, эквивалентность этих масс составляет содержание эйнштейновского принципа эквивалентности. По существу это тот же результат опыта Галилея, который с точки зрения классической физики был просто одним из фактов — в некотором смысле даже случайным; во всяком случае он не играл никакой роли в том, что составляло идейную основу механики Галилея — Ньютона. Теперь же ему придается исключительно важное и самое общее значение — он находит место среди «принципиальных вещей» новейшей физики, становится рядом с принципом относительности.

## Лифт Эйнштейна

Излюбленный прием Эйнштейна в его теоретических поисках — мысленный эксперимент. Вслед за Эйнштейном мы тоже наблюдали (см. главы 5, 6) за различными опытами физиков в двух лабораториях, одна из которых находилась в вагоне воображаемого поезда, несущегося с огромной скоростью. Теперь же одну из наших лабораторий поместим в кабину лифта. Представим себе, следуя Эйнштейну, «огромный лифт в башне небоскреба... Внезапно канат, поддерживающий лифт, обрывается, и лифт свободно падает по направлению к земле». В этой свободно падающей лаборатории проводятся опыты. Физик «вынимает из своего кармана платок и часы и выпускает их из рук». Они падают — относительно небоскреба — вместе с кабиной лифта. Но по отношению к этой кабине вещи остаются там же, где они были, когда их выпустили из рук. Физик в кабине лифта видит, что часы и платок спокойно висят между полом и потолком лифта, покоятся относительно него. Физик делает из этого заключение, что на них не действуют никакие силы. Об отсутствии сил мы вместе с нашим физиком судим на том основании, что расстояния между телами, если они в начальный момент покоились, не изменяются со временем. Разумеется, это возможно только потому, что — согласно опыту Галилея и принципу эквивалентности — все тела в поле тяготения движутся с одинаковым ускорением. Движение лифта и всех тел в нем является в одинаковой степени ускоренным относительно небоскреба и потому-то они покоятся друг относительно друга. Тела в свободно падающем лифте не испытывают никаких сил, в том числе и силы притяжения к Земле. Они невесомы. В свободном падении тяготения нет. Оно обнаруживает себя только тогда, когда мы ему сопротивляемся.

Если прибавить к нашему воображаемому эксперименту немного подробностей, то можно сказать, что даже и не глядя на какие-то тела наш физик почувствует, что тяготение исчезло. Ведь и он сам окажется в невесомости. Он будет невесом, как невесомы и из-за этого неподвижны относительно кабины его часы и платок.

Невесомость — и притом не воображаемая, а реальная — имеется, как всем известно, в кабине спутника, обращающегося по орбите вокруг Земли. Спутник тоже, можно сказать, свободно падает, подчиняясь без сопротивления притяжению Земли. Движение по отвесной прямой в падающем лифте и движение по стационарной круговой орбите — это два примера свободного движения в поле тяготения. Еще один очевидный пример —



В свободно падающем лифте

полет подброшенного вверх мяча — он сначала движется вверх, а затем вниз, но на всем своем пути он осуществляет свободное движение.

В свободно падающей лаборатории все тела либо покоятся, либо, если их подтолкнуть, движутся равномерно и прямолинейно относительно лаборатории. Значит, такая лаборатория представляет собой инерциальную систему отсчета — в ней справедливы законы классической механики и специальной теории относительности.

Правда, все это до тех пор, пока движущиеся тела не столкнутся со стенками лаборатории и пока сама она не столкнется с землей. Такая оговорка не слишком принципиальна, но нужно все же учитывать, что инерциальность осуществляется в данном случае в ограниченном объеме и в течение ограниченного времени.

А теперь другой мысленный эксперимент. Пусть имеется кабина лифта вдали от всяких тяготеющих масс. Можно считать, что никаких сил нет и кабина представляет собой инерциальную систему отсчета. И вот, как говорит Эйнштейн, «кто-то извне привязал к лифту канат и тянет его с постоянной силой» вверх. Лифт придет в движение и будет двигаться с постоянным ускорением в направлении действия силы. При этом все тела в лифте тоже приходят, очевидно, в движение. Если какое-то тело покоилось в середине лифта, то оно начинает двигаться вниз, к полу лифта, так как пол движется теперь вверх по направлению к этому телу. Тело движется с ускорением, равным по величине и противоположным по направлению ускорению, испытываемому лифтом. Пусть для определенности ускорение равно ускорению свободного падения на поверхности Земли ( $9,8 \text{ м/с}^2$ ). Поскольку ускорение это постоянно, все происходит так, как если бы тело испытывало действие силы тяжести, направленной вниз, к полу лифта. Силу тяжести испытывает и сам физик — его прижимает к полу кабины точно так же, как это было бы в земном поле тяготения.

Выходит, что, заставив лифт двигаться ускоренно, мы создали в нем искусственное тяготение. И если наш физик не выйдет из своей кабины наружу, он никогда не сможет отличить это искусственное тяготение от естественного. Он не узнает, что происходит: то ли кабина покоится и в ней действует сила тяжести, то ли тяготения нет, но кабина не покоится, а движется вверх с ускорением. Эти две возможности неразличимы для нашего физика, они для него эквивалентны.

Итак, из двух наших мысленных экспериментов мы установили, что, во-первых, тяготение можно уничтожить, если свободно двигаться в поле тяжести; и, во-вторых, тяготение

можно создать, если вызвать извне ускоренное движение. Ускорение и тяготение неразличимы, они выступают перед нами равноправно и оказываются, так сказать, взаимозаменяемыми. Но это означает, по существу, что они представляют собой явления одной природы.

Вот к какому сильному выводу приводит простое, казалось бы, развитие идей Галилея и Ньютона. Оно дает разгадку природы тяготения.

### Тяготение и свет

Из эквивалентности ускорения и тяготения вытекают далеко идущие следствия, которые и составляют, по существу, содержание общей теории относительности. Примем принцип эквивалентности и продедаем еще один мысленный эксперимент. Пусть имеется лаборатория — лифт вдали от каких бы то ни было тел, в которой силы тяготения и любые другие силы отсутствуют. Эксперимент состоит в следующем. Будем посылать световые сигналы с пола лаборатории и принимать, регистрировать их на потолке с помощью какого-либо устройства — приемника света. В момент испускания сигнала приведем лифт извне в ускоренное движение снизу вверх. Это означает, что свету придется догонять приемник, который вместе с потолком лифта начнет набирать скорость благодаря приложенному к лифту ускорению. Когда свет достигнет приемника, тот будет иметь уже вполне определенную скорость. Эта скорость равна произведению ускорения на время распространения света от пола до потолка.

Но тогда должен действовать эффект Доплера, о котором мы говорили в главе 6. Раз свет догонял удаляющийся приемник, значит, период и длина волны зарегистрированного света должны быть больше, чем период и длина волны, которые свет имел в момент выхода из источника. Свет испытывает красное смещение — таков результат нашего опыта.

Представим себе, что в этом мысленном эксперименте лифт двигался вверх с ускорением, равным земному ускорению свободного падения, так что в лифте имитировалось земное тяготение. Тогда ясно, что в лаборатории, покоящейся на Земле, подобный эксперимент приведет — согласно принципу эквивалентности — к тому же результату: свет, распространяясь снизу вверх, испытает красное смещение. Никакого движения приемника в этом случае нет, пол и потолок покоятся относительно друг друга, отсутствует относительное движение источника и приемника, а красное смещение все же есть. В этом случае говорят о гравитационном красном смещении.

## Замедление времени

Для физики безразлично, было ли тяготение естественным или искусственным, все физические явления происходят в обоих рассмотренных нами случаях одинаково. Но проще всего было найти интересующий нас эффект в опыте с искусственной гравитацией: мы смогли применить там сведения, с которыми уже познакомились ранее по совсем другим примерам.

Чему же научил нас этот опыт? Мы узнали, что колебания в световой волне изменяют свой ритм при ее распространении в поле тяготения. Если, как в нашем опыте, свет движется против направления силы тяжести, ритм колебаний замедляется. Сила тяготения оказывает на него замедляющее действие. Это означает, что если мы сделаем часы, «работающие» на таких колебаниях, то их тиканье будет реже в поле тяготения. Но часы указывают нам время и потому приходится заключить, что сила тяготения замедляет сам темп протекания времени.

Если с потолка лаборатории посмотреть на часы, стоящие на ее полу, то увидим, что эти часы отстают от наших собственных часов на потолке. Внизу время течет медленнее, чем наверху. Из двух братьев-близнецов, живущих в одном доме на разных этажах, быстрее растет тот, который ближе к крыше. Разница, конечно, очень небольшая, но важно, что она есть и даже может быть измерена.

Об измерении замедления времени мы расскажем чуть позже, а сейчас снова вернемся ненадолго к только что проделанному мысленному эксперименту.

Легко представить себе, что будет, если свет посылать не с пола на потолок, а, наоборот, с потолка на пол. Должен измениться знак эффекта: свет, распространяющийся по направлению силы тяготения, должен становиться более голубым. Вместо увеличения периода света и замедления ритма его колебаний получим уменьшение периода и ускорение ритма. Если снизу смотреть на часы, находящиеся на потолке, то они будут уходить вперед по сравнению с нашими собственными часами на полу. Но это снова означает, что внизу часы идут медленнее, чем наверху.

Замедление времени в поле тяготения — одно из замечательных следствий общей теории относительности. Мы узнали о нем из мысленных экспериментов, в которых для простоты считали силу тяготения и ускорение постоянными по высоте. Это вполне приемлемое приближение для условий на поверхности Земли, когда высота, на которой находятся часы, считается малой — по сравнению с радиусом Земли. Но в действи-





Замедление времени в поле тяготения

тельности эффект остается в силе и тогда, когда высота не мала и нужно учитывать, что сила тяготения не постоянна, а убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. И в этом случае часы идут тем медленнее, чем ближе они к поверхности тела. Всякий раз из двух часов, находящихся на разных расстояниях от тяготеющего тела, быстрее идут те, которые дальше от этого тела. На очень далекие часы тяготение уже не оказывает практически никакого действия, и там они, а с ними и время, достигают самого высокого своего ритма.

### Измерение

Прямой лабораторный, а не мысленный эксперимент с замедлением времени в поле тяготения провели в 1960 году физики Гарвардского университета (США). В их эксперименте электромагнитная волна (это был не видимый свет, а гамма-излучение, что, конечно, не меняет сути дела) проходила расстояние 22 метра по высоте с потолка к полу в башне физической лаборатории. Предсказываемое теорией замедление времени очень мало — всего приблизительно на  $3 \cdot 10^{-13}$  процента. Чтобы представить себе малость этой цифры\*), скажем, что при таком замедлении времени за год набирается примерно одна стомиллионная доля секунды — лишняя у верхних часов. Или иначе: чтобы набралась разность хода часов в 1 секунду, нужно ждать примерно сто миллионов лет.

В эксперименте нужно было зафиксировать очень малый сдвиг длины волны излучения, сдвиг, который и оценивается величиной  $3 \cdot 10^{-13}$  процента. И тем не менее такой сдвиг длины волны, а с ним и эффект замедления времени, оказался измеренным. Это было сделано с помощью специальных сверхточных приборов (игравших роль часов), основанных на так называемом эффекте Мёссбауэра — явлении испускания твердыми телами гамма-излучения необычайно строго фиксированной длины волны.

Эксперимент обнаружил эффект гравитационного красного смещения, или замедления времени, в поле тяготения. Со всей экспериментальной точностью\*\*) подтвердилась и его численная величина, предсказываемая теорией.

Это было одно из самых тонких и искусных измерений в современной экспериментальной физике.

---

\*) Она получается так: нужно взять разность потенциалов поля тяготения на пути, пройденном светом, и разделить на квадрат скорости света и затем перейти к процентам, умножив это отношение на 100.

\*\*) Возможная погрешность не превышала десяти процентов от измеряемой величины.

Позднее, в 1976 году, эксперимент повторили — с гораздо более высокой точностью — физики Смитсоновского института (США). У них свет проходил 160 километров по высоте — аппаратура была вынесена на эту высоту ракетой. Для такой высоты, или, точнее, для такого перепада высот между источником и приемником, замедление времени в семь с лишним тысяч раз больше, чем в гарвардском эксперименте, что точно соответствует отношению высот.

### Астрономический эксперимент

Самая первая попытка обнаружить эффект гравитационного замедления времени была сделана еще в 20-е годы — не в лаборатории, а по астрономическим наблюдениям. Свет, двигаясь к нам от Солнца или какой-либо звезды, распространяется, очевидно, против силы тяготения, создаваемой Солнцем или этой звездой, и потому должен испытывать гравитационное красное смещение, указывающее на то, что время вблизи Солнца или звезды течет медленнее.

Для света Солнца эффект приблизительно в миллиард раз сильнее, чем в лабораторном эксперименте гарвардских физиков. И сам по себе он был бы вполне измерим, если бы не побочные неблагоприятные обстоятельства — например, движение газа в солнечной атмосфере, которые маскируют гравитационное красное смещение.

В последние годы гравитационное красное смещение искали в свете самых плотных из известных сейчас звезд — белых карликов и нейтронных звезд. В ряде успешных попыток эффект был обнаружен, и снова его величина оказалась наилучшим образом согласующейся с тем, что предсказывает общая теория относительности.

Интересные космические эксперименты проделаны недавно с помощью радиолокации. Представим себе, что мы посылаем импульс радиоизлучения на планету, когда она находится за Солнцем и, так сказать, выглядывает из-за него. Луч радиоволн пройдет вблизи края солнечного диска, достигнет поверхности планеты, а затем отразится от нее и вернется на Землю, где его приход зарегистрируют. Можно измерить время путешествия сигнала туда и обратно.

Тяготение Солнца влияет на темп протекания времени, замедляет его вблизи себя. Поэтому путешествие радиосигнала займет в этом случае больше времени, чем тогда, когда на его пути — при том же пройденном расстоянии — нет никакого тела, создающего тяготение. Задержка сигнала при его прохождении вблизи Солнца составляет около 0,0002 с.

Эксперименты такого рода проводились неоднократно, сигналы посылались на планеты Меркурий и Венеру. Использовались также и космические аппараты, запущенные на орбиту вокруг Солнца и снабженные специальными отражающими устройствами, ретрансляторами. Во всех случаях предсказание общей теории относительности, касающееся замедления времени в поле тяготения, подтверждалось с очень хорошей точностью — до 1–2 процентов от измеряемой величины\*).

### Черные дыры: время остановилось

Одно из самых фантастических предсказаний общей теории относительности — полная остановка времени в очень сильном поле тяготения.

Мы уже говорили о том, что замедление времени тем больше, чем сильнее тяготение. Замедление времени проявляется в гравитационном красном смещении света. И это смещение тоже, естественно, тем ощутимее, чем сильнее тяготение. Период принимаемого света увеличивается при распространении против силы тяготения, увеличивается и его длина волны, а частота света, обратно пропорциональная периоду и длине волны, соответственно убывает. Общая теория относительности утверждает, что при определенных условиях период и длина волны принимаемого света могут устремиться к бесконечности, а его частота — к нулю.

Со светом, испускаемым Солнцем, это могло бы случиться, если бы наше светило вдруг сжалось и превратилось в шар с радиусом всего 3 километра или еще меньше\*\*). Из-за такого сжатия сила тяготения на поверхности, откуда и исходит свет, возрастет настолько, что гравитационное красное смещение окажется действительно бесконечным.

Скажем сразу, что с Солнцем этого никогда на самом деле не произойдет. В конце своего существования, через 15–20 миллиардов лет, оно испытает, вероятно, множество превращений; его центральная область может значительно сжаться, но все же не так сильно.

Однако другие звезды, массы которых в три и более раз превышает массу Солнца\*\*\*), в конце своей жизни и вправду испытают скорее всего быстрое катастрофическое сжатие под действием своего собственного тяготения. Это приведет их

---

\*) Подробнее об экспериментальной проверке общей теории относительности см. книгу: Брагинский В. Б., Полнарев А. Г. Удивительная гравитация. — М.: Наука, 1985. — Вып. 39. — (Б-чка «Квант»).

\*\*) Радиус Солнца равен 700 тысяч километров.

\*\*\*) Масса Солнца равна  $2 \cdot 10^{30}$  килограммов.

к состоянию черной дыры. Черная дыра — физическое тело, создающее столь сильное тяготение, что красное смещение для света, испускаемого вблизи него, способно обратиться в бесконечность.

Черные дыры возникают в результате неудержимого сжатия вещества под действием его собственного тяготения. Чтобы возникла черная дыра, тело должно сжаться до радиуса, не превосходящего отношения массы тела к массе Солнца, умноженного на 3 километра. Это критическое значение радиуса называется гравитационным радиусом тела.

Физики и астрономы совершенно уверены, что черные дыры существуют в природе. Это мнение основывается на их доверии к общей теории относительности, следствия которой всегда подтверждались в разнообразных экспериментах и наблюдениях. Но черных дыр до сих пор не удалось обнаружить. Трудности астрономических поисков связаны с самой природой этих необычных объектов. Ведь бесконечное красное смещение, из-за которого обращается в нуль частота принимаемого света, делает их просто невидимыми. Они не светят и потому в полном смысле слова являются черными. Лишь по ряду косвенных признаков можно надеяться заметить черную дыру, например, в двойной системе, в которой ее партнером была бы обычная звезда. Из наблюдений движения видимой звезды в общем поле тяготения такой пары можно было бы оценить массу невидимой звезды, и если эта величина превысит массу Солнца в три и более раз (см. выше), можно будет утверждать, что мы нашли черную дыру.

Сейчас имеется несколько хорошо изученных двойных систем, в которых масса невидимого партнера оценивается в 5 или даже 8 масс Солнца. Скорее всего, это и есть черные дыры. Но астрономические оценки масс почти всегда содержат некоторую неопределенность, так что впредь до дальнейших уточнений этих оценок астрономы предпочитают называть такие объекты лишь кандидатами в черные дыры.

Нейтронные звезды, о которых мы уже не раз упоминали, не так уж далеки от состояния черной дыры. Это сильно сжавшиеся тела, размеры которых всего лишь в несколько раз превышают их гравитационные радиусы. Это почти черные дыры. Измерения, когда они удаются, определенно указывают на большое гравитационное красное смещение, которое в их излучении в десятки тысяч раз больше, чем в свете Солнца.

Гравитационное замедление времени, мерой и свидетельством которого служит красное смещение, очень значительно вблизи нейтронной звезды, а вблизи черной дыры, у ее гравитационного радиуса оно столь велико, что время там как бы

замирает. Можно сказать, что у часов, расположенных вблизи черной дыры и покоящихся там, одно «тик-так» отделено от другого столь значительным промежутком времени, что по часам, находящимся далеко от черной дыры, этот промежуток оказывается бесконечным по своей длительности.

А если часы не покоятся вблизи черной дыры, а свободно падают в ее поле тяготения — что они покажут?

Свободно падающие часы не испытывают действия тяготения. Они долетят до гравитационного радиуса и ничего особенного с ними не произойдет. Их «тик-так» будут следовать друг за другом в одном и том же ритме в течение всего их движения. Они будут отмерять собственное время, полностью игнорируя сильное поле тяготения, в котором они падают. Длительность падения, измеренная в этом собственном времени, будет совсем не велика. Свободное падение в поле тяготения черной дыры, образованной массой, равной, скажем, 3 массам Солнца, с расстояния миллион километров до гравитационного радиуса, занимает всего около часа.

Однако по часам, которые покоятся вдали от черной дыры, свободное падение тела в ее поле тяжести растянется во времени до бесконечности. Чем ближе падающее тело к гравитационному радиусу, тем более медлительным будет представляться этот полет удаленному наблюдателю. Тело, наблюдаемое издалека, будет бесконечно долго приближаться к гравитационному радиусу и никогда не достигнет его. В этом снова проявляется замедление времени вблизи черной дыры по сравнению с его ходом на большом расстоянии от него.

Итак, теория относительности показывает нам, что бег времени можно затормозить и даже совсем остановить. Время на первом этаже дома течет медленнее, чем на двенадцатом. На поверхности Солнца его бег еще медленнее, а на поверхности нейтронной звезды это уже, можно сказать, не бег, а легкая трусца. Наконец, у гравитационного радиуса черной дыры время останавливается и замирает. Часы, которые могли бы там «висеть» (то есть покоиться), всегда показывали бы одно и то же время, хотя они при этом отнюдь бы не «стояли». Например, на них всегда могло бы быть пять пополудни — как на чаепитии, описанном в известной и многими любимой книжке, где из-за этого все непрерывно «пьют чай как ненормальные».

Но любое хоть сколько-нибудь заметное торможение времени требует немыслимых перегрузок: нужно не падать под действием тяжести, не двигаться, а именно выдерживать ее. Чем больше ваши перегрузки, тем медленнее течет ваше собственное время. Например, на поверхности Солнца ускорение свободного падения в несколько тысяч раз больше, чем на

Земле. Значит, и сила тяжести там во столько же раз больше. Такая огромная перегрузка давала бы «экономия» всего нескольких секунд за год.

Мгновение, как мы видим, можно удержать и остановить. И мы даже знаем, приблизительно какой ценой. О перегрузках нам предстоит еще говорить и в следующей главе.

## ГЛАВА 9

### ПАРАДОКС ЧАСОВ

Кто-то остроумно заметил, что в общей теории относительности меньше относительного, чем в специальной теории относительности. И в самом деле: в специальной теории эффекты, связанные со скоростью (когда она постоянна) оказываются относительными и взаимными. Мы видели, например, что каждому из двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью, другой кажется медлительным и все, что с ним происходит, представляется замедленным во времени. «Ваши часы отстают», — говорит один из них другому, но то же может услышать и в ответ. Движущиеся часы отстают, но я считаю движущимся другого, а этот другой — меня.

В общей теории относительности все иначе. Когда имеются поля тяготения или движение является ускоренным (а это, как мы уже знаем, одно и то же), появляются эффекты не относительные, а абсолютные, и взаимность исчезает. Часы на последнем этаже дома идут быстрее, чем на первом. «Ваши часы отстают», — говорят сверху вниз. И им отвечают: «Да, ваши часы идут быстрее». Различие в ходе часов здесь уже не относительное, а абсолютное: с любой точки зрения верхние часы идут быстрее нижних.

Об эффекте замедления времени мы говорили в предыдущей главе. А сейчас нам предстоит познакомиться с интересным проявлением этого эффекта — так называемым парадоксом часов, вокруг которого в свое время было немало споров, и их отголоски слышны иногда и до сих пор. В этом парадоксе особенно ярко проявляется отличие абсолютного от относительного в свойствах времени.

### Снаряд Жюль Верна

В 1911 году, когда специальная теория относительности уже горячо обсуждалась в науке, а общей теории относительности еще не существовало, французский физик Поль



Ланжевен заметил, что путешественник, летящий в снаряде Жюля Верна — ракете — со скоростью, близкой к скорости света, должен постареть меньше, чем его брат-близнец на Земле. Он исходил из того факта, что движущиеся часы отстают от покоящихся.

На это Анри Бергсон, известный французский философ, немедленно возразил, что такое заключение находится в явном противоречии с принципом относительности. Ведь, согласно этому принципу, путешественник и его брат-близнец находятся, как кажется, в равных условиях: можно говорить, что первый движется относительно второго, а можно сказать, что второй, оставшийся на Земле, движется относительно первого. Так кто же из близнецов окажется старше, а кто моложе, когда они снова встретятся?

В этом и состоит парадокс часов, или, как тоже говорят, парадокс близнецов. Слово *парадокс* (означающее по-гречески *неожиданный, странный*) служит для обозначения чего-то, что логически как будто непротиворечиво, но резко расходится с тем, что общепринято или со здравым смыслом. Бергсон, а за ним и некоторые другие физики и философы не без остроумия критиковали то, что казалось им абсурдным. Одно из двух, — говорили они, — либо возраст близнецов должен быть в точности одинаков при встрече, либо теорию относительности нужно отбросить. Так, по их мнению, должен быть разрешен этот парадокс. И нужно сказать, что по тогдашнему состоянию науки они не делали никакой ошибки. Они и в самом деле нашли противоречие в рассуждении Ланжевена.

### Ускорения и перегрузки

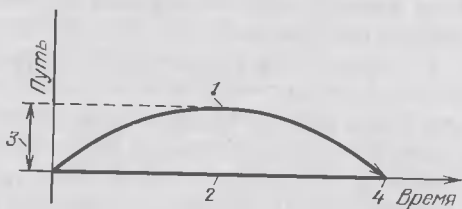
Разрешение парадокса принесла общая теория относительности, которая появилась лишь через пять лет после первого обмена замечаниями между Ланжевеном и Бергсоном. На ее основе может быть получен точный ответ на вопрос, кто из близнецов окажется старше при встрече после космического путешествия одного из них.

Но важное соображение можно высказать, и не прибегая к самой этой теории. Для этого стоит поточнее сформулировать интересующий нас вопрос.

Итак, путешественник отправляется в свой космический полет и при старте сверяет часы с часами на космодроме. Он удаляется от Земли с большой скоростью, достигает заданной точки в космосе, а затем поворачивает обратно, летит к Земле и совершает посадку. После посадки он сравнивает показания своих часов с показаниями земных часов. Покажут ли те и дру-



гие часы одинаковое время или одни часы отстанут от других? Обратим внимание на то обстоятельство, что путешественник-космонавт проделал замкнутый путь по маршруту Земля — космос — Земля. При этом его движение никак не могло быть все время равномерным и прямолинейным. Ему нужно было испытать ускорение при работе двигателя на старте, в начале пути, а в конце пути он испытал торможение при посадке.



К парадоксу близнецов: 1 — мировая линия путешественника, 2 — мировая линия домоседа, 3 — дальность полета, 4 — момент встречи после путешествия. Система отсчета — Земля.

Но и помимо этого он испытал действие ускорения, когда, включив свой ракетный двигатель, совершал разворот у дальней точки пути. Все эти ускорения путешественник реально ощущал, переживал их как перегрузки, о которых нам рассказывают настоящие, а не воображаемые, летчики и космонавты. Перегрузки эти бывают иногда значительными и космонавты вспоминают о них с вполне понятным чувством как о нелегком испытании.

Выходит, что братья-близнецы из нашего парадокса находились в действительности в условиях, которые никак не назовешь равными. Один из них — путешественник — испытывал перегрузки, а другой оставался в покое на Земле и ничего такого не переживал.

Можно считать, что брат-близнец на Земле находился в инерциальной системе отсчета — пренебрежем ее малой неинерциальностью (мы еще вспомним о ней и оценим ее позднее). Движение же космонавта было определенно неинерциальным. Его собственная система отсчета, связанная с космическим кораблем, явно неинерциальна: она двигалась ускоренно, когда включались ракетные двигатели. Так можно ли тогда считать, как Бергсон, что все равно, описывать ли картину полета в системе отсчета Земли или в системе отсчета космического корабля? Нет. И ошибка Бергсона теперь очевидна: он напрасно ссылается на принцип относительности — этот принцип здесь просто неприменим, ибо одна из систем отсчета не является инерциальной.

## Кто старше?

Так как условия, в которых находились братья-близнецы, различны, можно ожидать, что и их возраст окажется при встрече различным. Время течет различно для двух людей, если один из них живет в обычных условиях, а другой претерпевает перегрузки.

Перегрузки ощущаются как необычайно возросшая тяжесть тела — в полном соответствии с эйнштейновским принципом эквивалентности ускорения и тяготения. Ускорение равносильно тяготению. Но мы уже знаем, что тяготение замедляет ход времени. Значит, часы космонавта покажут меньшее время, чем часы его брата-близнеца. Космонавт окажется при встрече моложе. Это и есть разгадка парадокса часов. Ключ к ней дала общая теория относительности, научившая нас понимать тяготение и ускорение как явления одной природы.

Хотя перегрузки в современных космических полетах и очень ощутимы, особенно когда они приближаются к  $10\text{ g}$  (как известно, перегрузки принято измерять в единицах земного ускорения свободного падения  $g$ ), но они дают космонавтам не слишком большой выигрыш времени — несколько сто-миллионных долей секунды за полет.

Другое дело — воображаемые космические путешествия или те путешествия, которые, быть может, станут возможными в будущем. Здесь перегрузки могут быть поменьше, а эффект...

Вот один пример. При перегрузке  $2g$  можно за 40 лет, то есть в пределах времени трудовой жизни, совершить космический полет к центру нашей Галактики и вернуться обратно. Расстояние от нас до центра Галактики составляет около 30 тысяч световых лет, и потому по часам на Земле такое путешествие займет никак не меньше 60 тысяч лет. Так что космонавт сможет сообщить о своих впечатлениях, о сделанных им открытиях далеким своим потомкам.

При перегрузках до  $5-6\text{ g}$  за 40 лет можно совершить путешествие к далеким галактикам, отстоящим от нас на 500 миллионов световых лет. На Земле прошло бы тогда более миллиарда лет. А это уже время, сравнимое с возрастом Земли (около 4,5 миллиардов лет), и что застал бы тогда на Земле космонавт, какой была бы тогда наша планета, могут сказать разве что писатели-фантасты.

Итак, парадокс близнецов разрешен. Ответ на него основан на открытом общей теорией относительности замедлении времени в поле тяготения. Этот эффект имеет не относительный, а абсолютный смысл. Попытка же внести в картину относительность и взаимность привела к парадоксу.

Вот задача, которую предлагал своим студентам в Ленинграде академик В. А. Фок.

Представим себе, что из пушки вылетает ядро и оно летит вертикально вверх. Достигнув предельной высоты, оно падает затем обратно. Пусть на ядре имеются часы, и мы дважды сравниваем их показания с покоящимися часами — один раз в момент вылета ядра из пушки и второй раз в момент возвращения ядра. Какие часы покажут меньшее время — те, что на ядре, или те, что на Земле?

Часы на ядре совершили полет по замкнутому маршруту; сначала они удалялись от нас, затем изменили направление скорости и вернулись в точку вылета. Это очень похоже на полет космонавта с разворотом в дальней точке пути и возвращением на Землю, и потому можно сразу сказать ...

Но лучше все же еще немного поразмыслить. Когда ядро вылетает из пушки, ускоряющее действие порохового заряда уже прекратилось, и после этого ядро движется свободно — на него действует только земное тяготение. Можно сказать, что ядро свободно падает, только сначала это «падение вверх», а потом уже вниз. На ядре, как в свободно падающем лифте или на спутнике, отсутствуют силы тяготения и все время имеется состояние невесомости. Все физические явления разыгрываются в этом состоянии точно так же, как и в инерциальной системе отсчета (вспомним главу 8). И потому, как это ни покажется на первый взгляд странным, полет ядра следует признать инерциальным движением\*).

А часы на Земле? Вот тут-то и нужно учесть, что инерциальность системы отсчета, связанной с Землей, является лишь приближенной. Ранее ее неинерциальностью мы пренебрегали. Но теперь стоит внимательно к ней приглядеться.

Система отсчета, опирающаяся на поверхность Земли, — пусть это будет, например, просто стол, на котором стоят часы, — и в самом деле неинерциальна. Ведь относительно нее свободно падающие тела движутся не равномерно, а с ускорением, равным ускорению свободного падения. Вот если бы этот стол сам свободно падал, тогда часы находились бы в невесомости, и другие свободно падающие тела двигались бы относительно него равномерно и прямолинейно или покоились. Свободному падению стола мешает упругость земной поверхности — сила упругости, уравнивающая силу тяготения, и делает эту нашу систему отсчета неинерциальной. Степень ее

---

\*) Мы пренебрегаем, конечно, слабым сопротивлением воздуха.



Из пушки

неинерциальности измеряется земным ускорением свободного падения.

Стоит заметить, что круговое движение Земли по орбите вокруг Солнца не вносит дополнительной неинерциальности, хотя это и не прямолинейное движение. Важно, что это свободное движение под действием тяготения Солнца. Наоборот, если задержать и остановить Землю, появится неинерциальность, так как ее состояние стало бы уже не свободным. Неинерциальность создается из-за всего того, что мешает свободному падению. И только эти препятствия свободному падению и способны вызывать неинерциальность.

Мы видим, что система отсчета, связанная со свободно летящим ядром, гораздо ближе к инерциальной, чем система отсчета, связанная с поверхностью Земли. Так какие же часы окажутся отстающими? Теперь ясно, что отстанут часы, покоящиеся на Земле. Они испытывают действие тяготения, они весят, а часы на ядре находятся в невесомости.

Сходство с полетом космонавта оказалось только внешним, и оно подсказывало неправильный ответ. Но если бы космонавт не включал свой ракетный двигатель, его полет был бы, как полет пушечного ядра, свободным и инерциальным на всем участке пути после начального ускорения и перед конечным торможением.

Ну, а если на всем своем пути космонавт хотя и испытывает ускорение, но меньшее, чем  $g$ , он сам окажется старше своего брата, остававшегося на Земле. С этим дополнением, полученным из решения задачи Фока, мы имеем теперь уже полный ответ на все вопросы о парадоксе часов, или парадоксе близнецов.

### Снова о четырехмерном

Тяготение различных тел природы привносит в мир физических явлений нечто абсолютное — то, что не зависит от точки зрения, от системы отсчета, в которой мы ведем наблюдения и эксперименты. К этому выводу мы приходим на основании знакомства с новыми свойствами времени, открытыми общей теорией относительности. Но вместе с тем эта теория, созданная вслед за специальной теорией относительности, продолжает, можно сказать, сокрушение абсолютов классической физики.

Вспомним, что специальная теория относительности открыла относительность времени. Она установила также и относительность, то есть зависимость от системы отсчета, пространственных понятий, таких как, например, расстояние между

точками или размер какого-либо тела. Вместо уже не абсолютного времени и уже не абсолютного пространства специальная теория относительности выдвинула идею четырехмерного пространства-времени. Эта идея получила надежное обоснование в большом числе исключительно точных опытов.

Специальная теория относительности представляет нам пространство-время как некую универсальную конструкцию, как жесткий четырехмерный каркас, похожий на идеальную кристаллическую решетку. Время и пространство по отдельности теперь не абсолютны, но в специальной теории относительности абсолютно их четырехмерное единство. Смысл этой абсолютности состоит в том, что четырехмерное пространство-время по своим физическим и геометрическим свойствам ни от чего не зависит и всегда и всюду остается одинаковым и неизменным как целое.

Эту абсолютность решительно отменяет общая теория относительности. Опыты, подтверждающие специальную теорию относительности и ее абсолютное пространство-время, охватывают все явления физики — но за одним исключением. Это исключение — тяготение, гравитация. Согласно новой теории, тяготение искажает идеально правильный каркас пространства-времени. Тяготение искривляет и деформирует его, причем искривление тем больше, чем сильнее тяготение.

Представим себе какую-то область мирового пространства, в которой располагается несколько звезд, отделенных друг от друга большими расстояниями. Тяготение, очевидно, сильно вблизи каждой звезды, но оно почти отсутствует там, где до ближайшей звезды далеко. В межзвездном пространстве, вдали от звезд четырехмерный каркас пространства-времени остается почти идеально правильным. Он заметно деформируется только в окрестности каждой звезды. Да и то его искривление не очень значительно, если это обычная звезда, подобная Солнцу.

Если же это не звезда, а черная дыра, искажение вблизи нее будет значительным — конструкция четырехмерного каркаса исказится здесь очень сильно. Мы уже знаем, что вблизи черной дыры темп течения времени сильно замедляется, время как бы останавливается. В этом изменении свойств времени, а также и в изменении свойств пространства, проявляется сильное искривление пространства-времени вблизи черной дыры.

Можно сказать, что пространство-время поддается значительному искривлению только под воздействием сильного тяготения. Этот четырехмерный каркас обладает как бы упругостью по отношению к таким искривляющим воздействиям. Он очень жесткий, и сильно изогнуть его в каком-то месте мо-

жет лишь исключительная концентрация массы — как это происходит вблизи черной дыры.

Искривление пространства-времени возможно не только в отдельных местах, где сосредоточены тяготеющие массы. Возможно и неизбежно общее искривление пространства-времени всей Вселенной, создаваемое совместным действием всех ее масс — планет, звезд, галактик. Об этом мы расскажем в следующей главе.

Сложное строение пространства-времени, отражающее расположение и движение тяготеющих масс природы, служит в общей теории относительности проявлением сил тяготения. Силы тяготения проявляются через искривление пространства-времени и с помощью этого искривления они управляют движением всех тел. По этой причине говорят, что тяготение имеет геометрическую природу.

Мы не будем здесь подробнее на этом останавливаться и можем рекомендовать заинтересованному читателю обратиться за дальнейшими сведениями к литературе по общей теории относительности, указанной в конце книги.

### Кривизна

Большой удачей физики было то, что к началу нашего века математики придумали неевклидову геометрию. Она-то и послужила математическим инструментом общей теории относительности. С ее помощью описывается пространственно-временное строение всей Вселенной и отдельных ее областей.

Лобачевский в России, Бояи в Венгрии, Гаусс и Риман в Германии — это знаменитые математики, которым столь многим обязана современная физика. Исходя из чисто математических интересов и целей, они создали новую геометрию, которая служит обобщением классической геометрии Евклида.

Важнейшим понятием новой геометрии является понятие кривизны. Кривизна характеризует отклонение геометрических свойств пространства от евклидовости в данной его области. Если кривизна равна нулю, то отклонение отсутствует, пространство в этой области не искривлено и в ней справедлива классическая геометрия. Особенно легко представить себе смысл понятия кривизны, когда рассматриваются не трехмерные объемы, а двумерные поверхности. Искривленные поверхности — это и есть двумерные примеры пространств, обладающих неевклидовой геометрией.

Хорошо известный образец искривленной поверхности — это поверхность сферы. Ее искривление означает, что ни один из ее



кусков не может быть «уложен» всеми своими точками на плоскость. Это искривленная поверхность, а ее кривизна — величина, обратно пропорциональная квадрату радиуса. При стремлении радиуса к все большим значениям (говоря на математическом языке, к бесконечности) кривизна уменьшается и стремится к нулю. И действительно, чем больше сфера, тем менее ощутимо ее искривление. Недаром поверхность Земли представляется нам плоской — просто очень велик ее радиус.

Когда радиус сферы гораздо больше размеров той области на сфере, которую мы рассматриваем, отличие этой области от плоскости того же размера почти исчезает, оно практически пренебрежимо. Об этом говорят как о локальной, то есть местной, евклидовости сферы. И действительно, для описания геометрических отношений на очень малой области сферы очень большого радиуса вполне достаточно евклидовой геометрии, планиметрии. В целом же такие малые почти евклидовы области складываются в поверхность, которая отнюдь уже не евклидова.

Кроме сферы возможны и другие неевклидовы поверхности, похожие и не похожие на нее (а к геометрии сферы мы еще обратимся в следующей главе). Можно представить себе поверхность, степень искривленности, кривизна которой меняется от одного участка к другому — подобно, например, взволнованной поверхности моря.

Гораздо труднее наглядно представить себе искривление трехмерного пространства, а тем более четырехмерного пространства-времени. Но математики, а за ними и физики знают, как обращаться с неевклидовой геометрией, как производить необходимые вычисления, даже и не обращаясь обязательно каждый раз к каким-то наглядным образам, доступным нашему пространственному воображению.

Кривизна реального четырехмерного физического мира меняется от одной его области к другой. Она велика вблизи концентрирующихся масс и убывает вдали от них. Кривизна — это точный показатель геометрических свойств пространства-времени. И показатель не относительный, а абсолютный: если кривизна не равна нулю в одной системе отсчета, то она никогда уже не окажется равной нулю, в какой бы системе отсчета ее ни измеряли. Кривизна дает точную меру всемирного тяготения, а с ней и естественную меру хода времени повсюду во Вселенной.



## МИР ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ

В древнеиндийской книге X века до нашей эры, которая называется «Ригведа», что значит «Книга гимнов», можно найти описание всей Вселенной как единого целого. Вселенная «Ригведы» устроена не слишком сложно. В ней имеется прежде всего Земля. Она представляется безграничной плоской поверхностью — «обширным пространством». Эта поверхность накрыта сверху небом. А небо — это голубой, усеянный звездами «свод». Между землей и небом — «светящийся воздух». Очень похожи на эту картину и ранние представления о Вселенной древних греков.

У Пушкина в «Подражаниях Корану» читаем:

«Земля недвижна — неба своды,  
Творец, поддержаны тобой,  
Да не падут на сушь и воды  
И не подавят нас собой.»

И его примечание: «Плохая физика; но зато какая смелая поэзия».

Первые попытки людей создать ясный и наглядный образ мироздания были еще очень далеки от науки, как мы ее сейчас понимаем. Но замечательна сама эта дерзкая цель — объять мыслью весь мир. Отсюда берет истоки уверенность в том, что человеческий разум способен осмыслить, понять, разгадать устройство Вселенной, создать в своем воображении полную, целостную картину мира, в котором мы живем.

Современная наука о Вселенной — космология — опирается на общую теорию относительности. Это идейная основа космологии, ее теоретический фундамент. Но космология немислима без астрономии, без конкретных сведений о мире небесных тел и явлений. С 20-х годов нашего века, когда были построены первые крупные телескопы, астрономии стали доступны неведомые ранее дали Вселенной. В тесном взаимодействии физической теории и астрономических наблюдений и зародилась тогда современная космология.

Чем дальше мы видим в пространстве, тем глубже проникаем в прошлое, в глубины времен. Ведь мы видим благодаря свету, излучаемому небесными телами. А, как мы уже не раз говорили, свету требуется время, чтобы пройти путь от этих тел до Земли, до нас. Самые далекие из доступных сейчас наблюдению тел мы видим такими, какими они были миллиарды лет назад. Космология разрабатывает представления о самых

больших протяженностях в пространстве и самых больших длительностях во времени.

В этой и следующей главах рассказывается о том, как развивались взгляды на Вселенную, как возникла современная наука о ней. Мы познакомимся с новейшими данными об эволюции физического мира во времени, о космическом масштабе времени, о прошлом и будущем мира.

## Небесные сферы

Научная картина мира складывалась по мере того, как шло накопление важнейших знаний о Земле, Солнце, Луне, планетах, звездах.

Еще в VI веке до нашей эры великий математик и философ древности Пифагор учил, что Земля шарообразна. Доказательство этого он видел в том, например, что тень Земли, падающая на Луну во время лунных затмений, круглая. Об этом говорил и другой великий ученый античного мира, Аристотель.

Аристотель и всю Вселенную считал шарообразной, сферической. На эту мысль его наводил округлый вид небосвода. Это подсказывали круговые суточные движения светил на небе. В центре своей картины Вселенной Аристотель помещал Землю. Вокруг нее располагались Солнце, Луна и известные тогда пять планет. Каждому из этих тел соответствовала своя сфера, обращающаяся вокруг нашей планеты. Тело «прикреплено» к своей сфере и поэтому оно тоже движется вокруг Земли. Самой удаленной сферой, охватывающей все остальные, считалась восьмая сфера, к которой «прикреплены» звезды. Она тоже должна была обращаться вокруг Земли в соответствии с наблюдаемым суточным движением неба.

Аристотель полагал, что небесные тела, как и их сферы, сделаны из особого «небесного» материала — эфира, который не имеет свойств тяжести или легкости и совершает вечное круговое движение в мировом пространстве. Созданная Аристотелем картина мира держалась в умах людей на протяжении двух тысячелетий — вплоть до эпохи Коперника.

Книга Коперника, вышедшая в год его смерти, в 1543 году, носила скромное название «О вращении небесных сфер». Но это было полное ниспровержение аристотелева взгляда на мир.

Благодаря Копернику мы узнали, что Солнце занимает надлежащее ему положение в центре планетной системы. Земля же — никакой не центр мира, а одна из планет, обращающихся вокруг Солнца. Все стало на свои места, строение Солнечной системы было разгадано.

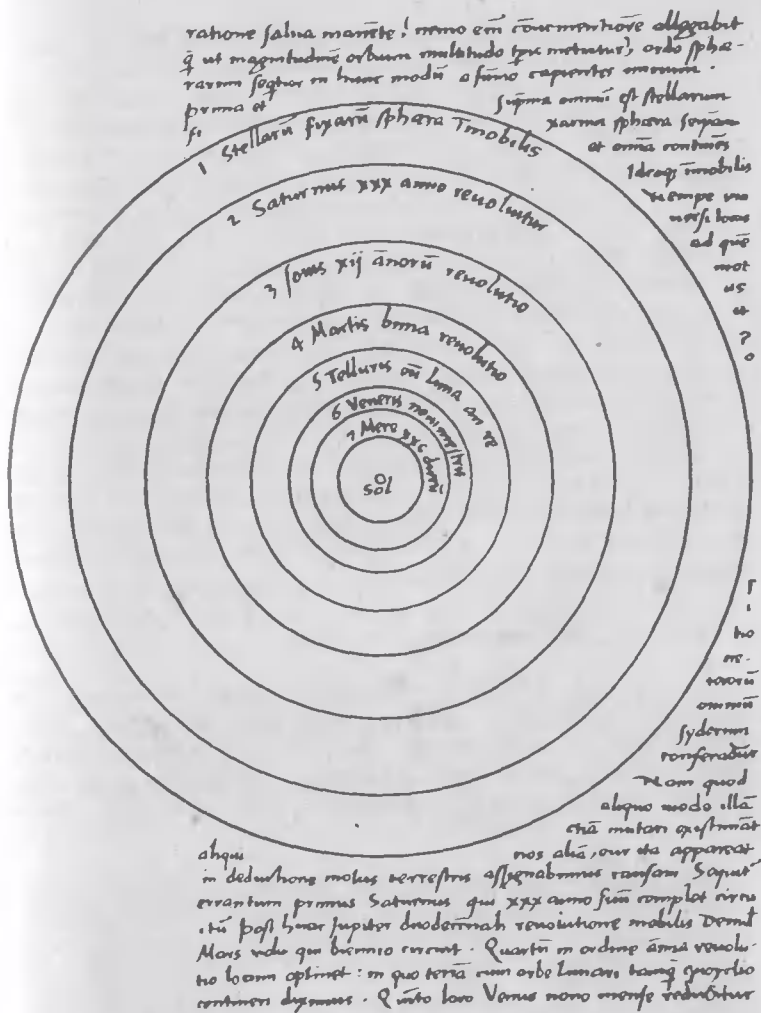
Дальнейшие открытия астрономов, уже после Коперника, дополнили семью больших планет. Их девять: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон. В таком порядке они занимают свои орбиты вокруг Солнца. Открыто множество малых тел Солнечной системы — астероидов, комет. Но это не изменило коперниковской картины мира. Напротив, все эти открытия только подтверждали и уточняли ее.

Теперь мы понимаем, что живем на небольшой планете, похожей на шар с диаметром примерно 13 тысяч километров. Земной шар вращается вокруг своей оси — в этом причина суточного движения небосвода. Земля вращается вокруг Солнца по орбите, не слишком отличающейся от окружности. Поперечник Солнечной системы составляет приблизительно 13 миллиардов километров.

Такова картина Вселенной в непосредственной близости от нас. Но Солнечная система — еще не вся Вселенная; можно сказать, что это только наша малая Вселенная. Что же касается далеких звезд, то о них Коперник не рисковал высказывать никакого определенного мнения. Он просто оставил их на прежнем месте, на дальней сфере, где они были у Аристотеля. Коперник лишь говорил — и совершенно правильно, — что расстояние до звезд во множество раз больше размеров планетных орбит. Как и античные ученые, он представлял Вселенную замкнутым пространством, ограниченным сферой звезд.

Смелая и неожиданная по тем временам мысль о звездах была высказана Джордано Бруно (1548—1600), замечательным мыслителем, трагическая судьба которого всем известна. Бруно выдвинул идею о том, что наше Солнце — это одна из звезд Вселенной. Всего только одна звезда из великого множества, а не центр мира. Солнце — ближайшая к нам звезда и это центр нашей Солнечной системы. Но и любая другая звезда тоже вполне может обладать своей собственной планетной системой, похожей на нашу. Если Коперник указал место Земле — отнюдь не в центре мира, куда он поместил Солнце, то Бруно лишил этой привилегии и Солнце.

Идея Бруно породила немало далеко идущих следствий. Из нее возникла, например, оценка расстояний до звезд. Действительно, Солнце — это звезда, как и другие, но только самая близкая к нам. Поэтому-то Солнце такое большое и яркое. А на какое расстояние нужно было бы отодвинуть Солнце, чтобы и оно выглядело звездой, как, скажем, Сириус? Великий голландский физик и астроном Христиан Гюйгенс, о котором мы уже упоминали, дал ответ на этот вопрос. Он сравнил яр-



Собственноручный рисунок Коперника с изображением его системы мира

кость Солнца и Сириуса, и вот что оказалось: Сириус находится от нас в сотни тысяч раз дальше, чем Солнце.

Чтобы лучше представить, сколь велико расстояние до звезды, можно сказать, что свет, пролетающий за 1 секунду 300 тысяч километров, затрачивает на путешествие от Сириуса к нам несколько лет. Расстояние до этой звезды составляет несколько световых лет. По современным данным, уточняющим первую оценку, расстояние до Сириуса — 8,7 световых лет. А расстояние от нас до Солнца — всего 8 световых минут.

Конечно, разные звезды отличаются друг от друга (это и учтено в современных расчетах расстояния до Сириуса). Поэтому определение расстояний до небесных тел и сейчас часто остается еще очень трудной, а иногда и неразрешимой задачей для астрономов, хотя со времен Гюйгенса придумано для этого немало новых способов.

Замечательная идея Бруно и основанный на ней расчет Гюйгенса стали новым шагом в изучении Вселенной. Благодаря этому границы наших знаний о мире, о его масштабах сильно раздвинулись, они распространились за пределы Солнечной системы и достигли звезд.

### Картина мира

С XVII века важнейшей целью астрономии стало изучение Млечного Пути — гигантского скопления звезд, протянувшегося через все небо. Астрономы стремились узнать, каково полное число звезд Млечного Пути, определить его действительную форму и границы, найти размеры. Лишь к XIX веку удалось понять, что все эти звезды составляют единую звездную систему, заключающую в себе все видимые глазом звезды на небе и еще великое множество других звезд. На равных правах со всеми звездами входит в эту систему и наше Солнце, а с ним Земля и планеты. Они располагаются далеко не в центре системы, а на ее окраине.

Потребовались еще многие десятилетия тщательных наблюдений и глубоких раздумий, прежде чем перед астрономами раскрылось во всей полноте строение Галактики. Так стали называть звездную систему, которую мы видим — изнутри ее — как полосу Млечного Пути. Слово *галактика* образовано из греческого *галактос*, что значит *молочный*.

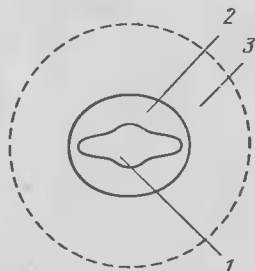
Оказалось, что Галактика имеет довольно правильное строение и форму, несмотря на видимую беспорядочность, с которой, как кажется, рассеяны звезды Млечного Пути.

Галактика складывается из диска, гало и короны — трех ее составных частей. Как видно из нашего схематического рисун-

ка, диск похож на две сложенные краями тарелки. Он образован звездами, которые внутри этого объема движутся по (почти) круговым орбитам вокруг центра Галактики.

Диаметр диска составляет приблизительно сто тысяч световых лет. Это означает, что свету потребуется сто тысяч лет, чтобы пересечь диск из конца в конец по диаметру. Число звезд в диске — приблизительно сто миллиардов.

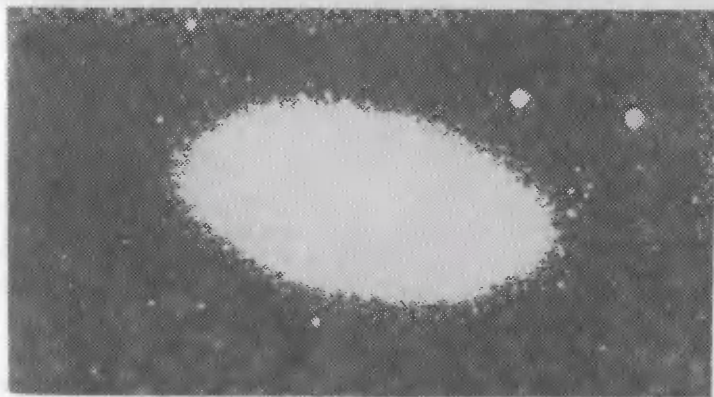
В гало содержится сравнимое с этим число звезд (слово *гало* по-гречески значит *круглый*). Они заполняют слегка сплюснутый сферический объем. Звезды гало движутся не по круговым, а по сильно вытянутым орбитам. Плоскости этих орбит проходят через центр Галактики; по разным направлениям они распределены более или менее равномерно.



Строение Галактики: 1 — диск, 2 — гало, 3 — корона

Диск и окружающие его гало погружены вместе в корону Галактики. Радиусы диска и гало близки друг другу, тогда как радиус короны в 5, а может быть, и в 10 раз больше этих радиусов.

О диске и гало астрономы знают уже больше полувека. А корона была открыта совсем недавно, в последнее десятилетие. Она обнаруживает себя только создаваемым ею тяготением. Дело в том, что корона невидима — из нее не исходит никакого света. Изучать невидимую корону, очевидно, нелегко.



Эллиптическая галактика





Спиральная галактика: туманность Андромеды

Из-за этого не слишком точна пока оценка ее размера и массы. Но главная загадка короны в другом — мы не знаем, из чего она состоит. Мы не знаем, содержатся ли в ней звезды, пусть даже и какие-то необычные, совсем не излучающие света. Сейчас многие предполагают, что ее масса складывается, может быть, вовсе не из звезд, а из мельчайших элементарных частиц — нейтрино \*).

---

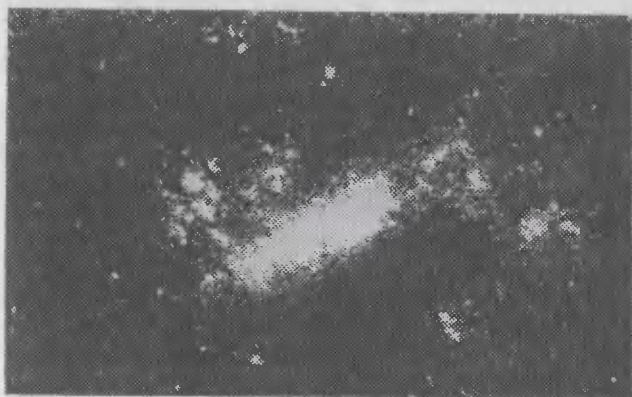
\*) Об открытии и исследовании короны Галактики можно прочитать в книге: Чернин А. Д. Звезды и физика. — М.: Наука, 1984. — Вып. 38. — (Б-чка «Квант»).

В начале нашего века, когда границы разведанной Вселенной раздвинулись настолько, что включили в себя Галактику. многие, если не все, думали, что эта огромная звездная система и есть вся Вселенная в целом. Но в 20-е годы были построены первые крупные телескопы, и перед астрономами открылись новые неожиданные горизонты. Оказалось, что за пределами Галактики мир не кончается. Наша Галактика — лишь один «звездный островок» из несметного их множества. Миллиарды звездных систем, галактик, похожих на нашу Галактику и отличающихся от нее, рассеяны тут и там по просторам Вселенной.

Фотографии галактик, сделанные с помощью самых больших телескопов, часто удивляют нас красотой и разнообразием своих форм. Правильностью округлых форм отличаются эллиптические галактики. Замечательны спиральные галактики — настоящие вихри звездных облаков. А иные звездные системы не обнаруживают никакого правильного строения: неправильные галактики клочковаты и бесформенны.

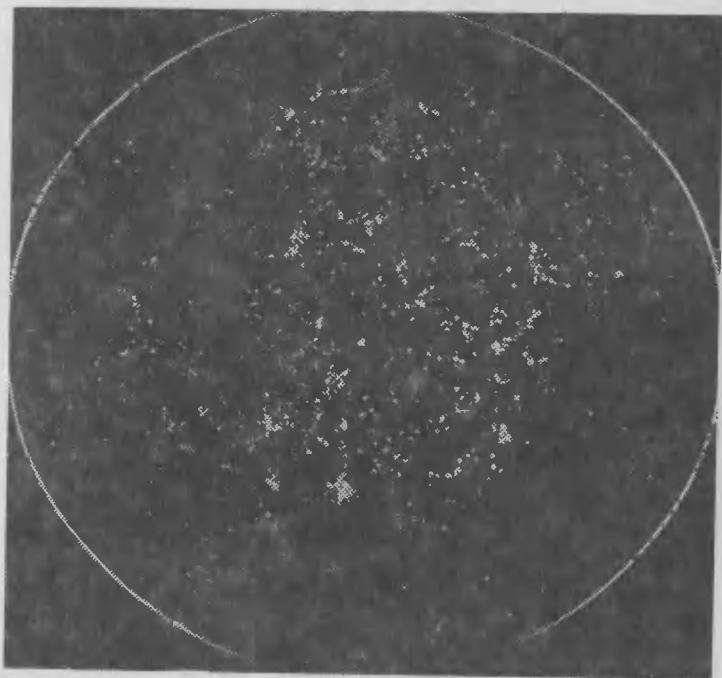
Эти три типа галактик — спиральные, эллиптические и неправильные — получившие названия по своему виду на фотографиях, открыты американским астрономом Э. Хабблом в 20—30-е годы нашего века.

Если бы мы могли увидеть нашу Галактику издалека, то она предстала бы перед нами совсем не такой, как на схематическом рисунке, по которому мы знакомимся с ее строением. Мы не увидели бы ни диска, ни гало, ни, конечно, короны, которая и вообще невидима. С больших расстояний виднелись бы лишь самые яркие звезды Галактики. А все они, как выяс-



Неправильная галактика





Крупномасштабное распределение галактик (по Дж. Пиблсу, США)

нилось, собраны в широкие полосы, которые яркими дугами выходят из центральной области Галактики. Ярчайшие звезды Галактики образуют ее спиральный узор. Только этот узор и был бы различим издалека. Наша Галактика на снимке, сделанном астрономом из какой-нибудь далекой галактики, выглядела бы очень похожей на Туманность Андромеды, какой мы видим ее с Земли.

Исследования последних лет показали, что крупные спиральные галактики, к их числу принадлежит и наша Галактика, а также и крупные эллиптические галактики (в которых звезд может быть еще в десятки раз больше, чем в Галактике) обладают, как и Галактика, протяженными и массивными невидимыми коронами. И это очень важно: если основная доля массы галактик приходится на короны, то, значит, и вообще чуть ли не вся масса во Вселенной, или во всяком случае подавляющая ее часть — это загадочная, невидимая, но тяготеющая «скрытая» масса.

Наша Галактика вместе с Туманностью Андромеды и тремя десятками других менее крупных галактик образуют Мест-



Одно из скоплений звезд в нашей Галактике

ную группу галактик. В свою очередь, эта группа существует не изолированно, она сама входит в крупное скопление галактик, центр которого лежит в направлении на созвездие Девы. И само это скопление галактик называют скоплением в Деве. В скоплении содержится около тысячи галактик.

Скопление в Деве служит ядром еще более крупного образования, называемого Местным сверхскоплением. Вместе с «нашим» скоплением в Деве в него входит еще несколько скоплений и групп галактик. Местное сверхскопление имеет не слишком четко очерченную форму. В целом оно выглядит довольно уплощенным. Его наибольший продольный размер достигает ста миллионов световых лет. Поперечный размер приблизительно в 5 раз меньше.

Известны и другие сверхскопления, кроме «нашего» Местного, лежащие далеко за его пределами, но довольно отчетливо различимые в современные крупные телескопы.

Итак, Земля входит в Солнечную систему, Солнечная система входит в Галактику, Галактика входит в Местную группу, Местная группа входит в скопление в Деве, скопление в Деве входит в Местное сверхскопление. Что дальше?

Несколько лет назад астрономы составили удивительную карту Вселенной. На этой карте каждая галактика представляется всего лишь точкой. На первый взгляд эти точки рассеяны на карте без всякого порядка. Если же приглядеться внимательно, то можно обнаружить группы, скопления и сверхскопления, в которые собраны многие точки-галактики. Сверхскопления выглядят на такой карте цепочками точек. Но что поразительнее всего, карта позволяет обнаружить, что некоторые такие цепочки соединяются и пересекаются, образуя какой-то сетчатый или ячеистый узор, напоминающий кружева или, может быть, пчелиные соты.

Покрывает ли такая «сеть» всю Вселенную, еще предстоит выяснить. Но несколько отдельных примеров ячеек, очерченных сверхскоплениями, удалось подробно изучить. Внутри ячеек галактик почти совсем нет, они собраны в ограничивающие ячейки «стенки». Размеры ячеек: 100—300 миллионов световых лет.

«Ячейка» — это еще пока не окончательное, лишь рабочее название для самого крупного образования во Вселенной. Еще более крупных по размерам систем в природе определено нет. Это с полной надежностью показывает карта Вселенной, о которой мы говорили. Астрономия пришла, наконец, к завершению одной из самых грандиозных своих задач — вся последовательность (или, как еще говорят, иерархия) астрономических систем теперь целиком известна.

Дальность действия современных телескопов достигает примерно 10–15 миллиардов световых лет. Это самые большие пространственные масштабы, доступные современной науке. Наблюдаемую область Вселенной в астрономии называют Метагалактикой (приставка *мета* — греческого происхождения и означает *после, за*). Она включает в себя все планеты, звезды, галактики, содержащиеся в гигантском шаре с радиусом 10–15 миллиардов световых лет.

Удивительно, что при всем разнообразии входящих в нее небесных тел Метагалактика сама по себе в высшей степени однообразна и проста по устройству. Чтобы судить об этом, следует взглянуть на Метагалактику как на некое единое целое. Нужно охватить мысленно сразу весь ее объем. И тогда окажется, что Метагалактика везде одинакова — небесные тела рассеяны по всему ее пространству довольно равномерно.

Об этом можно сказать и точнее. Представим себе, что мы разглядываем в пространстве очень большой кубический объем с ребром, скажем, 500 миллионов световых лет. Подсчитаем, сколько галактик содержится в этом гигантском кубе. Произведем затем такие же подсчеты для других, но столь же больших объемов, расположенных в различных частях Вселенной. Если все это проделать и сравнить результаты, то окажется, что в каждом таком объеме, где бы его ни взять, содержится одинаковое число галактик. То же самое будет и при подсчете не галактик, а скоплений или даже ячеек. Это означает, что Метагалактика в большом масштабе предстает перед нами однородной. Это ее важнейшая черта, самое главное свойство пространства видимой Вселенной.

Нужно сказать, что люди уже давно подозревали об этом. И в своих рассуждениях исходили именно из соображений максимальной простоты устройства. Например, физик и знаменитый мыслитель Блез Паскаль (1623–1662) говорил, что мир — это круг, центр которого везде, а окружность нигде. Так с помощью наглядного геометрического образа он утверждал пространственную однородность Вселенной.

В однородном мире все «места», можно сказать, равноправны. Любое из них имеет право претендовать на то, что оно центр мира. А если так, то, значит, никакого центра мира вовсе не существует.

Подходя к построению космологии, основанной на только что созданной им общей теории относительности, Эйнштейн следовал определенным общим воззрениям на Вселенную. Прежде всего, он разделял соображения о максимальной простоте ее устройства. Он считал, что Вселенная в целом должна быть однородной. Это, как мы знаем, означает равноправность всех ее «мест», или, математически говоря, всех точек ее пространства. Он предполагал также и равноправность всех направлений в пространстве: в какую сторону ни взглянуть, увидишь одно и то же. Это свойство равноправности направлений называют изотропией. Она тоже, конечно, (как и однородность) присуща картине мира лишь в самом крупном масштабе. В «мелком» масштабе, например в масштабе нашей Солнечной системы, никакой изотропии (как и однородности), очевидно, нет.

Эти взгляды не вытекали сами по себе ни из теории относительности, ни из каких-либо первых принципов физики. Не существовало тогда и никаких конкретных астрономических сведений о крупномасштабных свойствах Метагалактики. Это были традиционные интуитивные представления об общих чертах Вселенной, восходящие к истокам науки нового времени, к идеям Коперника и Бруно. Дальнейшее развитие наблюдательной астрономии полностью их подтвердило: Метагалактика как целое действительно оказалась однородной и изотропной.

Однородность и изотропия — это пространственные свойства наблюдаемой Вселенной. А каковы ее временные свойства?

Нужно сказать, что на этот счет тоже имела традиция, которой следовал и Эйнштейн. Он считал, что Вселенная в целом пребывает в неизменном состоянии и никак не подвластна ходу времени. Конечно, здесь и там в мире могут рождаться и умирать звезды или даже галактики. Но вся Вселенная как таковая не испытывает от этого изменений. Если погасли какие-то галактики или звезды, то вместо них возникают другие, а картина мира в крупном масштабе остается одной и той же. Так не изменяется и остается самим собой лес, хотя одно за другим сменяют в нем друг друга поколения деревьев.

Эйнштейн говорил о статической, то есть неподвижной, вечной и неизменной во времени Вселенной. В такой Вселенной каждый момент времени — всего лишь мгновение между бесконечным прошлым и бесконечным будущим. В каждое мгновение Вселенная одна и та же. И потому сами эти мгновения то-



же одинаковы и неразличимы. Из таких одинаковых неразличимых мгновений складывается общее время Вселенной. Это время можно назвать однородным — все его мгновения равноправны между собой.

В первые 2—3 десятилетия нашего века такие представления о Вселенной и ее времени казались естественными и даже очевидными. Таково было, по-видимому, общее умонастроение.

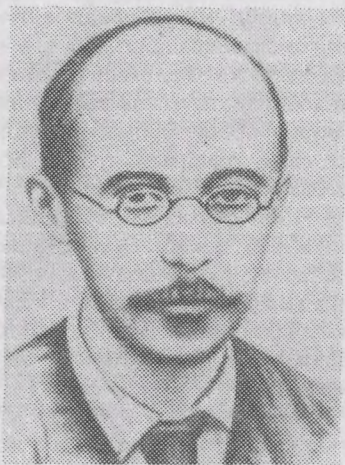
Но реальная Вселенная оказалась совсем иной. Не статической, не вечно застывшей, а, напротив, динамичной и развивающейся увидели ее вскоре физики и астрономы. Как и в масштабе отдельных планет, звезд или галактик, Вселенная во всем своем объеме изменяется, переходит из одного состояния в другое. Как и все, что известно нам в физическом мире, Вселенная существует не вне времени. Она тоже подчиняется его стремлению.

В 20-е годы, всего за несколько лет, был найден верный теоретический подход к космологии, к проблеме космического времени. Было получено и надежное подтверждение теории в астрономических наблюдениях.

### Фридман

Картина развивающейся Вселенной создавалась в 1922—24 годах советским математиком Александром Александровичем Фридманом. Это стало одним из самых крупных достижений всей отечественной науки.

Фридман родился в 1888 в Петербурге, учился в Санкт-Петербургском университете, вся его короткая и исключительно яркая научная жизнь прошла в городе на Неве. Он считал себя математиком. Метеорологи называют его классиком своей науки — он вывел математические соотношения для атмосферных вихрей, имеющие фундаментальное значение в теории прогноза погоды. В гидромеханике высоко ценятся его работы по теории хаотических турбулентных движений. Это основные области его научной работы.



Александр Александрович  
Фридман

Фридман был директором Главной геофизической обсерватории в 1924—25 годах, читал лекции в университете и Политехническом институте. Ему приходилось летать с исследовательскими целями на дирижаблях, а в июле 1925 года он поднялся на аэростате, достигшем рекордной по тому времени высоты 7400 метров.

Заинтересовавшись в 1920 году общей теорией относительности, он очень быстро овладел ею, и уже в 1922 году была опубликована первая из двух его космологических статей, которым суждено было дать начало современной космологии. Эта статья называлась «О кривизне пространства». Вторая статья, появившаяся двумя годами позднее, носила название «О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства». В 1923 году вышла его научно-популярная книга «Мир как пространство и время» — первая книга о новой космологии.

Фридман был математиком, и его космологическая теория возникла из решения строгой математической задачи. Как видно из названия его статей, это была задача о геометрии Вселенной, о ее пространстве и времени.

В качестве условия задачи Фридман принял, что вещество распределено по объему Вселенной равномерно, однородно. В духе общей теории относительности и само пространство нужно тогда считать однородным. Принято было также, что пространство обладает и свойством изотропии. Вот что было «дано» в задаче, которую поставил перед собой Фридман. «Найти» требовалось пространство-время Вселенной. Чтобы решить такую задачу, нужно воспользоваться уравнениями общей теории относительности.

О свойствах пространства Вселенной Фридман делал, как мы видим, то же предположение что и Эйнштейн. В этом их подходы совпадали. Но что касается поведения Вселенной во времени, то Фридман не стал загадывать наперед. Для решения математической задачи ничего, кроме однородности и изотропии пространства, предполагать не требовалось. Так пусть же сами уравнения теории покажут, каковы взаимоотношения Вселенной со временем.

И вот оказалось, что вещество во Вселенной не может находиться в покое. Общее однородное распределение вещества должно либо сжиматься, либо расширяться как целое. Применительно к наблюдаемой крупномасштабной картине мира это означает: галактики и скопления не стоят на месте, они движутся, и расстояния между ними изменяются со временем.

Но как выбрать между двумя возможностями, открытыми теорией? Расширяется ли в действительности все вещество Вселенной или оно сжимается? Ответ мог быть получен только в астрономических наблюдениях. И разгадка недолго заставила себя ждать.

В 1929 году американский астроном Э. Хаббл, изучая спектры далеких галактик, обнаружил в них систематическое красное смещение. Линии излучения были сдвинуты к красному концу спектра по сравнению с их «нормальным», лабораторным положением. Хаббл истолковал это как следствие эффекта Доплера и заявил, что красное смещение указывает на удаление от нас всех галактик. Так было открыто явление разбегания галактик. (Мы уже упоминали о нем в главе 6.)

Галактики не стоят на месте — они удаляются от нас. Но именно так и должна выглядеть картина Вселенной, если в ней происходит общее расширение. Конечно, галактики разбегаются не от нас, не от Земли или нашей Галактики. Общее расширение происходит так, что движение всей совокупности галактик представляется одинаковым, из какой бы галактики его ни наблюдали. (А иначе различные галактики и занимаемые ими «места» в пространстве Вселенной не были бы равноправны, отсутствовала бы однородность мира.)

После открытий Хаббла теория развивающейся Вселенной, теория космологического расширения получила всеобщее признание. Позднее, подводя итоги исследований, заложивших основу современной науки о Вселенной, Эйнштейн писал: «Первым на этот путь ступил Фридман».

Фридману не суждено было дожить до триумфа его теории. Он умер в 1925 году в возрасте 37 лет.

### Динамика Вселенной

Почему же Вселенная не может быть статической? Почему общее распределение вещества не находится в покое? Почему галактики и скопления не остаются на своих местах, а движутся?

Как мы сейчас увидим, ответ на вопрос, в сущности, очень прост. И чтобы подойти к нему, забудем пока что обо всех «премудростях» общей теории относительности. Попробуем взглянуть на вещи с точки зрения «обычной» механики.

Классическая механика Галилея и Ньютона научила нас, что тело может находиться в покое (или в состоянии равномерного движения) только в том случае, если на него не действуют силы. Или если этих сил две или несколько, но их сумма — равнодействующая — обращается в нуль. Может ли находиться в покое какая-то галактика или скопление? В масштабе общего распределения вещества во Вселенной эти огромные астрономические тела представляются всего лишь точками или, как говорят в механике, точечными массами. На каждую такую массу действует сила всемирного тяготения. Эта сила создается



всеми остальными массами во Вселенной. Никаких иных сил в масштабе всего мира просто нет. Силу всемирного тяготения ничто не уравнивает и, значит, тело, испытывающее ее действие, должно двигаться. Таков физический смысл ответа, который получил Фридман из решения своей задачи: раз есть сила, должно быть и движение.

Казалось бы, все так просто, что об этом можно было догадаться очень давно, хоть на другой день после того, как Ньютон открыл законы движения и всемирного тяготения. И в самом деле, о динамике однородного распределения вещества говорил в 1692 году еще сам Ньютон. В одном письме, которое потом стало знаменитым, он рассуждал о том, как должно вести себя однородное, равномерное распределение вещества, заполняющего всю Вселенную. Ньютон говорил, что вещество может либо сжиматься все в целом, либо распадаться на отдельные сжимающиеся сгустки. Но его интересовала не космология, а космогония. Ему хотелось понять, как образовались планеты, Солнце и звезды. И он считал, что они могли бы сгуститься, сжаться под действием собственного тяготения из разреженной допланетной, дозвездной среды, которая первоначально была равномерно рассеяна по всему пространству Вселенной. Эта идея оказалась чрезвычайно плодотворной — она дала толчок теории происхождения небесных тел, которая и сейчас развивается в этом направлении\*).

Всего один шаг отделял Ньютона от космологической постановки вопроса. Или даже полшага. Ньютон сказал, что вещество, однородно распределенное по всей Вселенной, может сжиматься как целое. Оставалось сказать, что оно может как целое еще и расширяться.

Остается только гадать, почему Ньютон не упомянул о расширении вещества Вселенной. Может быть, дело в том, что тяготение всегда стремится сблизить тела — на то оно и тяготение, взаимное притяжение. Мяч, выпущенный из рук, падает на Землю под действием ее притяжения. На падение мяча похоже и сжатие однородного вещества: это примеры движения в том направлении, в котором действует сила тяготения. Но разве запрещено движение против силы тяготения?

Мяч может лететь и вверх, если его подбросить. Летит вверх, преодолевая земное тяготение, и космическая ракета. Движение происходит против силы тяготения просто потому, что так была направлена вначале скорость этих тел. Все дело в начальной скорости, в ее направлении.

---

\*) См., например, книгу: Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Происхождение галактик и звезд. — М.: Наука, 1983.

И это справедливо также для однородного вещества Вселенной. Если начальные скорости всех масс направлены к их взаимному сближению, происходит общее сжатие вещества. Если же эти скорости направлены так, что с самого начала массы удаляются друг от друга, происходит общее расширение. В обоих случаях, конечно, сила тяготения стремится сблизить массы. Поэтому она ускоряет сжатие и тормозит расширение.

Как мы видим, динамика космологического расширения не таит в себе ничего особенно загадочного. Хотя она была открыта на основе общей теории относительности, по самой своей физической сути она может быть осмыслена и в рамках классической механики. Интересно, что не только общие принципиальные черты, но даже и конкретные математические законы космологического расширения можно получить из решения соответствующей задачи в классической механике. Что и было сделано, но не во времена Ньютона, а через 10 лет после Фридмана, английскими теоретиками Э. Милном и В. Мак-Кри, знавшими уже законы фридмановской космологии.

### Космическое время

Во все времена люди смотрели на небо, на мир звезд как на нечто незабываемое и вечное. Небо и в самом деле неизменно, но только если судить о нем по нашим обычным, человеческим меркам. Например, следя за небом хоть всю жизнь, не заметишь никаких изменений в очертаниях созвездий. Не уловить и изменений в расстояниях до галактик или скоплений. Перемены на небе происходят слишком медленно, чтобы их можно было увидеть на глаз. Здесь требуются совсем другие мерки времени, значительно превышающие дни, годы, наш собственный возраст.

За какое же время может произойти значительное изменение расстояний между галактиками в расширяющейся Вселенной? Сколько времени требуется для того, чтобы эти расстояния возросли, скажем, вдвое по сравнению с современными?

Об этом можно судить на основании теории Фридмана и наблюдений Хаббла. Согласно теории, скорость взаимного удаления двух галактик прямо пропорциональна расстоянию между ними. Наблюдения позволяют определить и коэффициент пропорциональности в этой зависимости. Он называется постоянной Хаббла и по современным данным составляет от 50 до 75 километров в секунду на мегапарсек. (Такая размерность удобна в астрономии. Напомним, что 1 парсек равен  $3 \cdot 10^{13}$  км; 1 мегапарсек равен 1 миллиону парсек.) Значение

постоянной Хаббла определено пока не слишком точно из-за трудностей в измерении расстояний до небесных тел.

Итак, скорость удаления одной галактики от другой равна постоянной Хаббла, умноженной на расстояние между галактиками. Эта зависимость называется законом Хаббла.

Пусть, например, расстояние между какими-то двумя галактиками составляет 100 мегапарсек. Тогда по закону Хаббла одна из них убегает от другой со скоростью 5 тысяч километров в секунду. (Мы воспользовались здесь значением постоянной Хаббла на ее нижней границе, что, кажется, ближе к истине.) Немалая скорость, но она все же еще довольно далека от скорости света \*).

Если скорость составляет 5 тысяч километров в секунду, то через секунду расстояние между галактиками увеличится на 5 тысяч километров. Это сравнимо с радиусом Земли; для галактик такие расстояния совершенно незначительны.

Но за какое время галактика, двигаясь с той же скоростью, отойдет еще на 100 мегапарсек, удвоив тем самым первоначальное расстояние до нее? Время движения найдем делением пути на скорость. Если 100 мегапарсек, то есть  $3 \cdot 10^{21}$  км, разделить на скорость  $5 \cdot 10^3$  км/с, получим  $6 \cdot 10^{17}$  с, что составляет примерно 20 миллиардов лет.

Это огромное, поистине космическое время, которое и вообразить себе нелегко. Что с ним сравнится? Только другие астрономические времена. Например, возраст Земли или Солнца, который близок к 5 миллиардам лет. Самым старым звездам Галактики около 14 миллиардов лет. Свет от самых далеких из наблюдаемых небесных тел (квазаров) идет к нам около 15 миллиардов лет. Никакие длительности, известные современной науке, не превосходят космическое время.

Можно заметить (это видно из закона Хаббла), что найденное нами время удвоения расстояния между галактиками равно просто обратной величине постоянной Хаббла. Поэтому оно относится не только к тому конкретному примеру, который мы рассмотрели. Оно характеризует в действительности космологическое расширение в целом. Оно окажется тем же самым для любой пары галактик, каково бы ни было наблюдаемое исходное расстояние между ними.

Космическое время дает нам представление о темпе изменений, происходящих в мире галактик. Это мера длительностей, присущих Вселенной как огромной физической системе. Это время в космическом масштабе.

---

\*) Именно поэтому, кстати, и допустимы законы классической механики в наших рассуждениях (см. выше) о динамике космологического расширения.

Мы познакомились с астрономической картиной мира, с пространственными масштабами видимой Вселенной, достигающими 10—15 миллиардов световых лет. Мы узнали и о космическом времени, о времени космологического расширения, составляющем примерно 20 миллиардов лет. Таковы горизонты Вселенной в пространстве и времени.

Но что лежит вне этих пространственно-временных границ? Это труднейший вопрос, выходящий пока что за рамки возможностей космологии. Тем не менее поиски ответа на него уже ведутся. И хотя было бы преждевременным вдаваться сейчас в какие-то подробности, несколько слов об этом все же стоит сказать. Начнем с того, что поточнее определим некоторые исходные понятия.

Как мы знаем, всю область пространства, доступную непосредственным наблюдениям, принято называть Метагалактикой. Ее пределы очерчиваются дальностью действия современных астрономических инструментов. Мы говорили выше также и о Вселенной, о мире. Эти два слова были для нас до сих пор просто синонимами. Это не мешало никаким рассуждениям. Но теперь полезно разграничить их значения. Договоримся о следующих определениях.

Будем считать Метагалактику частью Вселенной, а Вселенную — частью мира. Под Вселенной будем понимать область мира, которая включает в себя Метагалактику и обладает тем же строением, что и Метагалактика. Например, Метагалактика однородна по своему пространству. Так вот и Вселенную мы будем считать однородной. Вселенная занимает всю ту область, где сохраняются это и другие свойства, известные нам по Метагалактике. Очевидно, что прямыми наблюдательными сведениями о всей Вселенной в целом мы не располагаем. В частности, наблюдения не могут сказать нам, сколь далеко она простирается.

Что же касается мира, то будем считать, что он, вообще говоря, больше Вселенной. Ведь у нас нет никаких оснований утверждать, что весь мир устроен подобно Метагалактике или Вселенной. Будь это так, Вселенная и мир просто бы совпадали. Но это был бы всего лишь частный случай. Самая же общая мыслимая возможность состоит в том, что в мире имеются и другие области, строение которых отличается от строения Вселенной.

Не ограничивая себя одним лишь частным случаем, предположим для мира возможность разнообразия. Не станем, по крайней мере, отрицать его с самого начала. Не будем исклю-

чать, что в мире имеется не одна Вселенная, а несколько, много или даже бесконечное число самых различных вселенных \*).

Но вот в чем особенность космологии как науки о Вселенной, науки о мире. Другие вселенные, помимо нашей собственной, вряд ли когда-нибудь удастся непосредственно наблюдать. Скажем даже сильнее: мы их никогда не увидим. Это, однако, не должно стеснять научную мысль. Пусть не впрямую, пусть только теоретическими методами, но другие вселенные тоже можно сделать предметом изучения. И тогда они откроются, можно сказать, нашему мысленному взору.

Космология Фридмана и Хаббла — наука о Вселенной. Именно в таком точном смысле ее и следует понимать. Это учение о свойствах пространства-времени, о динамике вещества в Метагалактике и Вселенной, но не во всем мире. Эта область космологии успешно развивается после Фридмана и в теоретическом, и в наблюдательном отношении \*\*).

Наука о мире, если мир не ограничивается одной лишь Вселенной, делает только первые шаги. Но в самом общем виде идея множественности вселенных высказывалась уже 30—40 лет назад. Тогда об этом писал — и даже в Большой Советской Энциклопедии — старейший советский космолог А. Л. Зельманов. Сейчас говорят о возможных обобщениях фридмановской космологии \*\*\*), ставят ряд новых принципиальных вопросов о Вселенной и мире.

Среди этих вопросов — один, можно сказать, самый простой и даже наивный: почему наша Вселенная устроена именно так, а не иначе? Например, почему она однородна и изотропна?

Если Вселенная существует, как говорится, в единственном экземпляре, этот вопрос большого смысла не имеет. Что на него можно ответить? Нужно, наверное, отвечать примерно так: законы природы запрещают для Вселенной иные возможности. Но что это за «иные возможности»? О них ничего не скажешь, потому что они не существуют в природе. То есть выходит, что Вселенная такова, как она есть, потому что она такова, как она есть.

Но с точки зрения множественности вселенных этот вопрос уже приобретает смысл. Другие вселенные — это «иные воз-

---

\*) Наша Вселенная пусть пишется с большой буквы, а все остальные — с малой.

\*\*) См., например, книги: *Вайнберг С. Первые три минуты.* — М.: Энергоатомиздат, 1983 и *Новиков И. Д. Эволюция Вселенной.* — М.: Наука, 1984.

\*\*\*) Об этом можно прочитать в научно-популярных статьях, опубликованных в сборнике: *Прошлое и будущее Вселенной.* — М.: Наука, 1986.

можности», существующие в мире на равных с той одной, которая нам известна. Следует тогда изучать весь набор этих возможностей, чтобы увидеть среди них роль и место нашей Вселенной со всеми ее отличительными чертами. И не только такими, как однородность и изотропия в крупном масштабе, а скажем, еще и возможность жизни и разума, изучающего среди прочего общее устройство мира.

Как это ни странно на первый взгляд, на наш наивный, но в действительности важнейший вопрос о Вселенной не исключен, быть может, и такой ответ: Вселенная такова, как она есть, потому что в мире существуют другие вселенные, совсем не похожие на нее.

## ГЛАВА 11

### ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ

Первая дата, занесенная в русскую летопись, — год 6360. «...Отселе почнем и числа положим», как говорится в «Повести временных лет»<sup>\*)</sup>. В старом русском календаре, заимствованном из Византии и бывшем у нас в ходу до петровской реформы 1700 года, счет времени велся «от сотворения мира». Это «событие» приходится на 5509 год до нашей эры. Если так считать, то возраст мира в 1987 году составляет 7496 лет.

Сотворение мира — излюбленная тема древних легенд, сказок, мифов, известных в ранней истории разных народов. Некоторые из таких «космогонических легенд» стали частью религиозных верований, сохранившихся и до сих пор. Но каков не поэтический или мифологический, а научный взгляд на происхождение Вселенной? Каков возраст Вселенной? И что в действительности под этим нужно понимать?

### Сингулярность

Когда-то существовали хитроумные часы — астрариум, о которых мы упоминали в главе 3. Это была Вселенная в миниатюре: часы воспроизводили видимые движения по небу Солнца, Луны, планет. Если запустить астрариум не

---

<sup>\*)</sup> О смысле, который имеет здесь слово *временных*, немало спорили; оно встречается в древней русской литературе очень редко. По мнению академика Д. С. Лихачева, *временных* значит *прошедших*, минувших. Если так, то, как видно, был когда-то у слова *время* крен в сторону прошлого и его значение не вполне равномерно распространялось на прошлое, настоящее и будущее (ср. сказанное об этом слове в главе 1).



в «реальном времени», а в ускоренном, можно увидеть будущее Солнечной системы — положения светил на часы и годы вперед. А запустив эту модель Вселенной в обратную сторону, против часовой стрелки, можно было бы наблюдать прошлое Солнечной системы.

Космология Фридмана — это тоже модель, физико-математическая модель Вселенной в масштабе всей системы галактик и скоплений. Как и астрариум, она способна оживить для нас прошлое Вселенной, рассказать о ее будущем. Она воспроизводит не детали, не индивидуальные движения отдельных галактик или скоплений. Модель дает представление об общей динамике Метагалактики. Она показывает нам крупномасштабную картину мира в движении. На этой картине галактики и скопления выглядят лишь точками. Космологическое расширение растягивает картину во все стороны, и галактики на ней «разъезжаются» друг от друга.

Что же эта модель Вселенной говорит о прошлом? Если галактики разбегаются, то раньше они были ближе друг к другу. Чем дальше в прошлое, тем теснее они располагались в пространстве.

Космологическая модель, обращенная в прошлое, — это как кинофильм, просматриваемый от конца к началу. И если уйти достаточно далеко вглубь времен, мы обнаружим, что галактики составляли все вместе как бы газ; но «частичками» этого газа были не атомы или молекулы, а сами галактики. И вся Вселенная была сплошь заполнена этим «газом» галактик.



Плотность вещества в расширяющейся Вселенной

ва. Она лишь меняется со временем — убывает в ходе космологического расширения.

Но «запущенная» в сторону прошлого модель Фридмана показывает нам Вселенную не расширяющейся, а сжимающейся. Космическая плотность при этом непрерывно нарастает\*).

\*) Конечно, по ходу этого воображаемого сжатия галактики рано или поздно «перемалываются» и все их вещество превращается уже в настоящий, обычный газ, равномерно распределенный по всему пространству.

Она становится все больше и больше, пока не станет... бесконечно большой. И тут наш воображаемый фильм о Вселенной обрывается — модель Фридмана «отказывает».

Действительно, история Вселенной, воспроизводимая теорией Фридмана, не продолжается сколь угодно далеко в прошлое. У нее есть начало — момент, когда космическая плотность принимала неограниченно большое, бесконечное значение. Это трудно вообразить, но в тот же самый момент все расстояния во Вселенной и ее собственные размеры были равны... нулю. И все вещество Вселенной было сжато в точку. Из этой «начальной точки» и взяло старт космологическое расширение, которое продолжается до сих пор.

Начальное состояние бесконечной плотности называется космологической сингулярностью (*сингулярность* значит *особенность*). И верно, это состояние совершенно необычно и исключительно.

Но бесконечность — понятие математическое, а не физическое. Если в математических формулах, описывающих физическое явление, возникает бесконечность, для физики это сигнал тревоги. Это значит, возникает нечто совсем особенное, что данная теория не в состоянии верно описать. Теория становится в тупик.

В истории физики такое уже бывало. Например, формулы аэродинамики давали когда-то бесконечно большое сопротивление воздуха в случае если скорость летательного аппарата приближается к скорости звука. Но сверхзвуковые самолеты летают, и никаких бесконечностей при этом не заметно. Дело здесь в появлении нового эффекта — ударной волны — при переходе через звуковой барьер. Прежние формулы аэродинамики не допускали ударных волн. Отсюда и сигнал математики — в теории что-то неладно.

Как только ударные волны были приняты во внимание, все стало на свои места, и сопротивление воздуха оказалось по новым расчетам хотя и сравнительно большим, но отнюдь не бесконечным.

О чем же сигнализирует космологическая бесконечность? Несомненно, она указывает нам предел, границу применимости модели Фридмана. Скорее всего, в области сингулярности становится неприменимой и сама общая теория относительности. Но какая новая физика кроется здесь за бесконечностью? Возможно, это физика квантовых явлений, известных в мире мельчайших тел природы — атомов, ядер, элементарных частиц. Не зря же все размеры стягиваются в сингулярности или вблизи нее чуть ли не в точку: самое большое становится самым малым.



К этому вопросу мы еще вернемся в главе 13, где речь пойдет о квантовом подходе к космологической сингулярности. Скажем заранее, что он обещает ликвидировать бесконечность в значении космической плотности.

### Нуль времени

Обратимся к основному вопросу этой главы — что считать возрастом Вселенной. В современной физике под этим понимается время, истекшее после космологической сингулярности. С сингулярности начинается история нашей Вселенной. Это для нее естественный нуль времени.

Но это не начало всего мира. Если стоять на точке зрения множественности вселенных, это только первое событие в жизни одной из многих (или даже бесчисленных) областей мира. Да и само космологическое расширение с этой точки зрения — всего лишь эпизод в общем потоке мировых событий. Но для нас это самое грандиозное из доступных наблюдению явлений природы.

Сколько же времени прошло от космологической сингулярности до современной эпохи? После того что мы уже знаем о космологическом расширении, ответить на этот вопрос не так уж трудно.

В предыдущей главе мы видели, что галактикам требуется примерно 20 миллиардов лет, чтобы увеличить вдвое расстояния, которые их сейчас разделяют. А сколько времени потребовалось для того, чтобы они достигли сегодняшних расстояний? Можно рассуждать так. Если известно расстояние между двумя данными галактиками и скорость удаления одной из них от другой, то время, затраченное на то, чтобы пройти это расстояние, найдется делением расстояния на скорость. Вспомним снова закон Хаббла: скорость удаления есть постоянная Хаббла, умноженная на расстояние. Отсюда отношение расстояния к скорости получается равным обратной величине постоянной Хаббла. То есть мы снова получили 20 миллиардов лет. Это и не удивительно, так как и прежде, и сейчас мы продельвали по сути одно и то же арифметическое действие.

Стоит, может быть, заметить, что наша оценка времени — и здесь, и в главе 10 — должна считаться, строго говоря, лишь приближенной, ориентировочной. Действительно, мы находили время движения простым делением пути на скорость. Но это законно только тогда, когда движение происходит с постоянной скоростью. Мы же знаем, что во Вселенной действует тяготение, стремящееся затормозить расширение, уменьшить скорости галактик. В прошлом скорости их разбегания были

больше, чем сейчас. Поэтому на прохождение данного пути каждой галактике потребовалось несколько меньше времени, чем по нашей простой оценке.

Теория Фридмана, учитывающая все особенности динамики, позволяет сделать точный расчет времени, протекшего от сингулярности. Но результат не слишком сильно отличается от нашей оценки — время сокращается не более чем на одну треть. Скорее всего, оно заключено в пределах от 15 до 18 миллиардов лет.

Остающаяся небольшая неопределенность связана с тем, что в теории Фридмана для вычисления возраста Вселенной требуется не только лишь значение постоянной Хаббла. Результат вычисления зависит еще и от космической плотности вещества в современную эпоху. А она известна сейчас не слишком точно (мы еще обратимся к этой величине немного позднее).

### Часы Вселенной

Но вот вопрос, который мы должны были, наверное, давно уже поставить. В какой системе отсчета измеряется время расширения, возраст Вселенной? Теория относительности учит нас, что промежуток времени между двумя событиями зависит от того, в какой системе отсчета находятся часы, по которым мы его измеряем. Если производить измерения двумя часами, движущимися друг относительно друга, то результаты будут различны.

Когда мы говорим о разбегании галактик, мы, очевидно, связываем свою точку зрения с Землей, с Солнечной системой, с нашей Галактикой. Мы наблюдаем динамику Вселенной из нашей Галактики и с помощью наших приборов измеряем их скорости и расстояния до них. Сопоставляя скорости и расстояния (связанные законом Хаббла), находим по их измеренным значениям искомое время. Отсюда ясно, что в качестве системы отсчета нам служит Галактика.

Но Галактика — лишь одна из многочисленных «частичек» вещества Вселенной, участвующих в ее общей динамике. Все эти «частички» равноправны между собой в силу однородности Метагалактики. Раз так, время расширения, измеренное по часам нашей Галактики, совпадает с временем, измеренным по часам любой другой галактики.

Время расширения, возраст Вселенной относятся ко всей Метагалактике в целом и, по сути дела, сама однородная Метагалактика служит системой отсчета, в которой это время измеряется. Мысленно можно представить себе часы, располо-

женные на всех галактиках, и все они идут «в ногу», отсчитывая общее время Вселенной.

Об этом стоит, пожалуй, сказать немного подробнее и точнее.

Прежде всего, нужно учесть, что в действительности каждая галактика совершает вообще-то довольно сложное движение. Главное ее движение — это участие в общем разбегании по закону Хаббла. Но к этому добавляется еще всякий раз и какое-то индивидуальное (собственное, как говорят астрономы) движение, связанное, например, с притяжением соседних галактик. Так вот от этих индивидуальных, собственных движений нужно отвлечься. Нужно мысленно представить себе сетку, наброшенную на всю Метагалактику. Эта сетка равномерно растягивается во все стороны в соответствии с общим регулярным расширением общей картины. Часы, расположенные в узлах такой сетки, и будут давать «чистое» время Вселенной, освобожденное от случайностей поведения индивидуальных галактик. Это собственное время всей Метагалактики как целого.

### Одновременность

Мы уже говорили, что сингулярность служит естественным началом отсчета космического времени. Это было событие, одновременное для всей Вселенной. Ее вещество начало расширяться в этот момент и притом все разом. Сингулярность — событие, происшедшее в одном месте, даже в одной точке, где находилось в тот момент все вещество. Так что смысл одновременности в этом случае вполне ясен и однозначен.

Но когда речь заходит о более поздних событиях в истории Вселенной и притом происходящих в разных местах пространства, нужно всякий раз заботиться о том, чтобы точно определить, в каком именно смысле понимается одновременность событий. Например, мы должны хорошо представлять себе, что в точности означает утверждение об однородности Вселенной. Ведь речь идет здесь о разных местах пространства, которые сравнивают между собой.

Мы говорим, что сейчас плотность вещества одинакова по всей Вселенной. Сейчас — значит в нынешний момент времени. И именно в этот момент мы сравниваем плотность вещества в разных областях Метагалактики. Подразумевается, что мы видим всю картину распределения галактик как бы сразу, в один единый миг. Плотность, с которой размещаются во Вселенной галактики, убывает со временем из-за космологического расширения. Поэтому считать ее всюду по пространству

одинаковой можно только при том условии, что каждая область Метагалактики, каждый ее участок, рассматривается на одном и том же этапе расширения. Иначе один участок выглядел бы более плотным (то есть более молодым), а другой — менее плотным (то есть более старым), когда бы мы наблюдали первый на более раннем, а второй — на более позднем этапе расширения. Видеть все участки одинаковыми — значит видеть их через один и тот же промежуток времени от начала расширения. В этом и состоит смысл одновременности. Это одновременность в собственной системе отсчета Метагалактики.

Можно сказать, что Метагалактика предстает перед нами однородной лишь на «моментальной фотографии», снятой в таких воображаемых лучах, которые распространяются мгновенно, с бесконечной скоростью. Иначе как бы мы увидели ее всю сразу и одновременно. А как выглядела бы Метагалактика, «снятая» в реальных световых лучах?

Астрономические наблюдения — оптические и радио-, в инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучах — ведутся с помощью электромагнитных волн различной частоты. Они распространяются вдоль светового конуса и показывают картину неба с запаздыванием на определенное время, которое требуется свету, чтобы пройти расстояние, разделяющее нас и наблюдаемый объект. Солнце мы видим с задержкой 8 мин; свет от звезд Галактики идет к нам десятки и сотни лет, а от далеких галактик и скоплений — миллионы и сотни миллионов лет. Чем дальше объект, тем в более раннюю эпоху мы видим его. Наблюдая распределение и движение галактик, мы получаем сведения о тех их свойствах, которыми они обладали в очень отдаленном, по нашим обычным понятиям, прошлом. Но по масштабам Вселенной разница в сотни миллионов лет не очень велика. Ее расширение происходит в таком темпе, что расстояния, а с ними и космическая плотность вещества заметно меняются лишь за миллиарды лет. Потому-то плотность в близкой области Вселенной, где видны галактики, и представляется нам одинаковой, однородной.

Если бы, однако, можно было заглянуть на большие расстояния, то есть в более далекое прошлое, мы, очевидно, обнаружили бы, что там (то есть тогда) плотность больше, чем вблизи (то есть сейчас). Снимок, сделанный в реальных лучах, показал бы, таким образом, Вселенную неоднородной по плотности: чем дальше от нас, тем плотнее. На таком снимке и само физическое пространство, в соответствии с общими принципами эйнштейновской теории, должно быть неоднородным по своим геометрическим свойствам.

## Срезы времени

Итак, имеются два разных «снимка»: какой из них правильный? Казалось бы, второй, он соответствует действительной процедуре наблюдений. Но и первый (моментальный), хотя и не может быть получен непосредственно в наблюдениях, тоже показывает реальную Вселенную. Снимки сильно отличаются друг от друга и, прежде всего, тем что в одном случае космическая плотность и само пространство однородны, а в другом никакой однородности нет.

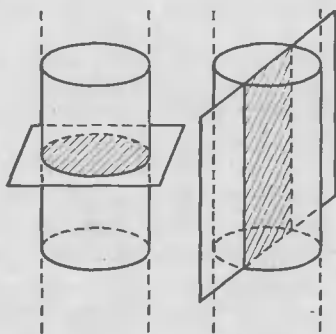
Различия касаются свойств видимой Вселенной в целом. Но если не уходить далеко, а ограничиться какой-то не очень большой окрестностью, оба снимка, очевидно, покажут приблизительно одно и то же. Различия, связанные с запаздыванием света, тем меньше, чем меньше область наблюдений. В действительности оба снимка правильные и друг другу не противоречат. Но их различие показывает, что, когда речь идет о больших объемах пространства и больших промежутках времени, само пространство и само время по-разному проявляют себя в разных наблюдениях.

Согласно принципам общей теории относительности, как время, так и пространство не абсолютны, их свойства не заданы раз навсегда, а зависят, как уже не раз упоминалось, от тяготеющих масс. Время и пространство не абсолютны еще и в другом смысле: они по-разному могут быть отделены друг от друга, выделены из единого четырехмерного пространства-времени.

Такое разъединение времени и пространства происходит для нас тогда, когда мы выбираем определенную систему отсчета и устанавливаем в ней приборы для измерения времени и расстояний. Наблюдения с помощью этих приборов дают нам сведения не о времени вообще и не о пространстве вообще, а именно о конкретном времени и конкретном пространстве, какими они представляются из нашей системы отсчета. В другой системе отсчета картина отдельно времени и отдельно пространства может оказаться совершенно иной. Одинаковыми остаются во всех системах отсчета лишь те данные, которые характеризуют пространство и время вместе, как единое целое (соответствующие физические величины называют инвариантами пространства-времени).

Проиллюстрируем разные способы разделения времени и пространства простым примером из геометрии. Представим себе обыкновенный цилиндр. Это объемное тело будет представлять для нас «единое трехмерное пространство». Из него можно выделить «двумерное пространство», произведя сечение

цилиндра плоскостью. Такое двумерное пространство — это, так сказать, подпространство нашего «единого трехмерного пространства»; число измерений подпространства на единицу меньше. Результат выделения подпространства зависит от принятого способа сечения. В сечении можно получить фигуры разной формы, разной площади. Если произвести сечение плоскостью, перпендикулярной оси цилиндра, то получим двумерное подпространство в виде круга. Если же рассечь цилиндр плоскостью, параллельной его оси, получим прямоугольник. Какое из двух сечений правильно передает свойства двумерного подпространства этого тела? Вопрос не имеет смысла. Двумерное подпространство не абсолютно, его можно выделить разными способами.



Геометрический пример: сечение цилиндра плоскостью

Нет ничего удивительного и в том, что трехмерное физическое пространство, подпространство единого четырехмерного пространства-времени, предстает перед нами разным на разных «снимках» Вселенной. Эти снимки дают разные сечения четырехмерного пространства-времени Вселенной. Снимок в реальных лучах нужно понимать геометрически как сечение световым конусом. Моментальный же снимок — сечение плоскостью постоянного космического времени.

Эти снимки Вселенной в разных срезах времени соответствуют разным системам отсчета, разным способам отделения времени от пространства. Плоскость постоянного космического времени дает срез в системе отсчета, связанной с самой расширяющейся Метагалактикой. Срез световым конусом соответствует другой системе отсчета. Эта система представляет собой как бы жесткую сетку, «привязанную» к земному наблюдателю, к нашей Галактике. Такая сетка не растягивается космологическим расширением. Напротив, она остается неизменной, и все галактики, кроме нашей собственной, «расползаются» относительно нее — они движутся по закону Хаббла.

Мы уже говорили о том, как выглядит пространство в этой системе отсчета — оно оказывается неоднородным. И время в этой системе отсчета иное, отличное от общего космического времени. Оно должно измеряться по часам, которые расположены всюду в пространстве на неизменных расстояниях от нас и друг от друга. Эти часы не разбегаются. А часы на разбегаю-

щихся галактиках, когда мы смотрим на них из неподвижной системы отсчета, представляются отстающими от наших неподвижных часов. Так, разумеется, и должно быть по теории относительности: время в движущейся системе отсчета течет медленнее, чем в неподвижной.

## Горизонт

Прямым свидетельством такого замедления времени служит красное смещение в спектрах излучения далеких галактик. Ведь красное смещение означает увеличение периода колебаний принятого света. Периоды же колебаний растягиваются из-за того, что по нашим часам любые колебания, а с ними и само время на движущихся относительно нас телах замедляются. Это эффект Доплера, о котором мы говорили в главе 6.

По закону Хаббла, чем дальше от нас галактика, тем больше скорость ее удаления от нас. Из-за этого красное смещение и замедление времени усиливаются с расстоянием. Рассматривая все более и более удаленные галактики, мы замечаем все большее и большее красное смещение и, следовательно, все более значительное замедление времени. Согласно космологической модели Фридмана, существует такое большое, но вполне определенное, конечное расстояние, на котором красное смещение становится бесконечно большим. Период принимаемого света оказывается при этом бесконечным, а его частота (величина, обратная периоду) обращается в нуль. С точки зрения наблюдений это означает, что источник света остановится для нас невидимым. Пусть его собственная мощность излучения и будет сколь угодно велика, все равно его нельзя увидеть.

Таким образом, можно говорить о существовании во Вселенной горизонта, в пределах которого только и возможны наблюдения. Расстояние до горизонта составляет 15—18 миллиардов световых лет. Это путь, который свет успевает пройти за время от начала космологического расширения до современной эпохи.

О горизонте мы уже говорили в главе 7, когда речь шла о световом конусе. Конус прошлого служил горизонтом видимости, горизонтом событий. Природа космологического горизонта, по существу, та же: все дело в том, что за конечное время свет проходит конечный путь. То, что происходит вблизи космологического горизонта, очень похоже и на явления вблизи критической поверхности черной дыры (см. главу 8). Там тоже любой источник света, сколь бы ярким сам по себе он ни был, становится невидимым для удаленного наблюдателя, но на

путь от критической поверхности до наблюдателя свету требуется бесконечное время.

Вывод о существовании горизонта во Вселенной никак не зависит от того, имеются ли в действительности астрономические тела, которые столь ярки, что могут посылать нам свет со сколь угодно больших расстояний. Этот вывод имеет характер принципиального ограничения, вытекающего из свойств космического времени.

В космологической модели Фридмана объем пространства, заключенного в пределах горизонта, является ограниченным по величине, конечным. Конечна и содержащаяся в этом объеме масса вещества. Отсюда вытекает одно важное заключение общего характера.

Уже многие века ведутся споры о том, конечна или бесконечна Вселенная. Теория относительности и основанная на ней космология дают возможность получить ответ на этот вопрос. В утверждениях «Вселенная конечна» или «Вселенная бесконечна» речь идет об объеме трехмерного пространства. Но этот объем (как и вообще геометрические свойства пространства) зависит от того, каким именно образом пространство выделено из единого четырехмерного целого, которое оно составляет вместе с временем. Значит, ответ на вопрос о конечности или бесконечности Вселенной зависит от системы отсчета. Пространство не абсолютно. Не абсолютен и его объем.

Как мы уже сказали, в неподвижной системе отсчета, когда трехмерное пространство выделяется путем сечения световым конусом, объем пространства конечен. В движущейся системе отсчета, связанной с общим космологическим расширением, объем трехмерного пространства может быть как конечным, так и бесконечным.

Конечность объема в одной системе отсчета не исключает бесконечности в другой. Здесь для иллюстрации снова можно воспользоваться геометрическим примером с цилиндром. Если цилиндр бесконечен вдоль своей оси, то в сечении плоскостью может получиться фигура конечной площади, например круг. При сечении бесконечного цилиндра плоскостью, параллельной его оси, получим прямоугольник бесконечной площади. Две эти фигуры представляют собой два разных подпространства бесконечного цилиндра. Одно из подпространств конечно, а другое бесконечно.

Если наша Вселенная не единственна и в мире имеется множество вселенных, вопрос о конечности и бесконечности должен ставиться, очевидно, иначе. Тут требуется новый подход и новое понимание, выходящие за рамки теории Фридмана. Уже для Вселенной в фридмановском смысле ответ на вопрос,



бесконечна ли она, не сводится просто к «да» или «нет». Глубоко нетривиальным окажется, должно быть, и ответ на вопрос о мире. Но пока космология мало что может об этом сказать.

### Будущее

История Вселенной насчитывает 15—18 миллиардов лет. А сколь продолжительно предстоящее ей будущее? Простирается ли оно неограниченно во времени или у будущего тоже есть предел длительности?

Теория Фридмана предлагает четкий рецепт для получения ответа на этот вопрос. Она устанавливает связь между динамикой Вселенной и ее будущим. Динамика же допускает две возможности: либо неограниченное расширение, либо расширение, сменяющееся сжатием. В первом случае время, очевидно, длится неограниченно и не имеет конца. Во втором случае сжатие сменяет расширение через конечное время и само затем продолжается ровно столько, сколько до этого длилось расширение. При сжатии плотность космического вещества возрастает со временем и в определенный момент достигает бесконечно большого значения. Так достигается новая сингулярность. Полное время жизни Вселенной конечно, и в этом случае шкала времени ограничена. Она заключена в пределах между двумя сингулярностями, начальной и конечной.

Теория указывает нам, как определить судьбу Вселенной по современным ее чертам. Что же нужно наблюдать и измерять, чтобы узнать будущее?

Мы уже говорили (в предыдущей главе), что космологическое расширение — это движение против силы тяготения. С точки зрения механики в нем много общего с движением подброшенного вверх мяча или запущенной в космос ракеты. Мяч, взлетев на какую-то высоту, падает затем на землю. Это означает, что его начальная скорость невелика и тяготение берет над ней верх, возвращает тело назад. Начальная скорость ракеты может быть большой, и если она превышает некоторое значение — вторую космическую скорость, то ракета сможет навсегда оторваться от Земли и уже никогда назад не вернется. Чтобы оторваться от Земли, ракете нужна большая скорость, а большая скорость — это большая кинетическая энергия. Для отрыва от Земли кинетическая энергия должна превышать энергию тяготения, связывающего ракету с Землей.

То же и с галактиками: все дело в их кинематической энергии. Достаточна ли она, чтобы преодолеть действующее на галактику тяготение? О кинематической энергии можно судить

по наблюдаемым скоростям разбегания галактик. А об энергии тяготения — по массам, создающим притяжение. Массы же определяются плотностью космической среды. Чем больше плотность, тем сильнее тяготение.

Так что для нахождения динамики Вселенной, а с ней и продолжительности будущего, нужно уметь измерять скорости галактик и плотность космической среды. Первое не составляет большого труда: о скоростях мы судим по закону Хаббла. Постоянная Хаббла, правда, определена не слишком точно. Но в действительности гораздо больше неопределенности в плотности. В этом главная трудность задачи.

Плотность не поддается непосредственному определению, мы судим о ней по косвенным признакам. Например, по яркости излучения далеких галактик и скоплений.

Подсчитывая галактики в больших объемах (размером 300 миллионов световых лет и более), содержащих много галактик и скоплений, находят их среднюю концентрацию в пространстве. А зная массы галактик, можно оценить и среднюю плотность вещества в таких объемах. По современным данным эта плотность составляет  $3 \cdot 10^{-28}$  кг/м<sup>3</sup>.

Правда, астрономические оценки масс не очень надежны. Задача осложняется тем, что помимо светящегося вещества самих галактик в пространстве вокруг них существуют, по-видимому, значительные массы вещества, наблюдать которые непосредственно не удастся. Это скрытые массы, о которых мы уже упоминали, когда говорили о невидимых коронах галактик



Изменение расстояний в расширяющемся мире: 1 — неограниченное расширение, 2 — расширение, сменяющееся сжатием

(см. главу 10). Скрытые массы проявляют себя только тяготением, которое сказывается на движении галактик в группах и скоплениях. По этим признакам оценивают связанную с ни-

ми среднюю плотность, и не исключено, что она может быть в 5—10 раз больше усредненной плотности галактик.

Большинство специалистов склоняется к тому мнению, что даже с учетом скрытых масс космическая плотность еще не достаточна, чтобы остановить разбегание галактик. Но, конечно, окончательное решение и последнее слово принадлежат не большинству, а более точным измерениям. И остается надеяться, что когда-нибудь они станут, наконец, возможными.

Для всех, вместе с тем, очевидно, что нет веских причин, чтобы полностью исключить и более высокую оценку космической плотности, которая означала бы смену расширения сжатием. Если остановка расширения и произойдет, то не раньше чем еще через 5—10 миллиардов лет. При этом полный «жизненный цикл» Вселенной составил бы примерно 30—60 миллиардов лет.

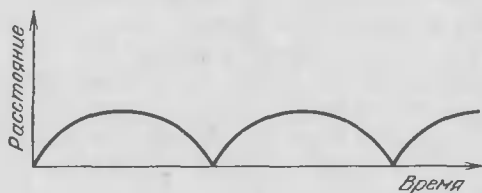
Стоит сравнить последнюю величину с предсказываемой физикой продолжительностью жизни Солнца. Оно может еще светить с нынешней мощностью не меньше 10 миллиардов лет. Так что если Вселенной предстоит в дальнейшем перейти от расширения к сжатию, наше дневное светило до этой поры вполне может дожить в более или менее неизменном виде.

### Пульсации и связь времен

Теоретическая возможность новой сингулярности в будущем Вселенной послужила основанием для предположения о том, что начальная сингулярность, с которой началось космологическое расширение, была в то же время и заключительным событием в прежнем «цикле жизни» Вселенной. И все ее существование — это череда циклов расширения и сжатия. Такую гипотезу развивает советский физик академик М. А. Марков.

Предполагается, что Вселенная способна пройти, так сказать, сквозь сингулярность при сжатии и родиться вновь. Родившись, она начинает расширяться, а пройдя максимум расширения, начинает сжиматься, достигает новой сингулярности, проходит через нее и т. д. Будущее такой осциллирующей, или пульсирующей, Вселенной измеряется неограниченным, бесконечным числом космических жизненных циклов, последовательно сменяющих друг друга. Неограниченно и бесконечно также и прошлое осциллирующей Вселенной; нынешнее расширение — отнюдь не первое в общей ее истории. В беспредельно далекое прошлое уходит череда уже происшедших пульсаций; беспредельно большое их число предстоит и в будущем.

Но «помнит» ли Вселенная о том, что было с ней раньше, хотя бы в предыдущем цикле расширения — сжатия? М. А. Марков полагает, что в сингулярности Вселенная испытывает полное обновление и очищение. В этом «чистилище»

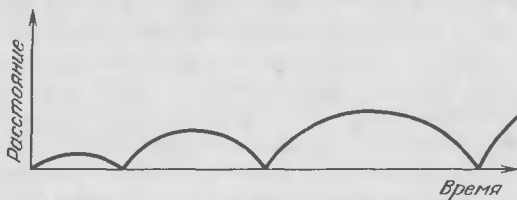


Осциллирующая Вселенная

все следы прошлого безжалостно стираются. Вселенная рождается каждый раз, ничего не помня о былом.

Если так, то, наблюдая очередной цикл в жизни Вселенной, мы не увидим в нем ничего, что говорило бы о ее предыдущих циклах. При этом, пожалуй, вряд ли можно говорить о непрерывном и простирающемся неограниченно в прошлое и будущее течении времени. «Связь времен» прерывается в каждой из следующих друг за другом сингулярностей. Так что каждый новый цикл — это новая жизнь Вселенной с новым ее временем.

В современной космологической модели осциллирующей Вселенной можно уловить нечто общее с тем взглядом на время, которого держались Платон и другие мыслители Древней Греции. У них время тоже было цикличным; оно бежало по кругу и один его цикл не отличался от другого. Продолжительность цикла, называвшаяся тогда «великим годом», оценивалась в 30 тысяч лет. В нынешнем своем воплощении «великий



Пульсации с увеличением размаха

год» гораздо длиннее — до 30–60 миллиардов лет, а то и больше.

Теоретически мыслим и другой вариант пульсирующей Вселенной: он допускает последовательное увеличение размаха ос-

цикляций от цикла к циклу. В этом случае циклы отличаются друг от друга, и амплитудой своего расширения они указывают номер очередного цикла. Такая Вселенная «помнит» всю свою предысторию, сколь бы далеко (даже бесконечно далеко) в прошлое она ни уходила. Настоящее не теряет в этом случае сплошной связи с прошлым; время непрерывно продлевается сквозь сингулярности от цикла к циклу.

Но как выбрать между этими мыслимыми вариантами эволюции Вселенной? Между этими моделями прерывистого и сплошного времени? Только проверка в эксперименте или наблюдении может принести подтверждение или опровержение теоретической идеи.

Увы, об этом мы мало что можем сейчас сказать. Спустя 25 веков после Платона мы все еще не знаем, какой эксперимент, какое наблюдение нужно поставить, чтобы узнать, действительно ли время Вселенной бежит по кругу. Это только один из многих вопросов о мире и времени, над которыми люди размышляют веками и тысячелетиями — со времен «Ригведы» и космогонических легенд до нашего века точных наук.

## ГЛАВА 12

### ВРЕМЯ И ЭНЕРГИЯ

В физике различают три области исследований в соответствии с размерами изучаемых тел и продолжительностью происходящих с ними изменений. В предыдущих главах мы коснулись астрофизики и космологии; вместе они составляют одну из этих трех областей физики: ее предметом являются самые крупные по размеру физические тела — галактики, их скопления, Вселенная как целое. Размеры видимой Вселенной оцениваются приблизительно в 10–15 миллиардов световых лет. В переводе на метры это составляет величину порядка  $10^{26}$  метра. Что же касается продолжительности процессов, охватывающих всю Вселенную, то о ней можно судить по промежутку времени, за который расстояния между галактиками удваиваются вследствие космологического расширения. Он составляет примерно 15–18 миллиардов лет. Столько же приблизительно времени прошло от начала расширения.

Другая крайняя область размеров и длительностей — физика самых малых тел природы, элементарных частиц. Размер протона или нейтрона порядка  $10^{-15}$  метра. Размер электрона не больше  $10^{-18}$  метра; каков он в действительности, точно не известно, и приведенная величина — только верхний предел, установленный в недавних экспериментах. Это наименьшее

пространственное расстояние, наименьшая длина, доступная существующим сейчас экспериментальной технике, физическим инструментам и приборам. Свет, движущийся со скоростью 300 тысяч километров в секунду, проходит такое расстояние за время порядка  $3 \cdot 10^{-27}$  секунд. Этот невообразимо короткий промежуток служит мерой наименьших длительностей, изучаемых в физическом эксперименте. О мире элементарных частиц и их взаимодействиях часто говорят как о микромире.

Интервал от самого малого до самого большого охватывает, как мы видим, 44 порядка (то есть степеней десяти) на физической шкале размеров. Интервал времени на шкале длительностей столь же велик. Эти крайние размеры и длительности очерчивают пределы научного знания, пространственно-временные границы современной физической науки. На этих рубежах и ведется сейчас ее дальнейшее наступление. Здесь происходит раскрытие принципиально новых и самых глубоких закономерностей природы. Поэтому астрофизику (с космологией) и физику микромира называют фундаментальными областями физики.

«Между» этими двумя областями располагается «обычная» физика, изучающая тела «обычных» размеров, с которыми мы имеем дело в нашей повседневной жизни. Эти тела не слишком сильно (не на много порядков) отличаются по размерам от нас самих, а происходящие с ними явления разыгрываются за времена, не слишком сильно отличающиеся от нашего собственного возраста. В этой области размеров и длительностей принципиальных загадок для физики уже не осталось: здесь действуют хорошо известные и надежно проверенные общие законы, и никаких неожиданностей — фундаментального, принципиального порядка — быть не может. Это и есть область классической физики, классической механики. О ней говорят так же, как о физике макромира.

В этой главе мы расскажем о том, как в физике, в трех ее областях, установлены и изучаются глубинные связи между свойствами времени и самой важной характеристикой физических тел и их взаимодействий — энергией. Мы начнем с классической механики, затем обратимся к космологии и общей теории относительности и, наконец, остановимся на физике микромира с ее особыми квантовыми закономерностями.

При всем огромном разнообразии явлений, происходящих в очень сильно различающихся между собой масштабах пространства и времени, физический мир представляет собой единое целое. И изучающая его наука тоже в идеале должна быть единой и универсальной. В своих фундаментальных областях

физика развивается сейчас именно в направлении объединения, в направлении поиска единства самого большого и самого малого.

### Симметрия времени

Одно из неотъемлемых свойств времени в классической механике — его однородность, то есть одинаковость, неразличимость и равноправность всех его моментов (см. главу 4). Это свойство именно самого времени, а не того, что в нем происходит. Зажигаются и гаснут звезды, возникают и разрушаются планеты, зарождается жизнь, сменяются поколения — абсолютное время ко всему этому безразлично. Мир физических тел претерпевает многообразные изменения, но само абсолютное время на эти изменения никак не реагирует. В ходе инерциальных часов каждое «тик-так» неотличимо от всех остальных.

Однородность времени, как и однородность и изотропия пространства, представляют собою их свойства симметрии. Слово *симметрия* по-гречески значит *соразмерность*. Мы говорим о симметрии городской площади или здания, о симметрии узора на ковре, о симметрии кристалла. В этих случаях мы имеем дело с симметриями в пространстве: пространстве города, ковра или какого-то минерала. Но в городе, на ковре или в образце минерала нет однородности. Это примеры иных симметрий. А пример однородности — прямое как стрела шоссе, без подъемов и спусков, всюду одинаковое по ширине, по гладкости и т. д. Все участки такого идеального шоссе одинаковы, неразличимы и равноправны. Если на этом шоссе устраивать автогонки, то все равно, в каком месте давать старт. Результат гонок от этого никак не будет зависеть. Их ход и результат безразличны к тому, где проведут черту старта: здесь или сдвинут ее по шоссе в ту или другую сторону. Однородность — это сдвиговая симметрия, симметрия относительно сдвигов.

Согласно определению, предложенному знаменитым математиком Германом Вейлем, объект является симметричным, если над ним можно произвести некоторые операции, в результате которых он будет выглядеть точно так же, как и прежде. Идеальное шоссе — это объект, который никак не изменяется при сдвигах вдоль него.

Таким же однородным, как идеальное шоссе, является абсолютное время классической физики. Оно обладает симметрией относительно сдвигов момента, принимаемого за начальный. Это означает, что все равно, какой из моментов принять за начало счета времени, за его старт. С какого момента ни от-

считывать время, полагать ли начальным какой-то данный момент или сдвигать «нуль времени» вперед — в будущее, или назад — в прошлое, все равно отрезок времени между двумя определенными событиями будет одним и тем же. Его длительность от этого не зависит. От этого вообще ничего не зависит — ни один из результатов физических наблюдений, опытов и т. п.

В абсолютном времени нет никакого выделенного, особенного момента, который мог бы претендовать на исключительное право считаться начальным, стартовым моментом. Да и вообще на какие-либо особые права. Все моменты одинаковы — потому-то одинаковы и результаты одних и тех же физических экспериментов, проделываемых в разное время. Это подтверждается всем опытом классической физики.

Физические процессы идут одинаково, и их результат один и тот же, когда бы они ни начались — сейчас, через год или. быть может, миллиард лет назад.

То же можно сказать и о пространственных симметриях. В пространстве классической физики нет ни каких-то выделенных точек, ни выделенных направлений. Все точки, все направления одинаковы и равноправны, и потому физические эксперименты, проделываемые в разных местах и при различной ориентации приборов по направлениям, дают одни и те же результаты. Однородность пространства — это его симметрия относительно всевозможных сдвигов. Изотропия — симметрия относительно всевозможных поворотов, вращений вокруг всевозможных осей в пространстве.

### **Вечный двигатель**

Одно из незыблемых законов классической физики — закон сохранения энергии. Если некоторая система тел изолирована от всех других тел и никак с ними не взаимодействует, то энергия этой системы не меняется со временем, остается всегда одной и той же. Она может только переходить из одной формы в другую при разнообразных превращениях внутри системы. Например, кинетическая энергия переходит в потенциальную и наоборот, как это известно по примерам свободного падения тел в поле тяготения.

Если же система взаимодействует с другими телами, то ее энергия может измениться, но всегда так, что сколько энергии она получит (потеряет), столько же ее потеряют (получат) эти другие тела.

Закон сохранения энергии был выведен в XVII веке из многочисленных экспериментов с различными движущимися



телями. Слово *энергия* образовано от греческого корня, имеющего значение *действие*. Энергия служит общей количественной мерой всех видов механических движений и взаимодействий тел в природе. К середине XIX века закон сохранения энергии был распространен и на механические явления, прежде всего тепловые. В термодинамике этот закон называют первым началом, указывая тем самым на его важнейшее значение.

Классическая физика позволила дать закону сохранения механической энергии точную математическую формулировку. Этот закон с неизбежностью вытекает из классических законов движения Ньютона. Закон сохранения механической энергии один из строгих законов механики — он запрещает, категорически исключает какие бы то ни было ее нарушения или отклонения от него. В частности, он безусловно запрещает вечный двигатель — машину, черпающую энергию из ничего. Эту извечную мечту фантазеров-изобретателей, которые, как ни странно, не перевелись и до сих пор и растрачивают время, силы и ум ради безнадёжной цели.

Закон сохранения энергии вносит в вечно меняющийся мир физических явлений черты прочности, устойчивости. В нем всегда ощущалось нечто неколебимое, опирающееся на самый глубокий фундамент природы. Над его внутренней причиной немало размышляли во все времена.

Ответ был дан лишь в 1918 году немецким математиком Эмми Нётер. В своих исследованиях она опиралась на классическую механику, ограничиваясь ее рамками. (Обратим внимание на дату: к 1918 году появилась уже теория относительно-сти, обобщившая классическую механику.)

Что же оказалось? Оказалось, что энергия сохраняется по той причине, что время обладает симметрией, что оно однородно. Это неотъемлемое свойство абсолютного времени, и потому закон сохранения энергии обладает такой непререкаемой властью.

Выясняется, таким образом, что закон сохранения энергии — это следствие не механики вообще, а именно той концепции времени, которую она принимает. Закон сохранения доказывается с непреложной силой, с какой доказываются теоремы геометрии. Кстати, утверждение о связи сохранения энергии с однородностью времени и называют теоремой Нётер.

Точнее, так называют более общее утверждение, которое устанавливает также связи между другими законами сохранения и симметриями — но уже не времени, а пространства. Однородность пространства влечет за собой закон сохранения важной механической величины — импульса, или количества

движения. А из изотропии пространства вытекает закон сохранения другой, не менее важной величины — момента импульса, или момента количества движения\*).

Итак, вечный двигатель запрещен свойствами времени — он невозможен, ибо время однородно.

Но что было бы в нашей жизни в противном случае, если разные моменты времени или целые периоды времени, сравнимые по длительности с нашим возрастом, стали бы неодинаковыми, различными между собой? Тогда и законы природы были бы разными в разное время. Да и можно ли было бы в таком случае вообще обнаружить эти законы, если они сегодня одни, а завтра совсем другие? При таких обстоятельствах ничто нельзя было бы предсказать на будущее, ничего нельзя было бы предвидеть, планировать и осуществлять — в мире воцарился бы хаос. Что же касается энергии, то она вполне могла бы тогда непредсказуемым образом куда-то исчезать или неожиданно появляться из ничего. Вечный двигатель был бы возможен, но невозможен был бы весь привычный нам физический мир.

Как мы уже говорили, закон сохранения энергии открыт в результате обобщения опытных данных. Затем он получил теоретическое обоснование в классической механике. Наконец, было вскрыто его внутреннее содержание, восходящее к свойству симметрии времени. Это три доступных современной физической науке уровня понимания явлений природы; и уровень симметрии — самый глубокий из них, самый фундаментальный.

То же можно сказать и о двух других механических законах сохранения — импульса и момента импульса, которые связаны с симметриями пространства. И они были найдены сначала из опытов, затем обоснованы теорией и, наконец, поняты как следствия соответствующих симметрий.

Достоин удивления и размышлений, что из симметрии пространства вытекает существование физических величин, которые не подвластны ходу времени. За этим кроются внутренние связи между временем, пространством, движением; природа этих связей, занимавшая людей еще во времена Зенона Элейского (вспомним главу 2), до сих пор остается еще далеко не раскрытой.

---

\*) Напомним, что импульс движущего тела есть произведение его массы на скорость движения. Пример движения с моментом импульса можно видеть, наблюдая движение тела по круговой орбите; в этом случае момент импульса есть произведение массы тела на его скорость и радиус орбиты.

## Как быть с энергией тяготения?

Известно, что первые указания на закон сохранения энергии следовали из наблюдений Галилея (в 1638 году) за движением тел под действием тяготения. В этом случае, как знает теперь каждый хороший школьник, сохраняется полная механическая энергия тела — сумма его кинетической энергии и потенциальной энергии тяготения. Когда мы подбрасываем вверх мяч, мы сообщаем ему кинетическую энергию, и при движении вверх, по мере увеличения высоты подъема, кинетическая энергия убывает, но возрастает потенциальная энергия тяготения. В высшей точке подъема кинетическая энергия равна нулю, а потенциальная энергия максимальна. За подъемом следует падение тела и тогда, наоборот, потенциальная энергия тяготения переходит в кинетическую; последняя возрастает, так как тело падает с ускорением и его скорость растет со временем.

В такого рода рассуждениях мы опираемся на классическую механику и ньютоновский закон тяготения. А как обстоят дела в общей теории относительности, которая представляет собою обобщение классической механики вместе с законом тяготения?

Как это ни покажется на первый взгляд странным, обобщить закон сохранения энергии, дать его новую, более общую формулировку, подходящую для всех случаев, общая теория относительности не может. Препятствие возникает из-за того, что в полную энергию нужно включать, как и в классической механике, энергию тяготения. Но как вычислять энергию тяготения в общем случае, когда имеются тела, движущиеся в искривленном их собственным тяготением пространстве-времени, неизвестно. Точнее говоря, энергию тяготения не удастся определить и вычислить однозначным образом: можно предложить несколько различных рецептов вычисления, каждый из которых как будто разумен. Но все они ведут к различным результатам. Однозначно определить энергию можно лишь тогда, когда на больших расстояниях от тяготеющих масс пространство-время является неискривленным (как в специальной теории относительности). С другим, совсем особым примером, мы еще познакомимся чуть позже — это слабые гравитационные волны.

В вычислении энергии тяготения нужно каким-то образом учитывать не только потенциальную энергию тел, но еще и энергию самого поля тяготения. Поле же тяготения проявляется в общей теории относительности как искривление четырехмерного пространства-времени. Так что и самому про-

пространству-времени приходится приписывать энергию, только неизвестно, как именно это делать.

Выходит, что энергия тяготения, подсказавшее когда-то закон сохранения энергии, теперь его же и разрушает. Ведь если энергия тяготения не определена однозначно, то, значит, нет и закона сохранения энергии.

Это затруднение в общей теории относительности — не просто какое-то вычислительное препятствие, которое пока что не удастся преодолеть. В этом, скорее всего, отражается нечто принципиальное. Действительно, в общей теории относительности время уже не абсолютно, как в классической механике. А раз так, оно совсем не обязано обладать однородностью — симметрией, которая порождает, по теореме Нётер, закон сохранения энергии. Если время в общем случае неоднородно, то в общем случае нет и закона сохранения энергии.

А время и в самом деле не обязано быть всегда и везде однородным. Как мы знаем, на его темп влияют физические условия, которые, вообще говоря, различны и в разных местах пространства, и в разные моменты времени. Это способно создавать неравноправность, неэквивалентность различных моментов, а с ними, следовательно, и неоднородность самого времени.

Обратимся к космологии. Начальная сингулярность, о которой мы говорили в главе II, представляет собой особый, резко выделенный момент времени. Это естественный «нуль времени», и никак нельзя сказать, что другие моменты времени с ним равноправны. Но в неоднородном времени нет сохранения энергии — она просто не обязана сохраняться. Поэтому и начало космологического расширения, самый его старт, совсем не обязательно подчиняется закону сохранения энергии. То же относится и к сингулярности в будущем, если она допускается в конце процесса сжатия, способного сменить наблюдаемое сейчас расширение. «Уход» в эту конечную сингулярность тоже не обязан происходить с сохранением энергии.

Конечно, космологические сингулярности и иные возможные случаи неоднородности времени находятся очень далеко от «обычной» физики, от нашего непосредственного окружения. И вряд ли стоит специально предупреждать кого-либо, что общая теория относительности не отменяет запрета на вечный двигатель, который действовал бы в «обычных» условиях.

Итак, закон сохранения энергии поколеблен. Он лишился своей абсолютной универсальности. Но нужно помнить, что он покоился на концепции абсолютного однородного времени.

А для нее, как мы хорошо теперь понимаем, нет никаких оснований.

Выше мы упомянули о хаосе, который воцарился бы в нашей жизни, не будь закона сохранения энергии. В жизни Вселенной закона нет. Законы природы не обязаны быть одинаковыми во все времена. Но это не означает всеобщего хаоса в мире. Ведь эти законы изменяются не произвольно: существуют «законы изменения законов природы». Общая теория относительности дает этому замечательный пример.

И тем не менее крушение закона сохранения энергии оставляет равнодушными далеко не всех; примириться с этим не просто. Некоторые теоретики переживают этот факт столь остро, что даже решаются на возврат к абсолютному времени или, вернее, к абсолютному пространству-времени, как в специальной теории относительности. При таком подходе общая теория относительности заменяется другой теорией, в которой вместо искривленного пространства-времени вводится поле тяготения, существующее в неискривленном абсолютном пространстве-времени специальной теории относительности. В идейном плане это, конечно, шаг назад по сравнению с общей теорией относительности. Но и, так сказать, в практическом смысле преимущества подобного подхода не очень ясны. Здесь еще спорить и спорить...

### Кванты, волны, частицы

Общая теория относительности царит в той области физики, которая имеет дело с самыми большими телами природы и со всей Вселенной. В другой, противоположной ей по масштабам области фундаментальных исследований, в физике микромира, господствует другая великая физическая теория XX века — квантовая теория. Она открыла новую, неожиданную грань взаимоотношений между временем и энергией. Это один из самых замечательных ее успехов, создавших основу для дальнейших достижений физики, а вслед за ними и техники наших дней.

Квантовая теория зародилась в 20-е годы, чуть позже теории относительности. Она возникла из стремления понять устройство атома, осмыслить законы его излучения. И прежде всего тот факт, что атомы излучают энергию не непрерывно, а отдельными порциями, квантами.

Другой не менее важный факт касается собственного поведения квантов света, излучаемых атомами. В своем движении, а также и при взаимодействии с другими атомами и частицами они проявляют два, казалось бы, несовместимых свойства. Они

ведут себя. в зависимости от конкретных условий, то как электромагнитные волны, то как особые частицы. Стоит заметить, что тем самым получил разрешение давний спор в физике между теми, кто считал свет волнами (Гюйгенс), и теми, кто рассматривал его как поток частиц, корпускул света (Ньютон). Можно. оказывается, увидеть в свете и то и другое — он обладает свойствами и волн, и частиц. Кванты света получили специальное название фотонов.

Единство волновых и корпускулярных свойств обнаруживают не только фотоны, но также электроны, протоны, нейтроны — все частицы микромира и все физические поля. Каждой из частиц соответствуют свои особые волны, волновые поля, не сводящиеся к электромагнитным. А всем физическим волновым полям соответствуют свои частицы.

Вот экспериментальный пример двойственности свойств электрона. Пучок электронов определенной энергии направляется на кристалл, за которым ставится фотопластинка. Пройдя сквозь кристалл, электроны создают на фотопластинке типичную дифракционную картину с правильным чередованием светлых и темных колец (или полос). Эту картину нельзя понять иначе как на основе волновых представлений: она возникает из-за наложения волн, рассеянных каждым атомом кристалла.

Но с другой стороны, уже выйдя из кристалла, каждый отдельный электрон попадает на фотопластинку и дает почернение только в одном месте, в одном зерне фотоэмульсии. Значит, электрон ведет себя по-разному при взаимодействии с кристаллом и при взаимодействии с фотопластинкой. Когда происходит рассеяние на кристалле, он подобен волне, имеющей какое-то протяжение в пространстве, и охватывает сразу много атомов кристалла. А при попадании на зерно эмульсии он действует как более или менее «точечная» частица, находящаяся строго в пределах этого зерна.

Конечно, такая двойственность свойств означает, что объекты микромира не являются в действительности ни волнами, ни частицами в обычном понимании. Они представляют собою нечто третье, чему в нашем повседневном опыте нет никакого подобия. И прежняя доквантовая физика «обычных» тел и «обычных» волн никаких такого рода двойственных свойств не знала.

Поведение микрочастиц регистрируется нашими приборами, которые сами являются «обычными» телами. И потому, извлекая сведения о микрочастицах, приборы сообщают нам результат измерения на одном из тех двух «языков», которые им только и доступны — либо на языке волн, либо на языке ча-

спец. Дополняя результаты эксперимента, в котором данная микрочастица проявляла себя, скажем, как волна, результатами другого эксперимента, в котором она проявляла себя как частица, можно составить полную картину свойств этого объекта.

В каждом отдельном эксперименте микрочастица раскрывает себя не полностью. Но дело не сводится только к этому. Даже когда микрочастица проявляет себя, например, как частица, в ее поведении остается еще немало необычного. В классической механике состояние движения данной частицы полностью описывается и определяется двумя физическими величинами — координатой частицы в пространстве и ее скоростью (или импульсом). Для каждого момента времени координата и скорость имеют конкретное, вполне определенное значение\*). В микромире это, как оказывается, совсем не так. Микрочастица не может иметь сразу определенное значение координаты и определенное значение скорости (или импульса) — только одно из двух. Если определена координата, то скорость остается неопределенной. Если определена скорость, то неопределенной будет координата, и в этом последнем случае частица уже не может считаться точечной.

Именно эта особенность поведения микрочастиц обеспечивает существование атомов. Представим себе, что электроны двигались бы в атоме наподобие «обычных» частиц — по орбитам вокруг ядра, подчиняясь законам классической механики, как планеты вокруг Солнца. Поскольку такое движение не является равномерным и прямолинейным, каждый электрон должен — по законам классической электродинамики — излучать электромагнитные волны. При этом он терял бы свою энергию на излучение волн, и его орбита скручивалась из-за этого в спираль. По такой спирали он очень скоро должен был соскользнуть к ядру и упасть на него. Тогда и атом, любой атом в мире и все они вместе прекратили бы свое существование.

Но атомы существуют, и все дело в том, что электроны и атомы представляют собою не «обычные» частицы, а частицы микромира, подчиняющиеся особым квантовым закономерностям. Квантовая теория запрещает электрону «классическое» поведение, она не позволяет ему упасть на ядро, ибо в противном случае он имел бы сразу и определенное значение скорости (равное нулю в системе отсчета, связанной с ядром),

---

\*) Нас интересует не внутреннее устройство частицы, а только ее движение как целого. Поэтому, как принято в классической механике, мы можем считать ее точечной, рассматривать как *материальную точку*.

и занимал бы определенное положение (в самом центре атома). Атомы существуют, ибо скорость (импульс) и координата электрона не могут одновременно иметь определенное значение.

### Соотношение неопределенностей

Микрочастица по своей природе не является ни волной, ни частицей, но только похожа на волну или частицу в том или ином из своих проявлений — в эксперименте, в любых обстоятельствах ее жизни. Когда она движется, взаимодействует с другими частицами и полями и т. п. Если в какой-то ситуации микрочастица больше похожа на «обычную» частицу, большую определенность приобретает ее положение. Если же она больше похожа на «обычную» волну, большую определенность приобретает ее импульс. А в самом общем случае у нее нет точной, строгой определенности ни в положении, ни в импульсе. Это означает, что, хотя мы и можем характеризовать микрочастицу по классическому образцу координатой и импульсом, их значения, вообще говоря, остаются не вполне определенными. При этом чем точнее определена одна величина, тем больше неопределенности в другой. (Это отчасти видно уже и из предыдущего).

Такое соотношение определенности и неопределенности можно, как оказывается, выразить количественно. Для этого в квантовой теории вводят специальные величины, дающие меру неопределенности в значении импульса или координаты. Если говорят, что координата заключена в пределах от  $x$  до  $x + \Delta x$ , то величина  $\Delta x$  и указывает, очевидно, неопределенность в значении координаты. Точно так же, если говорят, что импульс заключен в пределах от  $p$  до  $p + \Delta p$ , то величина  $\Delta p$  характеризует неопределенность в значении импульса.

Теория и многочисленные эксперименты показывают, что неопределенности в координате и импульсе связаны между собой следующим образом: произведение  $\Delta x$  на  $\Delta p$  всегда не меньше некоторой постоянной величины. Это одинаковая во всех случаях универсальная величина носит название постоянной Планка — по имени одного из основоположников квантовой теории, немецкого физика Макса Планка (1858—1947). Ее числовое значение в Международной системе единиц (СИ) равно  $6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Постоянная Планка служит количественной мерой всех физических явлений в микромире.

Связь между неопределенностями, выражающаяся через величины  $\Delta x$ ,  $\Delta p$  и постоянную Планка, называется соотношением неопределенностей. Оно было открыто в 20-е годы наше-



го века немецким физиком Вернером Гейзенбергом (1901–1976).

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет глубокое физическое содержание. Оно находит выражение не только в строении атома, в устойчивости его существования, в тех или иных экспериментах по рассеянию электронов. Оно дает ключ к пониманию того, как вообще ведет себя элементарная частица в пространстве: когда она выступает как точечная масса, а когда — как волна.

### Время против энергии

А как ведет себя микрочастица во времени? Отличается ли она от «обычной» частицы классической физики и в своем временном, а не только пространственном поведении?

Да, у частиц микромира свои, особые взаимоотношения с временем. К этому мы и переходим сейчас после (по необходимости краткого) вводного рассказа о мире квантовых явлений.

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса — только одна из закономерностей в микромире. Другое важнейшее соотношение затрагивает время. Оно тоже связывает две неопределенности: неопределенность во времени и неопределенность в энергии.

Представим себе, что электрон вылетел, например, с поверхности катода электронной лампы и двигался сначала беспрепятственно, ничего не встречая на своем пути. Пусть затем он налетел на какой-то атом или другой электрон, столкнулся с ним и, отскочив, полетел дальше. Будь электроны и атомы «обычными» частицами, мы могли бы описать это происшествие подобно, например, столкновению бильярдных шаров. Мы могли бы тогда рассматривать столкновение как некоторое механическое взаимодействие, в результате которого наш электрон изменил направление движения и свою кинетическую энергию. Мы могли бы точно сказать, в какой момент произошло взаимодействие и как именно изменилась энергия электрона.

Но электроны и атомы — квантовые объекты, и такое описание для них невозможно. Момент столкновения и изменение энергии, происшедшее в результате него, определены не вполне точно. Здесь возникает неустранимая квантовая неопределенность. И нужно говорить так: взаимодействие произошло между моментами времени  $t$  и  $t + \Delta t$ . А энергия изменилась на величину, лежащую в пределах от  $E$  до  $E + \Delta E$ . Неопределен-

ность в моменте взаимодействия дается величиной  $\Delta t$ , а неопределенность в энергии — величиной  $\Delta E$ .

Между неопределенностью во времени и неопределенностью в энергии существует связь: произведение  $\Delta t$  на  $\Delta E$  не меньше постоянной Планка.

Мы сформулировали это новое соотношение неопределенностей в таком общем виде, чтобы оно годилось и для конкретного примера, с помощью которого мы к нему подошли, и для любой другой ситуации в микромире, затрагивающей время и энергию. Оно действительно имеет самый общий, универсальный характер, действует всегда и везде и не допускает исключений. Вместе с другими соотношениями неопределенностей это одна из самых глубоких связей в микромире. Соотношение неопределенностей для времени и энергии указывает на характер поведения микрочастиц во времени, на роль времени в микромире. Оно с новой стороны раскрывает для нас физику времени.

Время оказывается «сцепленным» с энергией. Повторяя то, что говорилось о координате и импульсе, мы можем сказать: чем точнее определена одна из этих величин, тем больше неопределенности в другой. Из этого вытекает множество важнейших следствий, выявляющих самую природу микромира и разыгрывающихся в нем явлений. Одно из таких следствий касается закона сохранения энергии.

В микромире, как мы уже знаем, многое происходит не так, как в привычном нам мире классической физики. И не будет, наверное, ничего особенно неожиданного в том, что даже столь универсальный закон физики, как закон сохранения энергии, принимает в микромире совсем особенный характер. Здесь он перестает быть абсолютно строгим. Действительно, если само значение энергии не вполне определено, то что же остается закону сохранения — он тоже становится не вполне определенным, не вполне точным. О сохранении энергии мы можем судить лишь с неустранимой квантовой неопределенностью.

Закон сохранения энергии в микромире выполняется — но не строго, а с точностью до квантовой неопределенности. Или иначе: закон нарушается, но лишь в меру этой неопределенности.

Неопределенность в энергии тем больше, чем быстрее происходят какие-либо изменения или взаимодействия, претерпеваемые микрочастицами, их системами, физическими полями в микромире. Быстрое изменение означает меньшую неопределенность во времени, за которое (или в которое) произошло данное событие. Английский физик Р. Э. Пайерлс, объясняя

то в одной из своих статей, предложил шутливое сравнение с нечестным кассиром. Этот жулик берет деньги «взаймы» из казенной кассы. Маленькую сумму он может позаимствовать надолго без особенного риска попасться. А большую сумму — только на короткий срок.

Вспомним, что сохранение энергии в классической механике вытекает, по теореме Нётер, из однородности времени. Можно заметить, что между этой теоремой и соотношениями неопределенностей квантовой теории имеется очевидное соответствие. В обоих случаях выявляются связи между некоторыми физическими величинами, и эти величины и здесь и там выступают парами. Одна известная нам пара, если назвать ее коротко, — это «пространство — импульс». Другая — «время — энергия». В этом соответствии классической и квантовой теории проявляется единство физического мира и внутренняя связанность, согласованность и соответствие описывающей его физической науки.

### Не сохраняется, но...

В следующей главе мы снова вернемся к взаимоотношениям между временем и энергией в микромире. А сейчас зададимся таким вопросом: нельзя ли построить квантовый вечный двигатель? Закон сохранения энергии поколеблен: так почему бы не черпать энергию из ничего? Ответ должен разочаровать.

Построить машину «обычных» размеров, которой мы могли бы пользоваться как даровым источником энергии, никогда не удастся. При переходе от масштабов микромира к уровню машин и механизмов все становится на свои места. Для них квантовые эффекты несохранения энергии ничтожны, исчезающе малы.

Сделаем подсчеты на каком-нибудь простом примере. Пусть, скажем, имеется машина с маховиком, который мог бы вращаться и снабжать нас своей энергией через приводные ремни. Допустим, масса маховика 10 килограммов, его диаметр 0,5 метра и вращается он с частотой 1 оборот в секунду. Маховик обладает кинетической энергией, равной приблизительно 1 джоулю. (Такую оценку легко получить по общей формуле, согласно которой кинетическая энергия есть половина произведения массы на квадрат скорости. Масса нам известна, а в качестве характерной скорости можно взять линейную скорость вращения какой-то средней точки на диске маховика. Для нахождения порядка величины такой приближенной оценки вполне достаточно.)

Но сколько энергии можно было бы выиграть за 1 оборот маховика, если квантовый эффект неопределенности энергии «сработает» за это время так, что подтолкнет маховик? Для оценки дополнительной энергии воспользуемся соотношением неопределенностей. В качестве меры неопределенности времени нужно, очевидно, взять время одного оборота — 1 секунду. Оценку неопределенности в энергии получим делением постоянной Планка на 1 секунду. Тогда выигрыш в энергии составит по порядку величины  $10^{-33}$  джоуля. Это ничтожная энергия по нашим «обычным» меркам. По сравнению с кинетической энергией маховика квантовая добавка на 33 порядка меньше. Значит, квантовый эффект несохранения энергии мог бы проявиться лишь в 33-м знаке после запятой в числовом значении энергии. А это много меньше любой погрешности, с которой закон сохранения механической энергии проверяется в реальном эксперименте.

В этом нашем примере мы рассматривали большой маховик с точки зрения квантовой теории, применяя к нему понятия и соотношения из области микромира. А можно ли так вообще поступать? Можно ли переносить понятия и соотношения, установленные в микромире, на тела «обычных» размеров? Квантовая теория применима к телам любых размеров — от электрона до галактики и всей Вселенной. Ее закономерности имеют всеобщий, универсальный характер. Это проявляется в том, что для «обычных» тел квантовая теория, как оказывается, приводит к тем же результатам, что и «обычная» физика, классическая механика. И в нашем примере квантовое рассмотрение с учетом соотношения неопределенностей дало, по сути дела, старый классический результат: столь ничтожное несохранение энергии за счет квантовых эффектов означает фактически сохранение энергии в масштабе «обычных» физических явлений. А новое здесь — это указание на точность, с которой закон сохранения энергии справедлив в данном масштабе явлений. Для мира «обычных» тел эта точность исключительно велика, и потому закон сохранения энергии в нашем непосредственном окружении столь незыблем и строг.

## ГЛАВА 13

### ВОЛНЫ ВРЕМЕНИ

Две великие физические теории нашего века, общая теория относительности и квантовая теория, с самого их возникновения искали точки соприкосновения друг с другом. Одна из этих теорий подходит к физическому миру со стороны

самых больших его масштабов, а другая — со стороны самых малых. Построение единой физической картины мира требует их объединения, синтеза. Эта задача — одна из самых значительных в физической науке наших дней. Пока что она решена еще далеко не полностью. Тем не менее одно замечательное достижение на стыке двух теорий уже имеется. Это квантовая картина гравитационных волн, волн пространства-времени.

Мы расскажем здесь о волнах и квантах тяготения, об их роли в наших представлениях о времени. Мы обсудим затем некоторые общие идеи об особенных свойствах времени в явлениях квантовой природы, развивающихся в микромире и во всей Вселенной.

### Тяготение и волны

О гравитационных волнах с полной уверенностью говорилось уже в первые годы развития общей теории относительности. Эйнштейн доказал, что из этой теории следует их возможность и даже необходимость.

Гравитационные волны — это волнообразные колебания пространства-времени. Они придают ему дополнительную, бегущую волнами искривленность. Эти волны распространяются по четырехмерному миру, подобно тому как упругие звуковые колебания распространяются в воздухе. Еще ближе сходство с электромагнитными волнами: и те и другие в действительности не требуют для своего распространения никакой среды. Электромагнитные волны могут распространяться и в пустоте. А для гравитационных волн «средой» служит само пространство-время: это как бы рябь, бегущая по пространству-времени.

И электромагнитные, и гравитационные волны распространяются с предельной скоростью — со скоростью света. Электромагнитные волны порождаются движением электрических зарядов. А гравитационные волны возникают от перемещения тяготеющих масс. При таких перемещениях изменяется сила тяготения, искривляющая пространство-время. Это изменение и передается, переносится гравитационными волнами — они «отрываются» от движущихся масс и расходятся по четырехмерному миру, как круги на воде от брошенного камня.

Конечно, сравнение гравитационных волн с известными нам волновыми явлениями нельзя понимать слишком буквально. Подобие заходит не так уж далеко. Это волны, как и другие волны в природе, но у них немало особенного, того что есть только у них. В самом деле — это распространяющиеся колебания пространства-времени.

Гравитационные волны пока не удается наблюдать и регистрировать в эксперименте. Очень трудно или даже просто невозможно создать сколько-нибудь ощутимые колебания пространства-времени с помощью лабораторных установок, приводя в движение какие-то, даже пусть и очень массивные, тела. Экспериментаторы надеются прежде всего на гравитационные волны космического происхождения. В последние 10—15 лет для этого строят специальные приемные устройства — гравитационные антенны. Это системы достаточно массивных тел, которые должны испытывать определенного рода деформацию, когда на них падает гравитационная волна. Деформации — исключительно слабые — измеряются датчиками, укрепленными на этих телах. Наиболее чувствительную установку такого рода построили недавно физики Московского университета. Имеются интересные проекты гравитационных антенн совсем особого рода, использующие космические корабли, находящиеся в свободном полете, или даже естественные астрономические тела. Гравитационной антенной может служить, например, система Земля—Луна, если научиться измерять очень слабые изменения в движении этих двух тел.

Что же касается источников гравитационных волн, то ими могут служить мощные космические взрывы, сопровождающиеся перемещением значительных масс. Их могут излучать и просто двойные звездные системы — связанные пары звезд, каждая из которых вращается вокруг общего центра масс системы. Особенно энергично должны излучать тесные пары очень плотных звезд. Например, две нейтронные звезды\*), образующие пару с размером всего в десяток-другой километров. В этом случае орбитальное движение масс, очевидно, должно быть очень быстрым. А потому велика и интенсивность излучения гравитационных волн.

Одна из двойных систем такого рода ведет себя, судя по наблюдениям, именно так, как если бы она действительно интенсивно излучала гравитационные волны. Об этом судят по характеру орбитальных движений звезд в паре. Так как на излучение гравитационных волн тратится часть энергии орбитального движения, меняется и сам вид орбит — они скручиваются спиралью. Такое скручивание орбит, правда, довольно медленное, и было замечено у этой системы. Если наблюдения подтвердятся (а пока что имеются только предварительные данные), можно будет говорить об экспериментальном открытии гравитационных волн.

---

\*) О нейтронных звездах мы уже упоминали, когда говорили в главе 3 о пульсарах — вращающихся нейтронных звездах.

Конечно, такое открытие кажется все же несколько косвенным. Лучше всего было бы уловить их на гравитационных антеннах. Можно надеяться, что это и в самом деле произойдет в недалеком будущем.

Подумаем теперь не о реальном, а о некотором мысленном эксперименте. Как вели бы себя часы, оказавшиеся в поле гравитационной волны? Можно сказать, что на них действует переменное, периодически меняющееся поле тяготения. Согласно общему закону (см. главу 8), это заставляло бы часы периодически замедлять свой ход, когда на них накатывались бы один за другим «валы» — максимумы тяготения в волне\*). Сам ход часов оказался бы при этом волнообразным — мы зарегистрировали бы таким образом волны времени.

Поэт Державин писал:

«Река времен в своем стремленье  
Уносит все дела людей  
И топит в пропасти забвенья  
Народы, царства и царей.»

Если время — река, то в духе этой метафоры можно сказать, что гравитационные волны — это волны на реке времени.

### Гравитон

Еще в 30-е годы советский физик М. П. Бронштейн смело применил к описанию гравитационных волн квантовую теорию. Он исходил из сходства гравитационных волн с электромагнитными волнами, со светом. Двойственная, корпускулярно-волновая природа света была уже установлена. Не могут ли и гравитационные волны обладать такой же двойственностью и обнаруживать как волновые, так и корпускулярные свойства?

Это предположение полностью соответствует духу квантовой теории. И его действительно удалось доказать теоретически. Бронштейн изучал волны не слишком большой амплитуды, в которых колебания искривленности пространства-времени остаются слабыми. Оказалось, что при подходящих условиях гравитационные волны действительно могут вести себя как поток частиц, квантов этих волн. Кванты гравитационных волн получили название гравитонов.

Гравитоны очень похожи на фотоны. Как и фотоны, они движутся всегда и везде со скоростью света. Их масса связана

---

\*) Считаем, что часы закреплены в данном месте и волна не приводит их в движение.

с движением: масса покоя, то есть та масса, которой частица обладает в покое, у них отсутствует.

Различие же между гравитоном и фотоном проявляется, прежде всего, в их взаимодействии с другими частицами. Фотон взаимодействует только с электрически заряженными частицами. Гравитон же взаимодействует, так сказать, со всем и вся без исключения — он представитель всемирного тяготения.

Но вернемся к сходству с фотоном — это сейчас для нас особенно важно. И вот что здесь замечательно: гравитон, как и фотон, обладает энергией. Ее легко оценить. Согласно теории, она равна постоянной Планка, деленной на период волны. Неслучайно, конечно, связь между периодом и энергией имеет тот же вид, что и соотношение неопределенностей «время-энергия»: там тоже энергия (ее неопределенность) получается делением постоянной Планка на время (его неопределенность).

В какой же тесный узел связаны здесь время, пространство, энергия и квантовые эффекты! Выходит, что волны пространства-времени сами обладают энергией. Кстати, для слабых гравитационных волн их энергия, то есть энергия поля тяготения, вычисляется вполне однозначным образом, что, как мы упоминали, сделать в общем случае не удастся. Эта энергия может оказаться собранной в ступки — гравитоны, которые по всем признакам ничуть не хуже других микрочастиц.

Гравитон — первый плодотворный результат будущего синтеза двух великих теорий. В нем отражается нечто очень значительное, может быть, самое что ни на есть фундаментальное в физическом мире.

### Время среди квантов

Пример гравитационных волн и гравитона приводит нас к важному заключению. Он подсказывает, что теория относительности — специальная и общая — еще не все говорит нам о свойствах времени (и пространства). Существование кванта гравитационных волн означает, что есть у времени такие свойства, которые могут быть изучены и поняты только на основе квантовых представлений. Конечно, об этих новых, «квантовых» свойствах времени мы сможем со всей полнотой судить лишь тогда, когда будет окончательно достигнут тот синтез теорий, о котором мы уже упоминали. Пока что нужно стремиться по крайней мере к постановке вопросов — тех главных вопросов о времени квантовых явлений, на которые мы хотели бы получить ответ.

В мире «обычных» тел о каждом «обычном» промежутке времени можно точно сказать, что вот тогда-то он начался,



длился столько-то секунд или часов и тогда-то закончился. Такой промежуток мы можем измерить с помощью часов — если захотим, то весь целиком, а можем измерить и по частям. Эти части могут быть очень малыми, но и каждую из них мы могли бы в свою очередь разделить на еще более мелкие части и любую из этих мелких частей тоже измерить по отдельности.

Классическая механика подразумевает, что процесс деления промежутков времени можно продолжать неограниченно: время считается непрерывным и непрерывно делимым во всех своих физических проявлениях. Измерение любого промежутка можно вести, в принципе, до сколь угодно малых его долей. Практически, конечно, такое дробление времени зависит от точности часов, которыми мы располагаем. Если часы имеют точность не выше секунды, то измерить с их помощью промежуток, равный 0,1 секунды, не удастся. Потребуется более совершенные часы. Точность атомных часов, о которых мы говорили в главе 3, гораздо выше; она колоссальна, но все же не беспредельна, а вполне четко ограничена.

Теория относительности — специальная и общая — заимствует из классической физики представление о непрерывном и беспредельно делимом времени. Многие другие в понимании времени она резко меняет, но это его свойство сохраняет без всяких оговорок.

Обратимся снова к излучению энергии атомом. Квантовая теория говорит нам, что рождение кванта происходит единым актом. Она, однако, утверждает, что момент времени, в который этот акт совершился, остается фиксированным неточно: здесь, как и в других квантовых явлениях, имеется неустранимая неопределенность. Неопределенность во времени оценивается по соотношению неопределенностей «время-энергия». В качестве неопределенности энергии нужно в данном случае взять энергию излученного кванта: энергия кванта — это и есть точность, с которой определена энергия излучающего атома в акте излучения.

В квантовом явлении излучения мы не можем указать точного начала этого акта во времени. Не можем проследить шаг за шагом, как развивается акт излучения от начала к концу. Не можем точно сказать, когда он завершится. Время, за которое происходит это явление, выступает перед нами как нерасчленимый отрезок. У нас нет способа разглядеть, различить в нем отдельные моменты и сказать, какие из них были раньше, а какие позже. Мы вообще не можем разделить его на какие-либо отдельные части.

И эта неделимость принципиальна — она никак не связана с несовершенством измерительных приборов. Она лежит в при-

роде вещей. Она составляет существо физического проявления времени в квантовых процессах.

Но каково время микромира само по себе — безотносительно к каким-либо явлениям, до явлений и вне их?

Этот вопрос вряд ли правильно поставлен. Ведь мы не можем ничего узнать о времени (да и вообще о физическом мире), так сказать, непосредственно. Мы судим о времени исключительно на основании наблюдений и физических экспериментов, на основании измерений. Приборами для наблюдений, экспериментов и измерений времени в микромире служат нам сами атомы, элементарные частицы, а также и установки, с помощью которых частицы регистрируются. Это и есть наши единственные часы для микромира. Мы ничего не узнаем о времени сверх того, что скажут нам эти часы. И если, согласно их показаниям, в данном физическом явлении данный отрезок времени предстает перед нами неделимым, то, значит, так оно и есть — отрезок неделим. Он неделим точно в том же смысле, в каком неделим квант энергии. Квантовая природа времени та же, что и квантовая природа энергии. Недаром они выступают «на равных» в квантовом соотношении неопределенностей.

Опыт физики XX века учит, что нет никакого времени «самого по себе». Нет времени, которое существовало бы без связи с тем, что происходит в физическом мире. Время всегда и везде выступает не «вообще», а конкретно — в каждом данном физическом явлении оно свое. Это именно то время, которое длится в ходе данного явления в данном месте пространства. Время несет на себе важнейшие черты этого явления и само служит важнейшей его чертой.

### Атом времени?

Фотоны, кванты света, рождаются благодаря излучению атомов и в разнообразных иных процессах, например при ускоренном движении электронов. Энергия фотонов оказывается при этом, естественно, различной. Существуют, или по крайней мере в принципе могут существовать, фотоны любых энергий — от очень больших до сколь угодно близких к нулю. Об очень больших энергиях говорить не будем (такие фотоны быстро исчезают, рождая другие частицы). Сейчас для нас интереснее всего то, что для энергии фотона нет нижней границы.

Но можно ли сказать то же самое и обо всех других физических величинах в мире частиц и квантов? Конечно, нет. Существуют физические величины, которые никогда не могут иметь значения, меньшие некоторого. Таков, например, элек-

трический заряд. Если он имеется у какого-то тела или частицы, то его значение никогда не меньше (по модулю) некоторого предельно малого. Нижним пределом электрического заряда служит элементарный заряд, равный (по модулю) заряду электрона. И вообще: величина заряда всегда составляет целое число этих элементарных зарядов.

Электрический заряд не допускает, таким образом, беспредельного дробления. Разделить заряд электрона на части уже нельзя\*). Тем же свойством обладают и некоторые другие величины. Например, момент импульса, если он отличен от нуля, не может быть меньше половины постоянной Планка. Свободный электрон обладает как раз таким минимальным моментом — он связан с его собственным вращением (спином). Подобным вращению волчка вокруг своей оси. Момент любого тела или частицы равен целому числу этих минимальных моментов.

А каковы в этом смысле свойства времени? Могут ли его отрезки принимать в различных физических явлениях сколь угодно малые значения? Или время состоит из отдельных кратких мгновений, которые не допускают уже дальнейшего дробления? В первом случае время было бы подобно энергии — для его отрезков не существовало бы нижнего предела. Во втором случае оно было бы похоже на электрический заряд и каждый его отрезок состоял бы из целого числа «элементарных мгновений» — атомов времени.

Физика — наука экспериментальная, и выбор между этими двумя возможностями может сделать только эксперимент. Что же известно сейчас об этом? Эксперименты указывают на то, что никаких свойств атомарности время не обнаруживает. Это проверено вплоть до длительностей порядка  $10^{-27}$  секунд, о которых мы упоминали в самом начале главы 12. Для таких экспериментов недостаточно иметь атомные часы. Это эксперименты в области микромира и часами здесь служат сами микрочастицы (плюс приборы для регистрации частиц).

В тех же экспериментах установлено, что и пространство не обнаруживает свойств атомарности вплоть до отрезков длины порядка  $10^{-18}$  метра.

Об атомарности времени говорили и спорили еще мудрецы древности (см. главу 2). Что же касается атомарности пространства, то этот вопрос, может быть, и не имеет столь дав-

---

\*) Единственное исключение — кварки, частицы, которые никогда не наблюдались в свободном состоянии, по отдельности: но и у них заряд не может быть сколь угодно малым — он не меньше (по модулю)  $1/3$  элементарного заряда.

ней истории, но зато его живо обсуждали в последние десятилетия в связи с рядом острых проблем физики. В разные годы выдвигали гипотезы о некоторой минимальной или фундаментальной длине. До этой длины дробление пространственных масштабов, отрезков длины, может идти, как обычно, но на этой длине возникает нечто существенно новое. Либо деление далее вообще становится невозможным, либо начиная с этой длины и далее, к еще более мелким отрезкам, свойства пространства каким-то образом резко меняются.

В качестве фундаментальной длины предлагались по тем или иным соображениям величины  $10^{-13}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-18}$ ,  $10^{-35}$  метра. Судя по тому, что говорит сегодня эксперимент, первые три величины не могут уже претендовать на роль фундаментальной длины. Если такая длина и существует, то эту роль могла бы, возможно, играть наименьшая из приведенных величин. Она представляет собой числовое значение выражения, составленного из трех важнейших физических констант: скорости света в пустоте, гравитационной постоянной Ньютона и квантовой постоянной Планка. Не исключено, что и в самом деле это какое-то особое, выделенное значение длины, означающее принципиальную ограниченность тех представлений о пространстве, которые можно составить на основании современной физической науки.

Фундаментальной длине, если она существует, должен отвечать и определенный предельный промежуток времени. Если остановиться на четвертом из приведенных выше значений для длины, то соответствующий промежуток времени составит  $10^{-43}$  секунд. Его получают просто делением этой длины на скорость света.

Не окажется ли эта исключительно малая длительность атомом времени? Если да, то это означало бы, что время течет не плавно и непрерывно, а отдельными одинаковыми «толчками», как кровь в артерии. Конечно, в обычных условиях, да и в условиях микромира эти толчки времени неразличимы из-за немыслимо малой их длительности.

Скажем еще раз, что судьей здесь может быть только эксперимент. Но сейчас не видно никаких путей проверки в реальном эксперименте атомарности времени. Она могла бы проявиться в экспериментах с микрочастицами, но для этого требуются частицы невообразимо больших энергий. Чтобы составить представление об этих энергиях, нужно снова обратиться к соотношению неопределенностей. Добиться необходимой точности измерения времени, сократить неопределенность его значения до  $10^{-43}$  секунд можно лишь при энергии микрочастицы порядка  $10^9$  джоулей. Но даже на самых мощных уско-

рителях элементарных частиц — существующих и строящихся — можно получить в лучшем случае лишь миллиардную долю этой энергии. Уже сейчас ускорители оставили далеко позади по своим размерам (и стоимости) все остальные инструменты экспериментальной физики. Но ускоритель, способный довести энергию частиц до  $10^9$  джоулей, не удастся построить никогда. Для этого просто недостаточно энергетических ресурсов, которыми мы располагаем на Земле.

Не перестает ли физика быть наукой экспериментальной?

### Время в самом начале

К счастью, грандиозный эксперимент со сверхвысокими энергиями произвела для нас сама природа. Это космологическое расширение. Изучая Вселенную, самую большую физическую систему, мы можем, по-видимому, узнать о том, как протекают физические явления в очень малых временных и пространственных масштабах. Ведь сама Вселенная была когда-то всего лишь... точкой.

Мы рассказывали в главе 10 о космологической теории Фридмана, которая предсказала общую нестационарность Вселенной. Эта теория описывает нынешнее состояние космологического расширения, восстанавливает для нас прошлое Вселенной, указывает направление ее развития в будущем. Самый удивительный из выводов космологии касается ранней истории Вселенной. В далеком прошлом все вещество Вселенной было сжато до исключительно высоких плотностей. С помощью теории Фридмана можно, мысленно двигаясь назад по времени, проследить состояния все больших и больших плотностей. И зайдя достаточно далеко в прошлое, приблизительно на 15—18 миллиардов лет, мы обнаруживаем, что плотность достигает неограниченно большого, бесконечного значения. Бесконечной плотности соответствует объем, равный нулю. Значит, в этот момент вся Вселенная была сжата в точку. Это состояние космологической сингулярности.

Но можно ли применять теорию Фридмана непосредственно вблизи сингулярности и в ней самой? Ведь эта теория, как и общая теория относительности, из которой она исходит, не учитывает законов квантовой физики. Квантовые эффекты и в самом деле слишком малы, и ими вполне можно пренебречь, когда рассматривается современное разбегание галактик. Они пренебрежимы и для прошлого Вселенной — во все 15 или 18 миллиардов лет, но кроме самых первых мгновений расширения мира. В эти начальные моменты развитие Вселенной управлялось квантовыми законами.

В самом начале расширения увеличение расстояний между частицами космологической среды происходило очень быстро. Это сейчас расстояния между галактиками удваиваются за 15–18 миллиардов лет. А тогда удвоение расстояний происходило за неизмеримо меньшие времена. Собственно, и сейчас и в прошлом удвоение расстояний требует времени, сравнимого с текущим возрастом Вселенной — то есть с временем, протекающим от исходной сингулярности до данной эпохи. Так что расстояния, да и вообще все физические условия в расширяющемся мире, изменяются тем быстрее, чем ближе данный момент времени к сингулярности. Говоря математически, время, характеризующее темп расширения, стремится к нулю при приближении к сингулярности.

Выходит, что вблизи сингулярности счет времени идет уже не на астрономические единицы, а на кратчайшие мгновения, характерные для микромира. Отсюда и важность квантовых эффектов, их ведущая роль в самом начале расширения.

О роли квантовых эффектов мы можем и здесь судить по соотношению неопределенностей «время-энергия». Произведение неопределенности во времени на неопределенность в энергии не меньше универсальной величины — постоянной Планка. Применяя это к условиям ранней Вселенной, нужно рассуждать так. Выделим мысленно в космологической среде какие-то две частицы и будем следить за их удалением друг от друга вследствие космологического расширения. Это движение можно характеризовать двумя величинами: кинетической энергией их разлета и промежутком времени, за которое расстояние между частицами удваивается. Если в этих двух величинах — времени и энергии — возникают квантовые неопределенности, то эти неопределенности должны быть связаны между собой общим квантовым соотношением.

Рассматривая состояния, все более и более близкие к сингулярности, мы видим, что одна из наших величин — время — неограниченно убывает. Но если речь идет о промежутках времени, стремящихся к нулю, то, значит, и неопределенность в длительности этих промежутков тоже стремится к нулю. Что же происходит при этом с энергией? Неопределенность в ней тем больше, чем меньше неопределенность во времени. Поэтому квантовая неопределенность энергии должна неограниченно расти, стремясь к бесконечности, когда время стремится к нулю. Ясно, что бесконечностью ни в каком случае нельзя пренебрегать. И, таким образом, важность квантовых эффектов на самых первых этапах расширения становится очевидной.

Мы пришли к этому заключению, рассуждая о времени и энергии. Но подобное рассуждение можно было бы провести

и для другой квантовой пары величин — для координаты и скорости (импульса). Когда размеры мира стремятся к нулю при приближении к сингулярности, стремятся к нулю и неопределенность в положении: все стягивается в точку. Но тогда должна стремиться к бесконечности неопределенность в скорости (импульсе).

Мы видим, что теория космологического расширения должна быть наполнена новым содержанием вблизи сингулярности: физические явления во Вселенной и, прежде всего, само ее расширение имели тогда существенно квантовый характер. Но что же в действительности происходило у «нуля времени»?

Увы, об этом остается пока что только строить предположения. Ведь чтобы основательно судить о самом раннем этапе эволюции Вселенной, нужно располагать теорией, которая объединяла бы в себе и общую теорию относительности, и квантовую теорию. Важность квантовых явлений мы доказали. Важность эффектов общей теории относительности сама по себе очевидна: в сверхплотном веществе исключительно сильны и поля тяготения. Единственная последовательная картина синтеза обеих теорий достигнута для гравитационных волн; но в них поля тяготения считаются слабыми. Квантовой теории сильных полей тяготения до сих пор нет — а именно она и нужна для исследования ранней Вселенной.

Мы не знаем, какой окажется эта теория будущего. Единственно, что мы можем делать сейчас, — это стараться угадать какие-то ее черты, строить правдоподобные рассуждения, пусть и не строго доказательные. В последнее время высказаны интересные соображения такого рода, которые заслуживают того, чтобы о них, хотя бы и очень кратко, рассказать.

Прежде всего, многие физики сходятся на той мысли, что учет квантовых явлений устранил сингулярность в теории Фридмана. Сингулярность должна, так сказать, «размазаться»: вместо исходной точки будет какой-то протяженный объем. О его размерах можно, по-видимому, судить по характерной длине порядка  $10^{-35}$  метра, о которой уже упоминалось. Эта величина возникает, как мы говорили, просто из комбинации трех физических констант — скорости света в пустоте, постоянной Планка и ньютоновской гравитационной постоянной. Но если теория будущего объединит в одно целое идеи относительности, квантовые законы и всемирное тяготение, то довольно разумно считать, что эти три составные части будут представлены в ней тремя названными физическими величинами. И если в каком-то физическом состоянии эффекты всех трех типов действуют в полную силу, то комбинации этих констант и в самом деле должны что-то значить. Эти комбинации

получили название планковских величин — они впервые встречаются в работах Планка. Кроме длины, среди величин такого рода имеются время порядка  $10^{-45}$  секунды, о котором уже упоминалось, и масса (порядка  $10^{-8}$  килограмма).

Из значений массы и длины можно составить еще одну планковскую величину — плотность. Она оказывается порядка  $10^{97}$  кг/м<sup>3</sup>. Это невообразимо большая, но все же конечная величина. Если Вселенная в начальном состоянии действительно занимала объем с поперечником около  $10^{-35}$  метра, то эта плотность должна считаться ее начальной плотностью.

А что могло бы означать планковское значение времени ( $10^{-45}$  секунд)? Мы уже говорили о нем как об одном из кандидатов на роль «атома времени». В духе космологических соображений ее нужно, вероятно, понимать как квантовую неопределенность в моменте начала расширения. Этот мельчайший отрезок времени должен тогда рассматриваться как нерасчленимый — внутри него нельзя выделить какие-то отдельные моменты, которым соответствовали бы те или иные «промежуточные» состояния Вселенной. Пусть это и не универсальный «атом времени», но это квантовая мера точности, с которой мы можем судить о времени в начальной Вселенной.

Начального нуля времени нет, нет и нуля размера. Вселенная начиналась как квантовая система, и квантовые неопределенности составляли самое существо ее исходных физических свойств. Так квантовая теория толкует смысл космологической сингулярности.

### Из вакуума...

Соображения, которые мы только что изложили, не кажутся еще, пожалуй, слишком дерзкими. Гораздо дальше заходят рассуждения о самом происхождении мира. Квантовым свойствам времени (и пространства) в таких рассуждениях отводится ключевая роль. Другая исходная идея — представление о физическом вакууме.

Все физические тела погружены в вакуум, который, как стало теперь ясно, не назовешь просто пустотой. Под вакуумом понимают такое состояние физической системы, когда в ней нет ни частиц, ни полей. Это состояние наименьшей возможной энергии. Но это не означает, что в нем вообще ничего нет. В вакууме постоянно протекают сложнейшие физические превращения. В нем происходят, например, особого рода вакуумные колебания электромагнитного поля. Но это не то поле, которое хорошо известно нам по разнообразным проявлениям; это не оно, а его, так сказать, «вакуумные корни». Эти



колебания не вырываются из вакуума и не могут распространяться. Но они отчетливо проявляются в физическом эксперименте. (В частности, они влияют на взаимодействие между ядром и электронами в атоме и тем самым немного сдвигают линии в спектре излучения атома.)

Такого рода квантовые колебания есть не только у электромагнитного поля, но вообще у всех физических полей. Имеются и вакуумные колебания поля тяготения — «вакуумные корни» гравитационных волн. В эксперименте их не наблюдали, но они, несомненно, должны существовать: гравитационные волны и в этом смысле ничуть не хуже электромагнитных. Вакуумные колебания не могут распространяться, но в каждом данном месте они постоянно и нерегулярно колеблют уровень тяготения. А из-за этого, согласно общей теории относительности, непрерывные изменения претерпевают и геометрические свойства пространства-времени. Они испытывают постоянное «дрожание». По этой причине, например, отношение длины окружности к радиусу колеблется около  $2\pi$  — значения, которое оно имеет в евклидовой геометрии. Ясно, конечно, что эти колебания неуволимо малы, когда мы имеем дело с «обычными» длинами. Но чем меньше масштаб, тем эти «дрожания» геометрии заметнее. И в микромире они должны быть существенны.

То же относится и к времени. Идеально чувствительные часы, испытывая воздействие вакуумных колебаний тяготения, должны непрерывно и хаотично менять темп хода. Это означает, что и само время течет не вполне плавно. Его поток постоянно и нерегулярно колеблется, то ускоряя, то замедляя свое движение, и это происходит по-разному в разных местах и в разные моменты.

Державинское сравнение времени с рекой можно было бы продолжить и сказать, что течение в реке времен не спокойное и гладкое. По ней бегут волны; и, кроме того, река времен всегда бурлит. В обычном масштабе секунд, часов, дней это, конечно, совершенно неощутимо, но во временных масштабах микромира такое бурление времени составляет одну из важнейших его черт.

Помимо колебания полей в вакууме постоянно происходят и другие события. В нем все время рождаются и тут же исчезают частицы и античастицы. Они возникали парами: электрон с позитроном, протон с антипротоном... Вообще все возможные частицы, каждая в паре со своей античастицей, живут в вакууме своей особой беспокойной жизнью. Но они тоже — как и вакуумные колебания — не могут сами собой вырваться из него и начать независимое существование. Но если сталкиваются, скажем, два протона достаточно высокой энергии, то

эти вакуумные пары частиц могут освободиться из вакуума. Тогда рождается целый «сноп» частиц, которые потом в вакууме не исчезают и живут уже независимо от него.

Все эти явления в вакууме имеют квантовую природу. Самопроизвольное рождение и исчезновение пар частиц и античастиц «из ничего» возможно только потому, что закон сохранения энергии выполняется в природе не строго, а с точностью до квантовой неопределенности. Рождаясь, частицы берут у вакуума энергию взаймы. Но они обязаны вернуть ее через положенный срок, и потому они снова исчезают, превращаясь в «ничто». Чем больше заимствованная энергия, тем короче жизнь вакуумной пары. Эти процессы в микромире уже давно и подробно изучает физика элементарных частиц, причем не только теоретически, но и экспериментально.

Рождение в вакууме пары частиц создает в данном месте и на данное время дополнительную массу. Как и всякая масса, эта масса вызывает тяготение. Но тяготение в свою очередь управляет геометрией пространства, темпом течения времени. Значит, рождение частиц замедляет в данном месте ход времени, слегка притормаживает его. Поэтому постоянное рождение и исчезновение частиц в вакууме тоже заставляет «бурлить» реку времен.

Квантовые представления о самопроизвольном рождении частиц из вакуума находят сейчас необычайно смелое развитие в космологии. Они важны для изучения ранней истории Вселенной, когда ее возраст исчислялся ничтожными мгновениями. Более того, эти представления наводят на мысль, что и само происхождение Вселенной можно понимать как квантовый процесс. Вселенная не существовала извечно, она возникла в тот момент времени, который мы с полным основанием приняли за начальный. И вблизи этого момента Вселенная вел себя как объект микромира с присущими ему квантовыми закономерностями. Она была тогда вполне похожа на микрочастицу. И если так, то не могла ли Вселенная самопроизвольно родиться из вакуума, как рождаются обычные элементарные частицы? Такую догадку высказали несколько лет назад П. И. Фомин в нашей стране и Э. Трайон в США. Это смелая гипотеза и она вызывает сейчас немалый интерес. Однако ее разработка возможна лишь на основе общей квантово-гравитационной теории, которой пока не существует. Так что основательное доказательство — или опровержение — идеи квантового происхождения Вселенной остается делом будущего, и притом скорее всего отдаленного.

Тем не менее уже и сейчас ясно, что квантовый подход к ранней Вселенной вполне оправдан. Он, несомненно, обещает

плодотворную основу для настоящего понимания природы времени, его происхождения. Время Вселенной начинается с ее рождения. Когда не было Вселенной, не было и ее времени. Повторим еще раз: в природе нет никакого времени «самого по себе». Не существует единого и всеобъемлющего времени для всей природы, на которое, как на какой-то стержень, «на-низывались» бы все подряд события в мире. Время — это всегда конкретное физическое свойство данных конкретных физических тел и происходящих с ними изменений.

## ГЛАВА 14

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Из мира строгих и красивых физических теорий, которыми являются классическая механика, теория относительности, квантовая теория, мы уже не раз переходили в область догадок, предположений и гипотез. Поиски сущности времени еще далеко не завершены, и в этой главе мы обратимся к самой трудной загадке времени. Мы уже так или иначе касались ее в других главах книги, да ее и невозможно было обойти, она всюду напоминает о себе.

И нужно сразу сказать, что в физике сделано пока что поразительно мало, чтобы разрешить эту загадку. Научные работы, которые посвящены проблеме бега времени, его направленности и необратимости, можно перечесать по пальцам. Выдвинут ряд гипотез, поставлен ряд вопросов. С ними мы и познакомим читателя. Но это только первые шаги, и главные успехи, как нужно надеяться, еще впереди.

### Бег и направление

Те свойства времени, о которых мы судим и которые изучаем с помощью часов, называют количественными его свойствами (или, как часто говорят, метрическими свойствами). С помощью часов мы устанавливаем длительность различных промежутков времени, сравниваем их между собой. Выбирая определенные единицы времени — секунды, часы, годы, мы выражаем в них результаты наших измерений и сопоставляем временным отрезкам те или иные числа, выражающие их длительность. Коротко говоря, с помощью часов мы измеряем время, даем ему количественную меру. Теория относительности и представляет собой теорию количественных (метрических) свойств времени.

Но есть у времени и иные свойства, которые принято называть качественными (или иначе топологическими). Важнейшее

из качественных свойств времени это и есть его необратимый бег. Время не стоит, оно неизменно течет от прошлого через настоящее в будущее. Прошлое никогда не возвращается. Мы не можем послать какие бы то ни было сигналы в прошлое, не можем его изменить. Мы можем влиять лишь на будущее и в будущее посылать сигналы.

Время делится на прошлое, настоящее и будущее, и три его части никогда не существуют совместно. Это дало основание Лейбницу сказать, что время есть порядок несовместимых возможностей.

Теория относительности говорит нам, каков темп течения времени, от чего зависит его замедление, но не отвечает на вопрос, почему оно вообще течет, чем определяется его неизменное направление — от прошлого к будущему.

Мы не знаем ответа на эти вопросы. Мы даже не знаем точно, те ли вопросы мы задаем, правильно ли их ставим.

Почему бежит река? Потому что вода не стоит на месте, когда есть уклон, и она всегда течет вниз. Но можно ли и о времени задать прямой вопрос такого рода и надеяться получить на него ответ по этому образцу?

Когда говорят о реке, то сводят вопрос о ее беге к понятиям более общим и в некотором смысле простым. Отвечают, используя такие представления, как вода, наклон, движение, верх и низ... А существуют ли понятия более общие и простые, чем время и его бег? Неизвестно.

Если такие понятия существуют, то, быть может, нужно искать подсказки и намеки в каких-то определенных физических процессах. Таких, которые в каком-то смысле просты, но вместе с тем и универсальны, всеобщи. Некоторые усилия, и давние и вполне современные, сделаны как раз в этом направлении, с этой надеждой. Не исключается, что подходящие процессы уже известны, а нет, так, возможно, пока не известны, но будут когда-нибудь открыты. Например, в мире элементарных частиц.

Возможен и совсем иной взгляд, согласно которому время и его бег представляют собою (вместе с пространством) самое фундаментальное и самое элементарное, к чему должна сводиться вся физика, и что в свою очередь уже не сводимо ни к чему отдельному в явлениях физического мира.

### Гипотеза Больцмана

Знаменитый австрийский физик Людвиг Больцман (1844 — 1906) выдвинул более ста лет назад предположение, что природа времени и, прежде всего, направление его течения

связаны с особым родом физических явлений, которые называют необратимыми.

Если взять два железных бруска, один горячий, а другой холодный, и приложить их друг к другу, то, как всем хорошо известно, тепло будет переходить от горячего бруска к холодному. Горячий брусок будет из-за этого остывать, а холодный нагреваться. Переход тепла продолжается до тех пор, пока температура обоих брусков не сравняется.

Это одно из необратимых физических явлений, и необратимым его называют потому, что никто никогда не видел, чтобы после того, как температура брусков выравнялась, тепло стало бы само собой возвращаться назад к горячему прежде бруску.

Когда нет никакого направленного извне вмешательства, тепло всегда переходит от горячего тела к холодному. Здесь важно, что физические тела должны быть действительно целиком предоставлены самим себе. Иначе будет, например, то, что происходит в камере домашнего холодильника — в ней холоднее, чем в комнате, но температура камеры и температура комнаты не выравниваются, а их различие может и возражать, когда холодильник включается и начинает работать его механизм.

В изолированных от внешних воздействий физических телах, в системах физических тел, предоставленных самим себе, все тепловые явления неизменно развиваются в одном направлении — в направлении выравнивания температуры. Это универсальное свойство природы. В несколько более общей формулировке, включающей рассмотренное нами явление как один из частных случаев, об этом свойстве всех физических систем говорят как о втором начале термодинамики. Насколько это важный факт, можно судить по тому, что второе начало термодинамики стоит рядом с законом сохранения энергии, который в этой области физики называют, как мы уже упоминали, первым началом.

Кстати сказать, Больцман был первым, кто объяснил физическое содержание второго начала термодинамики на основе представления о хаотических тепловых движениях молекул или атомов, из которых состоят газы, жидкости и твердые тела.

Из других необратимых явлений упомянем перемешивание жидкостей — например, расплывание сиропа в стакане минеральной воды. Необратимым образом перемешиваются и газы. В газах и жидкостях само собой происходит необратимое сглаживание различий в концентрации частиц, в давлении и других их физических характеристиках. В этих случаях тоже, конечно,

нужно исключить всякое внешнее воздействие, в том числе, например, и воздействие земного тяготения.

Изолированная физическая система всегда стремится к состоянию, в котором достигается наибольшее возможное выравнивание — выравнивание температуры, состава, концентрации и т. д. Это состояние называют состоянием термодинамического равновесия.

Стремление к термодинамическому равновесию имеет универсальный характер и не знает исключений. Не оно ли определяет направление, в котором течет время? Эта идея и была высказана Больцманом. Он предполагал, что время течет в том направлении, в котором происходят необратимые физические явления. Более того, необратимые явления охватывают все тела физического мира и всю Вселенную в целом; они вносят во Вселенную развитие, создавая тем самым время, задавая его ход и темп, указывая, в какую сторону ему течь. Так возникает непрерывное течение времени, уносящее события в прошлое, влекущее нас в будущее.

В духе представлений об абсолютном времени классической физики, одинаковом всюду и везде в мире, обращение ко Вселенной было естественным и даже необходимым. По мысли Больцмана, стремление всей Вселенной как целого к тепловому равновесию (к тепловой смерти, как об этом говорили потом) — единственное направление ее развития\*). И то, что мы называем временем, есть в действительности просто отражение в непосредственно окружающем нас мире этого неудержимого «старения» Вселенной, ее стремления к своему естественному концу.

Но как об этой вселенской эволюции узнают часы, висящие у нас на стене? Да даже и не часы, а просто маятник на подвесе? Маятник размеренно раскачивается влево и вправо, проходя ряд положений сначала в одном направлении, а потом в обратном, снова уходит и опять возвращается и т. д. Качания маятника — это обратимое и к тому же периодическое явление, по крайней мере с точностью до трения в подвесе и о воздух, которое, конечно, представляет собой явление необратимое, но оно специально может быть сделано очень малым.

Качающийся маятник служит хорошими часами, как это заметил первым Галилей (см. главу 3). И, разумеется, они показывают время не потому, что имеется трение в подвесе или о воздух. Наоборот, эти часы тем лучше исполняют свое назначение, тем точнее указывают время, чем меньше в них тре-

---

\*) О современных взглядах на судьбу Вселенной мы уже рассказали в главе 11.

ние, так что необратимые явления в самом маятнике или вокруг него не при чем.

И значит, если прав Больцман, маятник и в самом деле должен как-то чувствовать движение Вселенной к тепловому равновесию — другой возможности нет. Для этого требуется, однако, какое-то постоянное физическое воздействие на маятник, которое непрерывно сообщало бы ему, что происходит со Вселенной. Однако физика ничего не может сказать о процессе такого воздействия, о его существовании.

Ни Больцман, ни кто-либо после него не смогли доказать, что такой процесс действительно существует в природе. А ведь на этом, очевидно, и держится все рассуждение, вся гипотеза...

Но, может быть, не стоит привлекать необратимость всей Вселенной, когда прямо вокруг нас протекает немало необратимых явлений, и им, кажется, легче влиять на наши часы. Но снова возникает пример маятника, о котором мы говорили, и он безжалостно разрушает и этот, более скромный, вариант гипотезы.

За сто лет, что существует гипотеза Больцмана, о ней много думали, писали, спорили, но решительного развития, не говоря уже о доказательстве, она так и не получила. Замечательно, что эта попытка проникнуть в природу времени происходила из стремления связать время с реально протекающими в мире физическими явлениями. Она послужила прообразом других гипотез о физической природе времени, которые имели совсем иной характер, но следовали тем не менее тому общему подходу к физике времени, который предложил Больцман.

### Обращение времени

Законы движения, открытые классической механикой, обладают одним важным качеством: они безразличны к направлению времени. Это означает, что они определяют поведение тел как в направлении от настоящего к будущему, так и в направлении от настоящего к прошлому. Тем же качеством обладают и законы движения в теории относительности. Это безразличие законов механики, а значит, и самих механических движений к направлению времени отражает одну из фундаментальных черт физического мира. Об этом стоит рассказать подробнее.

Пусть сейчас, в настоящий момент времени, некоторое тело находится в данной точке и имеет известную нам скорость. Тогда на основании законов движения мы можем точно определить, где оно будет спустя, скажем, секунду или час. Но на основании тех же законов мы можем также определить, где это

тело было секунду или час назад. Известно, что астрономы, пользуясь законами движения и применяя их к Земле, Луне и Солнцу, могут предсказывать солнечные затмения, которые случатся в будущем. И вместе с тем они могут вычислить, когда затмения случались в прошлом.

Вспомним астрариум, эту движущуюся механическую модель планетной системы (см. главу 3). Ее можно запустить, так сказать, и вперед, и назад. И в обоих направлениях времени она покажет все нужные события и притом в правильные моменты времени. При движении вперед, по часовой стрелке, события будут развиваться к будущему, как обычно. А при движении в обратную сторону, против часовой стрелки, наоборот, к прошлому.

Законы механики допускают и прямое, и обратное движение. Они одинаково надежно управляют движениями в обоих направлениях времени. Эти законы сами по себе еще не задают направления от прошлого к будущему. Они не выделяют этого направления, не отличают его от противоположного, которое для них одинаково приемлемо.

Об этом можно сказать и иначе: законы механики не изменяются при смене направления времени, при обращении времени.

Это означает наличие в них определенной симметрии. Вспомним данное Вейлем определение симметрии (см. главу 12): объект является симметричным, если над ним можно произвести операции, в результате которых он будет выглядеть точно так же, как и прежде. В данном случае объектом служат законы движения, а операция, которая над ними производится, — это обращение времени. Симметрию относительно обращения времени называют *T*-инвариантностью. *T*-инвариантность представляет собой общее свойство движений — не только механических, но и вообще всех движений, управляемых любыми силами природы. Для сил электромагнитных это доказано электродинамикой. Для тяготения — ньютоновской теорией и общей теорией относительности. Все известные эксперименты с сильным и слабым взаимодействием тоже указывают на это — за одним единственным исключением, о котором мы чуть позже скажем.

Любопытная иллюстрация обращения времени — показ кинофильма в обратном направлении. Все события развиваются тогда на экране не от прошлого к будущему, а от будущего к прошлому. Тем не менее многое происходит при этом вполне естественным путем. Например, девочка подбрасывает и ловит мяч, кто-то берет с полки книгу и так далее. Но вот разлитое на столе молоко само собою собирается в чашку. Это уже не-



возможное событие, такого не бывает, и мы сразу узнаем здесь неправильный, обращенный ход событий. По чисто механическим явлениям оба направления в ходе событий не отличить. Но как только возникает необратимое явление — разливается молоко, горит свеча и так далее, — различие между прямым и обращенным течением времени обнаруживается самым очевидным образом.

Но откуда возникает необратимость, если законы движения обладают  $T$ -инвариантностью? Ведь, например, перемешивание газов и жидкостей происходит благодаря механическим движениям атомов и молекул, а эти движения безразличны к направлению времени, они не способны выделить направление от прошлого к будущему.

Вопрос действительно не простой. О нем говорят как о парадоксе обратимости, и вокруг него было немало острых споров. Разрешение парадокса предложил Больцман; ему энергично возражал Пуанкаре, но прав все же оказался Больцман.

Вот его рассуждение. Из свойств механических движений молекул следует, что возможно как перемешивание двух газов, так и обратный процесс, когда эти газы, перемешавшись, снова затем разделятся. Капля сиропа, расплывшись по воде, может снова собраться, стянуться и оказаться на прежнем месте. Тепло может перейти обратно к тому из двух соприкасающихся брусков, который раньше был горячим. Все эти события возможны: раз имеется обратимость в движениях отдельных атомов, значит, обратимо и поведение всего их коллектива. Категорического запрета на эти события нет. На это и указывал Пуанкаре. Но все дело в том, что такие обратные явления происходят очень и очень редко.

Вот что говорит об этом Больцман: «Нельзя предполагать..., что два диффундирующих газа смешаются и разделятся несколько раз в течение немногих дней. Время, в течение которого можно надеяться наблюдать (хотя бы один) случай разделения, настолько велико, что исключается любая возможность наблюдать такой процесс». Обратные явления происходят так редко, что за всю историю Вселенной ни одному из них не случилось произойти. А это означает, что фактически они вообще не происходят.

Прямое и обратное явления в принципе допустимы оба. Они различаются лишь частотой, с которой в действительности происходят: прямые происходят очень часто (то есть практически всегда), а обратные очень редко (то есть практически никогда). Больцман подсчитал частоту (или, иначе, вероятность) прямых и обратных явлений и тем самым показал, что поведение большого коллектива частиц, совершающих обра-

тимые,  $T$ -инвариантные движения, будет уже практически необратимым. Когда в любой физической системе имеется отклонение от теплового равновесия, естественное развитие событий всегда таково, что система изменяется в направлении, приближающем ее к равновесию.

Скажем теперь об уже упомянутом исключении из общего правила  $T$ -инвариантности движений. Речь идет не о большом коллективе частиц, а об одной элементарной частице, называемой нейтральным  $K$ -мезоном. Это нестабильная, распадающаяся частица, и из свойств ее распада следует (хотя, надо сказать, и несколько косвенно), что ее поведение не обладает  $T$ -инвариантностью\*). Частица «различает» прошлое и будущее; два направления времени для нее не равноценны, не симметричны.

Так не отсюда ли возникает действительное направление времени?

Догадка напрашивается, кажется, сама собой. Но  $K$ -мезон — очень редкая частица, и его распад — слишком редкое явление, глубоко запрятанное к тому же в недра микромира. Трудно представить себе, как эти частицы могли бы управлять временем везде и всегда всей Вселенной.

Дерзкую идею о происхождении направления времени выдвинул астроном из Пулковской обсерватории Н. А. Козырев. Он предположил, что известные нам законы движения — это лишь некоторая приближенная форма точных законов, которые еще предстоит открыть. И если в приближенных законах царит  $T$ -инвариантность, то точные законы обладают  $T$ -неинвариантностью, то есть нарушением  $T$ -инвариантности, хотя, быть может, и очень слабым (отчего оно до сих пор и оставалось неуловимым). Такая скрытая, очень слабая, но всеобщая асимметрия между двумя направлениями времени задает преобладание одного из них, которое и означает для нас направление от прошлого к будущему.

Эту идею, вносящую необратимость в сами законы движения, не удалось ни разработать теоретически, ни тем более доказать в экспериментах. Стоит заметить, что в 50-е годы, когда идея была предложена, о  $K$ -мезонах как примере нарушения  $T$ -инвариантности еще не знали.

### Гипотеза Эддингтона

Если связывать течение времени с каким-то определенным физическим явлением, то нужно выбрать явле-

---

\*) Подробнее об этом читатель может узнать из книги: Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц. — М.: Наука, 1984.

ние совсем особого рода — с одной стороны, оно должно быть заметно выделенным из всех явлений природы, а с другой стороны, оно должно иметь самый общий, всемирный характер. Таким явлением, единственным и всеобщим, является расширение Вселенной. Гипотезу о связи направления времени с расширением Вселенной выдвинул много лет назад английский физик и астроном Артур Эддингтон (1882—1944), автор замечательных трудов по теории относительности, космологии, физике звезд. Ему принадлежит выражение «стрела времени», которым мы воспользовались для названия этой главы книги.

Но последнее не означает, что мы присоединяемся к точке зрения Эддингтона на природу времени. Против нее существуют сильные возражения.

Действительно, расширение Вселенной — это явление огромного пространственного масштаба, оно проявляется в относительном движении, взаимном удалении галактик и их скоплений друг от друга. Это, однако, отнюдь не означает еще (как иногда неудачно говорят и пишут) всеобщего «растяжения» всех вообще расстояний и длин в мире. Размеры планет и Солнца, радиус Солнечной системы не возрастают со временем — они никак не ощущают далекие движения галактик. Общее космологическое расширение им никак не передается, оно не воздействует на них. На этот счет имеется строгое теоретическое доказательство, полученное Эйнштейном (совместно с Э. Страусом) в 1945 году.

Но тогда против идеи Эддингтона возникают те же возражения, что и против гипотезы Больцмана. Если данное физическое явление определяет стрелу времени, то есть задает его бег и направление, то должен существовать способ «сообщить» об этом всем без исключения часам в мире, всем остальным явлениям и процессам в природе. Такого способа, как видно, не существует.

### ***T*-инвариантность и «обширный ум»**

*T*-инвариантность законов движения означает, как мы говорили, что эти законы сами по себе не указывают направления времени. Классическая механика и обобщившая ее теория относительности только выстраивают события в цепочку одно за другим, но это цепочка без стрелки. События в истории данного тела нанизываются на время (его собственное время), как бусинки на нитку, и все равно, в каком направлении, с какого конца их перебирать.

Мы упомянули уже и о том, что на основании законов движения можно вычислить будущие затмения и вообще всю бу-

душую динамику нашей планетной системы. Точно так же можно вычислить прошлые затмения и всю предшествующую историю Солнечной системы. Значит, прошлое и будущее нам одинаково открыты и полностью доступны знанию.

Более того, Пьер Симон Лаплас (1749—1828), знаменитый французский математик и физик, предположил, что возможность таких точных вычислений распространяется не только на мир планет, но и на все вообще частицы вещества, из которых состоит все на свете, включая и нас с вами. Даже наши мысли и чувства, поскольку в конце концов они определяются движениями атомов и молекул в нашем мозгу, в нашем теле, можно точно вычислить наперед. В одинаковой степени это относится и к прошлому.

Лаплас говорил об этом так.

«... мы должны рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие ее предыдущего состояния и как причину последующего. Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, обуславливающие природу, и относительные положения всех ее составных частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движением легчайших атомов; не оставалось бы ничего, что было бы для него недостоверно, и будущее, так же как и прошлое, предстало бы перед его взором».

Современный сторонник Лапласа мог бы, наверное, сказать, что будущее уже как бы снято на киноленту, которая — вся уже целиком готовая — просто разматывается перед нашим взором. Ее можно просматривать и вперед — к будущему, и назад — к прошлому.

Рассуждение Лапласа производит, конечно, сильное впечатление. Но оно на самом деле ошибочно. В хорошо понятном увлечении успехами механики он стремился свести к механическим движениям все многообразие природы, весь мир явлений. Но природа в действительности гораздо богаче, ее законы не сводятся целиком к законам механического движения.

Впрочем, одно важное возражение может быть предъявлено Лапласу и в рамках самой механики. Он исходил из того, что состояние мира в какой-то данный момент известно абсолютно точно, а дальнейшие вычисления дают столь же абсолютно точное решение его задачи. Но реально мы никогда не можем абсолютно точно узнать и задать, скажем, координаты тел в данный момент. Всегда имеется та или иная предельная, конечная точность, с которой это можно сделать. Пусть мы можем указать положения тел, их координаты с точностью до де-

сятой или даже двадцатой значащей цифры — все равно это будет только какое-то приближение, содержащее хотя и малую, но неисчезающую погрешность. «Обширный ум», а лучше воображаемая вычислительная машина с невероятным быстродействием и огромной памятью, должны прежде всего впитать эти сведения, и затем произвести по рецепту Лапласа вычисления будущего или прошлого. Но в каком бы направлении ни производился расчет — к будущему или к прошлому — по ходу расчета ничтожные исходные погрешности в определении начальных положений тел приведут к совсем не малым отклонениям от идеально точного решения, подразумеваемого Лапласом. Отклонения растут, даже если сама машина не вносит в расчет собственных ошибок. Рано или поздно реальные результаты реального вычисления станут уже очень сильно отличаться от идеального решения. И вместо истинного будущего мы получим нечто совершенно от него отличное. Картина смешается, запутается, и запутают ее ничтожные и невинные, казалось бы, погрешности в исходных данных.

Если бы мы захотели вычислить будущее состояние каждой молекулы в стакане воды всего только на секунду вперед, любой мыслимый расчет дал бы картину расположения и движения молекул, которая очень сильно отличалась бы от того, что на самом деле наступит через секунду. Но такой расчет и недоступен современным вычислительным машинам: они могут вычислять движения в системе из сотен тысяч точек, а в стакане воды  $10^{24}$  молекул. Да и любая машина будущего вряд ли сможет произвести такое вычисление, а если допустить, что и сможет, на это уйдет гораздо больше времени, чем секунда.

И это всего только стакан воды. Что же говорить о всей Вселенной, о чувствах и мыслях людей...

Но это не означает, что вычисление будущего поведения физических систем вообще невозможно. Все, что нам нужно знать наперед о стакане воды, легко поддается описанию. Только для этого не нужно вычислять положения и скорости каждой молекулы — вполне достаточно пользоваться всего несколькими физическими величинами, характеризующими всю такую систему как целое, — температурой, давлением, плотностью, объемом. И мы легко решаем в школе задачу о том, что произойдет с температурой в сосуде с водой, если ее, например, подогреть, сообщив столько-то тепла.

## От причины к следствию

В  $T$ -инвариантном мире Лапласа предшествующее событие в истории тела является причиной последующего события. Но два таких события, оставаясь самими собою, меняются ролями, когда цепочка событий обращается и «разматывается» назад. То событие, которое было причиной по отношению к другому при одном порядке, окажется его следствием при обратном порядке.

Но, может быть, все дело в том, что в реальном мире причина и следствие непереставимы? Может быть, время потому и течет, что причина вызывает следствие?

Время течет от причины к следствию. Такая мысль и была высказана еще Готтфридом Лейбницем, классиком естественных наук нового времени.

Эта мысль основана на ином подходе, чем гипотеза Больцмана. Она обращена не к какому-то отдельному физическому явлению или их классу, а к самым исходным, первичным представлениям физической науки. И правда, все физические связи имеют причинно-следственную основу; если что-то происходит, то происходит по определенной причине и является ее следствием. Сначала действует причина, а затем происходит вызываемое ею следствие. От причинно-следственного порядка к порядку временному — это ясная и привлекательная идея.

Не странно ли, что из нее не выросла, во всяком случае, до сих пор, физическая теория времени? Никаких возражений против нее, как кажется, быть не может. Но и попытки развивать или конкретизировать ее в физическом или математическом плане пока что не были сколько-нибудь результативными, несмотря на немалые усилия, прилагавшиеся и в прошлом, и в последние десятилетия.

От причины к следствию — это привлекательно, ибо сами понятия фундаментальны, первичны и всеобщи. Но, например, каким образом на причинно-следственной основе можно понять особую роль тяготения в том, что касается воздействия на ход времени? Конкретных вопросов можно было бы поставить немало. Но главный вопрос, очевидно, другой — как переход от причины к следствию создает стрелу времени? И что в точности означают здесь слова *переход* и *создает*?

«Я прекрасно знаю, что такое время, пока не думаю об этом. Но стоит задуматься — и вот я уже не знаю, что такое время». Эти слова, сказанные много веков назад\*), можно

---

\*) Они принадлежат Блаженному Августину (357—430), философу, много размышлявшему о нашем восприятии времени.

вполне повторить и сейчас, особенно когда речь идет о неотвратимом беге времени, о его направлении к будущему и необратимости в прошлое.

## ГЛАВА 15

### ЧТО ТАКОЕ ВРЕМЯ?

В I веке до нашей эры был составлен полный свод сочинений Аристотеля — их исправили, переписали и расположили по темам. Вслед за работами, составившими «Физику», поместили группу трактатов философского содержания. Они получили название «Метафизика» — это значит «то, что после физики». Здесь Аристотель говорил об общих взглядах на мир и на место в нем человека. Он обсуждал их, отталкиваясь от воззрений Платона, споря с ними.

Аристотель расходился со своим учителем в понимании самого главного. А главное — это философский вопрос о реальности мира. Платон полагал, что все окружающие нас тела иллюзорны и на самом деле даже не существуют. Это всего лишь какие-то «тени», бледные копии некоторых высших прообразов, оригиналов всех вещей. Вот эти прообразы — он называл их идеями — действительно существуют и притом всегда в неизменном виде. Но существуют они не в нашем мире, а в воображаемом идеальном мире, где все совершенно и вечно. Предметы же нашего мира изменчивы и преходящи, они возникают и исчезают и потому лишены «истинного существования».

Не соглашаясь с этим, Аристотель утверждал независимое существование мира и природы как настоящей реальности. Идеи и понятия не предшествуют нашему миру. Напротив, реальный мир служит источником идей, рождающихся в сознании человека. В наших идеях и понятиях отражаются конкретные знания людей о мире.

Здесь столкнулись два противоположных друг другу направления философской мысли, которые в дальнейшем, уже в XVIII веке, получили названия материализма и идеализма. Материализм в споре с идеализмом отстаивает объективную, независимую от чего бы то ни было реальность мира и природы. Название «материализм» происходит от латинского слова «материя», которое значит примерно то же, что и русское слово «вещество». В философии понятие материи имеет особый, фундаментальный смысл. Согласно определению, данному В. И. Лениным, это «...философская категория для обозначения объективной реальности, которая... отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них».

Материалистический подход к миру, природе, человеку, обществу всегда был, по существу, в основе всякого научного знания. Для физики он вытекает из самого ее характера как науки экспериментальной.

Наша книга — о физике времени. Но в этой заключительной ее главе, «после» физики, уместно, наверное, сказать немного и о философских взглядах на время.

### Мир, время, мышление

В сочинении, носящем название «Тимей» (по имени одного из участников ведущихся там обсуждений). Платон, не слишком вдаваясь в объяснения и подробности, излагает свой взгляд на происхождение Вселенной и природу времени. Его картина мира еще очень близка к мифологической.

Земля со всем, что на ней, а также Солнце, Луна, планеты, звезды создаются у Платона творцом, который действует в соответствии с некоторым высшим прообразом и идеалом. Все эти создания, насколько вообще возможно, стремятся походить каждое на свой идеал. Однако в одном очень важном отношении идеал принципиально недостижим. Ведь мир имел начало, он претерпевает изменения, становится старше и, возможно, будет когда-то иметь конец. Идеалы же вечны и неизменны. И вот чтобы хоть как-то сгладить этот недостаток мира, его творец, оказывается, и придумал время.

«Он замыслил сотворить некоторое движущееся подобие вечности; устроив небо, он вместе с ним творит для вечности, пребывающей в едином, вечный же образ, движущийся от числа к числу, который мы называли временем».

Время у Платона — заменитель вечности, ее несовершенное воплощение в мире. Он называет время подвижным образом, движущимся подобием вечности. Время движется, течет и таким путем стремится подражать вечности, имитировать ее. Платон называет и «механизм», приводящий время в движение: это обращения небесных тел.

«...чтобы время родилось от разума и мысли бога, возникли Солнце, Луна и пять других светил, именуемых планетами». «Все эти светила, назначенные участвовать в устройении времени, получили подобающее им движение». Это движение светил, как видно из наблюдения, циклично; поэтому и время у Платона бежит по кругу.

Время как подвижный образ вечности...Если отвлечься от «космогонической легенды» Платона, забыть про его бога-творца, придуманный мир идей и т. п., это определение (или, может быть, метафора) не потеряет содержания, не станет



пустым. Напротив, вне мифологического сюжета оно даже выигрывает. Конечно, это не научное утверждение в современном смысле, а лишь смутная догадка. Но она привлекает смелым сопоставлением крайностей. С одной стороны, это вечность, неподвижная и лишенная изменений, а с другой — это время, суть которого в неукротимом движении, влекущем за собой необратимые изменения.

За два с половиной тысячелетия, считая от Платона, философия предложила немало разнообразных соображений о времени. В русле философского идеализма это были всякий раз попытки тем или иным путем отрицать время как реальную черту реального мира. И. Кант, космогонист, но прежде всего классик идеализма второй половины XVII — начала XIX веков, считал, что время (и пространство) не является свойством самой природы. Он рассматривал время как свойство человеческой познавательной способности. По его мнению, человек обладает «интуицией времени», которая позволяет ориентироваться во внешнем мире. Время и пространство не присущи миру как таковому. Это только те «формы», в которых человек воспринимает внешний мир.

Близкие к этому взгляды разделяли Р. Декарт, Г. Лейбниц, другие мыслители. Они полагали, что такие общие и жизненно важные идеи, как идея времени или идея пространства, человек получает не из опыта — он имеет их в своей душе от рождения в уже готовом виде.

Многие философы-идеалисты сомневались в том, что человек вообще способен правильно понимать окружающий его мир. Наши знания о нем объявляли иллюзорными или искаженными. Естественные сложности и противоречия, с которыми сталкивается человеческий разум в своем стремлении к знанию, казались им неразрешимыми. Природа времени представлялась таинственной и непостижимой.

Материалистический подход к природе времени совершенно иной. Смело отбрасывая мифологию, отрицая всякое божественное сотворение мира, строили свой взгляд на природу уже мыслители-материалисты классической древности. В VII—VI веках до нашей эры Фалес из Милета, столетием позднее Гераклит Эфесский следовали хотя еще и наивному, но определенно материалистическому пониманию мира. Они нисколько не сомневались в его реальном существовании, независимом от воли богов или разума людей. Родоначальник материализма нового времени Ф. Бэкон (1561—1626), его последователь Т. Гоббс (1588—1679), английские философы, утверждали опытное происхождение всякого знания о мире. Но все же время у Гоббса существует не в природе, не вне нас, «а только в мыш-

лении нашего разума». Преодолевая такого рода отдельные отступления, зрелый материализм выработал свое понимание времени и пространства как реально существующих и притом неотъемлемых черт окружающего нас мира.

В этом состоит философское решение проблемы времени, материалистический ответ на вопрос о его природе.

Время не придумано богами. Это не иллюзия человеческого разума. Время существует в природе и вместе с ней. И как всякое свойство мира, оно доступно познанию и действительно успешно изучается человеческим разумом на основе опыта. Наши знания о времени постоянно развиваются, становятся глубже и полнее.

«Советский энциклопедический словарь» (1982 г.) определяет время, с философской точки зрения, как форму последовательной смены явлений и состояний материи. Изучение времени в его конкретных взаимных связях с пространством, веществом, движением — задача физической науки. Современная физическая концепция времени строится на основе двух фундаментальных физических теорий — теории относительности и квантовой теории.

### Относительность

Начало исследованию времени положили еще мыслители древности, стремившиеся на основании простых ощущений и наблюдений составить себе общее представление о времени, силой ума и воображения проникнуть в самую его суть. Первая физическая концепция времени была создана гораздо позже трудами Галилея и Ньютона. Ею стала классическая механика — наука об общих законах движения физических тел. В классической механике сущность времени проявлялась в движении. Время представало в ней как непрерывный и равномерный поток, неограниченный в обоих направлениях — в прошлое и в будущее. Скорость этого потока считалась всюду и везде одинаковой и не зависела ни от чего в мире.

Классическая механика осознала, зафиксировала и описала те свойства времени, которые поддаются непосредственному восприятию в повседневном опыте. Время классической механики — это время макромира, мира, масштабом и мерой которого служит сам человек и окружающие его тела природы. Микромир, мир атомов и элементарных частиц, был еще недоступен науке. О макромире, о Вселенной в целом можно было тогда только строить гипотезы. Но огромное разнообразие явлений макромира, связанных с движениями тел, получило полное, надежное и точное объяснение. В основе этого объяс-

нения, в его фундаменте лежало то понимание времени, которое сложилось у Галилея и было ясно и четко сформулировано Ньютоном.

Абсолютное время, неподвластное никаким воздействиям, с раз и навсегда заданным темпом — вот исходная аксиома классической механики. Успехи классической механики в объяснении явлений макромира, чрезвычайная плодотворность ее применений в конструировании различных машин, механизмов, сооружений — все это рассматривалось как подтверждение аксиомы абсолютного времени, подтверждение, необычайное по богатству, полноте и надежности.

Свойства времени, установленные и проверенные классической механикой в движениях макроскопических тел, не подлежат отмене или пересмотру. Это достижение, которое останется в науке навсегда. Но уже и основоположникам классической механики было понятно, что от четкого выяснения непосредственно проявляющихся свойств времени еще очень далеко до постижения его глубинного физического содержания. Новый крупнейший шаг на этом пути был сделан спустя почти три столетия, в начале XX века, усилиями Эйнштейна и других физиков и математиков, подготовивших появление теории относительности и сделавших ее затем основой современного физического мировоззрения.

Классическая механика действует и торжествует в макромире, но только в нем. Как было установлено и осознано в начале нашего века, область ее применения ограничена в двух важнейших отношениях. Во-первых, скорости исследуемых ею движений должны быть малы по сравнению со скоростью света. Во-вторых, силы тяготения, управляющие движениями тел, должны быть слабыми, чтобы они не могли разогнать эти тела до скоростей, сравнимых со скоростью света.

Теория относительности вышла за эти рамки, расширила поле деятельности физики. Она не отбросила классическую механику, а включила ее в себя в качестве частной, приближенной теории, действующей при должных ограничениях скорости и сил тяготения. Теория относительности открыла новые свойства времени.

Как и в классической механике, эти свойства проявляются прежде всего через движение физических тел. Вместе с тем время оказалось теснейшим образом связанным с пространством. Вместе с пространством оно составляет единый четырехмерный мир, в котором и происходят все физические явления. Это единство времени и пространства, их сцепленность друг с другом обнаруживаются тогда, когда скорости движения тел приближаются к скорости света.

В теории относительности время оказывается не абсолютным. Во-первых, абсолютного смысла лишается понятие одновременности. В классической механике два события, одновременность которых зафиксирована по каким-то одним часам, остаются одновременными и по всем другим часам, движущимся относительно первых и относительно друг друга. Теория относительности утверждает, что это не так: то, что одновременно по одним часам, не одновременно по другим часам, если они движутся друг относительно друга. Имеется, конечно, приближенная одновременность, когда скорость часов мала по сравнению со скоростью света, — это и есть область действия классической механики. Но когда скорость приближается к скорости света, два события, зафиксированные как одновременные по одним часам, оказываются случившимися в существенно разные моменты времени по другим часам, очень быстро движущимся относительно первых.

Во-вторых, сам темп времени теперь зависит от движения и становится поэтому относительным. Часы, движущиеся относительно нас, всегда представляются нам отстающими. Это означает, что измеряемое ими время замедлено в своем беге. Конечно, и в этом случае эффект на самом деле замечен только при больших скоростях.

Наконец, в-третьих, время оказывается подверженным действию сил тяготения, они влияют на его темп: там, где имеются силы тяготения, время течет медленнее, чем в отсутствие этих сил. Различие в темпе времени практически незаметно при земном тяготении, но оно тем значительнее, чем сильнее тяготение. В присутствии очень сильного тяготения, например вблизи черной дыры, темп времени столь сильно замедляется, что оно даже как бы останавливается там в своем беге.

Теория относительности дает полное представление о том, как и от чего зависит темп времени и отмеряющий его ход часов. Она позволяет построить физико-математические модели, описывающие время и пространство Вселенной как целого. На ее основе Фридман предсказал общую динамику Вселенной, а учет в его теории данных астрономии позволил установить, что космологическое расширение продолжается приблизительно 15 или 18 миллиардов лет.

Так в физике появилась мера времени, определяющая темп эволюции всей Вселенной. Возраст нашей Галактики на несколько (3 или 5) миллиардов лет меньше возраста Вселенной. Солнце и Земля еще моложе — им около 5 миллиардов лет. Вселенная как целое старше галактик, звезд, планет, а также и самих атомных ядер и элементарных частиц, из которых состоят все ее тела и системы.

Кстати, о возрасте атомных ядер имеются непосредственные экспериментальные данные. Они получены из измерений природной распространенности на Земле некоторых радиоактивных элементов. Возраст самых старых их ядер достигает 15 или даже 18 миллиардов лет. Замечательно, что эти данные согласуются с космологическими оценками возраста мира. Конечно, точность, с которой в обоих случаях определяется возраст, не слишком высока, и потому совпадение этих величин нельзя понимать слишком буквально. Нельзя, например, считать, что ядра возникли в самой сингулярности, — они могли возникнуть через минуты, часы, годы, а то и сотни миллионов лет после нее.

### Кванты

Квантовая теория, вторая великая физическая теория наших дней, вместе с теорией относительности, в комбинации с нею, проливает новый свет на свойства времени, особенно в микромире.

Классическая механика дала теорию времени для макромира, теория относительности — для мегамира, для Вселенной как целого. В микромире без квантовой теории не обойтись — это область, где квантовые явления играют ключевую роль. Подлинный синтез обеих теорий, в котором наравне с квантовой теорией в полную силу звучала бы как специальная, так и общая теория относительности, остается пока еще делом будущего.

Ряд замечательных следствий такого синтеза известен, однако, уже и сейчас. Прежде всего, это гравитон — квант «взволнованного» пространства-времени, который сочетает в себе свойства элементарной частицы, летящей со скоростью света, и легкой волны искривленности, бегущей по четырехмерному миру. Искривленность пространства-времени, даже очень слабая, обеспечивает его энергию и импульс. Собственно, это энергия и импульс самого искривленного пространства-времени, трактуемые на языке квантовой теории. Здесь приоткрывается завеса над совсем новыми связями в природе, глубинный смысл которых еще предстоит выяснить. И в самом деле, квантовые эффекты вызывают «материализацию» пространства-времени (если воспользоваться этим старым словом, которое в ходу сейчас, кажется, по большей части у фокусников-иллюзионистов).

Другим замечательным успехом на этом пути мы обязаны английскому теоретику С. Хокингу. Он применил квантовые соображения к такому объекту, как черная дыра. Здесь поле тя-

готения, а с ним и искривленность пространства-времени уже не слабы, как в «проквантованных» гравитационных волнах. Напротив, это пример очень сильных релятивистских эффектов. Оказалось, что черные дыры предстанут перед нами уже не абсолютно черными, если учесть соотношения неопределенностей и иные закономерности мира квантовых явлений. Хокинг доказал, что черная дыра должна испускать частицы и излучение. Она испускает их подобно нагретому телу, причем соответствующая температура тем выше, чем меньше масса, ушедшая в черную дыру. Излучение уносит с собой энергию, которая черпается из этой массы. Масса убывает, но из-за этого температура только возрастает. А чем выше температура, тем больше мощность излучения. В конце концов черная дыра заканчивает свое существование сильным всплеском излучения.

Этот эффект получил название квантового испарения черных дыр. Он не наблюдался в природе (как и гравитон), но важна сама принципиальная возможность очень сильного влияния квантовых закономерностей на поведение пространства-времени. Квантовое испарение уничтожает черную дыру и вместе с этим ликвидирует причину замедления времени с данной области пространства. Если черная дыра — это «тупик» в потоке времени, то квантовые эффекты способны эту преграду размыть и освободить временной поток.

Роль квантовых эффектов всегда велика, когда масштабы времени (и пространства) оказываются малыми, характерными для микромира. Так было в первые мгновения космологического расширения, когда возраст Вселенной составлял невообразимо малые доли секунды (порядка  $10^{-43}$  с). При этих условиях квантовые эффекты должны были «работать» во всю силу. И, значит, начало Вселенной было существенно квантовым. Течение времени в самом своем истоке было, вероятно, не непрерывным, а квантовым, прерывистым. Значит, существовали такие мельчайшие его отрезки, что в пределах каждого из них нельзя различать отдельные последовательные части. Каждый отрезок времени возникает сразу как целое, подобно кванту света, излучаемому атомом. Внутри такого «кванта времени» не имеют смысла понятия *раньше* и *позже*. Из начальной космологической сингулярности время истекало не сплошным потоком, а как бы отдельными толчками. Космическое время — это время нашей Вселенной, оно возникло и существует вместе с ней.

Наконец, квантовые эффекты в течении времени изменяют представления о световом конусе, о причинности. В теории относительности каждое событие в физическом мире характеризуется моментом времени, в который оно произошло, и тремя пространственными координатами «места происхождения». Эти

четыре числа определяют событие как точку в четырехмерном пространстве-времени. Но квантовые эффекты не позволяют уместить событие в точку. Любое событие неизбежно имеет какую-то протяженность во времени и пространстве — оно не может быть точечным. Точка-событие размывается в пятно (вернее, в четырехмерный объем), размеры которого диктуются квантовой неопределенностью.

Если событие не может быть точечным, то это должно вызывать размытие и мировой линии частицы. В «неквантованной» теории относительности эта линия складывается из следующих друг за другом точек-событий в истории частицы. При квантовом же взгляде мировая линия предстает, так сказать, толстой. В частности, толстой должна быть и мировая линия света, очерчивающего световой конус в пространстве-времени. Это в действительности означает, что граница светового конуса оказывается нечеткой, размытой. Но тогда возникает неопределенность в таких важных, даже принципиальных вещах, как возможность причинной связи между событиями. Мы помним, что два события могут быть причинно связаны и одно может быть следствием другого, когда оба они не выходят за пределы светового конуса. Если же сами эти «пределы» размыты, то в соответствующих малых пространственно-временных масштабах становится неопределенным и само утверждение о возможности причинной связи. То есть мы не в состоянии с полной определенностью узнать, могут ли эти события быть связаны каким-либо сигналом.

Легко представить себе, как сильно размывает такая ситуация жесткие границы, накладываемые теорией относительности в физическом мире. Квантовая неопределенность вносится в причинность, но вместе с тем и в одновременность событий, в порядок их следования во времени. Даже в истории одной и той же частицы исчезает определенность в том, какое событие было раньше, а какое — позже. Порядок смены событий — эта, казалось бы, обязательная черта временного потока — теряется в квантовых явлениях микромира.

Но в конечном итоге нет ничего неожиданного в том, что время микромира так сильно отличается от нашего обычного времени. Ведь и сам микромир существенно отличен от мира «обычных» тел. Время невозможно рассматривать независимо от тех явлений, которые мы описываем при помощи времени. В свойствах времени отражаются свойства этих явлений.

Теория относительности довольно полно выявила сейчас свои возможности в изучении времени. Квантовая теория тоже дала уже немало. Но если результаты теории относительности строги, доведены до полной количественной точности, то вы-

воды квантовой теории, касающиеся свойств времени, имеют пока что по большей части предварительный, ориентировочный, качественный характер. Например, до сих пор нет строгой количественной формулировки того, что понимать под причинностью в области квантовых явлений. А с этим в физике связан целый комплекс сложных и глубоких проблем, которые еще ждут своего решения. Каждый новый шаг в этом направлении позволит, несомненно, узнать нечто важное и о свойствах времени в масштабах микромира.

### **Бег, необратимость, одномерность**

Есть у времени такие свойства, которые ставят в тупик и теорию относительности и квантовую теорию. Эти теории многое сказали нам о времени, но они не способны ответить на первый и самый простой из всех вопросов: почему время идет?

Время неудержимо движется, и притом не где-то в глубинах Вселенной или в недрах микромира. Оно идет здесь, сейчас, можно сказать, у нас под рукой. Гипотезы, высказанные о природе этого бега, производят, скажем прямо, слабое впечатление. Требуется, как видно, совсем новый взгляд на вещи, далеко выходящий за рамки привычных представлений. Конечно, при этом нужно отталкиваться от теории относительности и квантовой теории. Теория относительности учит нас, что ход времени зависит от физических явлений. Квантовая теория указывает на то, что наблюдаемый временной поток состоит из отдельных мельчайших толчков.

Но чем вызывается само движение времени? Что задает его свободный, невозмущенный ход? Пусть мы смотрим на неподвижные часы вдали от полей тяготения и сами часы не квантовые, а «обычные». Чем же тогда отбивается ритм времени?

Свободный, без движения и тяготения, ритм времени является самым быстрым. Движение тел и их тяготение могут его только замедлить, но не ускорить. Не означает ли это, что причина бега времени не связана ни с движением, ни с тяготением? Скорее всего, она и вправду лежит вне их. Конечно, можно было бы сказать, что если не движение или тяготение, то само существование физических тел заставляет время бежать. Что это в действительности означает, еще предстоит выяснить, «перевести» на ясный и точный язык физической теории.

Бег времени необратим. Оно течет лишь в одном направлении, от прошлого к будущему, и никакое физическое воздействие не может повернуть его вспять. Откуда такая асимме-



трия? Ни в каких законах природы, известных нам в мире «обычных» тел, этого нет. Лишь удивительный пример *K*-мезонов, распад которых не безразличен к направлению времени, составляет исключение, природа которого и сама по себе остается неясной. Но может ли одно редчайшее явление из мира элементарных частиц контролировать движение всей машины «обычного» и даже космического времени?

И, наконец, еще один важнейший вопрос — число измерений времени.

Чтобы указать положение тела в пространстве, нужно назвать его координаты, три числа. Чтобы указать момент времени, достаточно назвать одно число. В этом выражается трехмерность пространства и одномерность времени. Реальный четырехмерный мир физических явлений имеет размерность  $3 + 1$ .

Трехмерность пространства и одномерность времени представляют собою очевиднейшие свойства мира физических явлений. Но какова их природа? Почему пространство трехмерно, а время одномерно?

О трехмерности пространства рассуждали еще Платон и Аристотель. Но физический подход к проблеме был развит только в 20-е годы нашего века П. Эренфестом, замечательным физиком-теоретиком, работавшим одно время и в России. Эренфест выяснил, что трехмерность пространства исключительно важна для самого существования реального мира, в котором мы живем.

Если бы, например, число пространственных переменных было не 3, а 4, то, как оказывается, не существовало бы замкнутых орбит планет и Солнечная система не могла бы образоваться. Несколько лет назад советские физики-теоретики Л. Э. Гуревич и В. М. Мостепаненко доказали, что в таком случае не существовало бы и замкнутых орбит электронов в атомах, так что была бы невозможна атомная структура вещества.

Из этих примеров видно, что число пространственных переменных — исключительно важный факт природы. Несомненно, то же нужно сказать и о размерности времени. Его одномерность (осознанная людьми как таковая гораздо позже, чем трехмерность пространства) представляет собой факт фундаментальной важности.

Но этой констатацией и ограничивается, по существу, современное состояние проблемы. И можно лишь упомянуть смелую гипотезу Эддингтона о том, что одномерность времени — это свойство лишь близкой к нам области мира. Не исключено, говорил он, что в каких-то очень удаленных от нас

областях мира время могло бы оказаться не одномерным, а, например, двумерным. Тогда для задания момента времени требовалось бы указать уже не одно, а два числа.

Идея различных областей мира с иными измерениями — как времени, так и пространства — в последние годы снова привлекла к себе внимание. Имеются высказывания о том, что размерность современного физического мира  $3 + 1$  есть результат развития Вселенной из состояний иных, высших размерностей пространства и времени. Изучается, например, модель мира с 10 измерениями...

В недавно найденных в Ленинграде рукописях И. Канта есть фраза, созвучная новейшим идеям: «Пространство и время возможны только как части еще большего количества».

Но здесь, кажется, пора остановиться и снова вспомнить Аристотеля. В 4-й книге своей «Физики» он обсуждает ту странность времени, что прошлое уже прошло, будущее не наступило, а настоящее не имеет длительности: что же тогда остается от времени? И вот как он заключает эти рассуждения.

«А что такое время и какова его природа, одинаково неясно как из того, что нам передано от других, так и из того, что нам пришлось разобрать раньше».

Но мы знаем о времени все же гораздо больше, чем Аристотель. И наши знания постоянно расширяются. Они будут возрастать и далее по мере проникновения физики во все более тонкие и глубокие свойства природы. Сама же природа многообразна, изменчива и неисчерпаема. Вместе с ней неисчерпаемо по своим проявлениям и время. Так что последнего и окончательного ответа на вопрос «что такое время?» не существует — и не может существовать.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

- Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сб. статей.— М.: Мир, 1979.
- Аристотель. Сочинения в 4-х томах.— М.: Мысль, 1981.
- Астрофизика, кванты и теория относительности.— М.: Мир, 1982.
- Бронштейн М. П. Атомы и электроны.— М.: Наука, 1980.
- Вайнберг С. Гравитация и космология.— М.: Мир, 1975.
- Вейль Г. Симметрия.— М.: Наука, 1968.
- Время и современная физика.— М.: Мир, 1970.
- Гинзбург В. Л. О теории относительности.— М.: Наука, 1979.
- Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике.— М.: Наука, 1985.
- Гюйо М. Происхождение идеи времени.— СПб., 1899.
- Дубровский В. Н., Смородинский Я. А., Сурков Е. Л. Релятивистский мир.— М.: Наука, 1984.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика.— М.: Наука, 1968.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975.
- Киржниц Д. А. Проблема фундаментальной длины // Природа.— 1973.— № 1.— С. 38.
- Киржниц Д. А., Линде А. Д. Фазовые превращения в микромире и во Вселенной // Природа.— 1979.— № 11.— С. 20.
- Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности.— М.: Сов. Россия, 1975.
- Либшер Д.-Э., Новиков И. Д. Река времени // Природа.— 1985.— № 4.— С. 14.
- Линде А. Д. Раздувающаяся Вселенная // Успехи физ. наук.— 1984.— Т. 144, вып. 2.— С. 177.
- Марков М. А. О природе материи.— М.: Наука, 1976.
- Мигдал А. Б. Как рождаются физические теории.— М.: Педагогика, 1984.
- Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: В 3-х томах.— М.: Мир, 1978.
- Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц.— М.: Наука, 1984.
- Пиблс П. Физическая космология.— М.: Мир, 1975.
- Платон. Сочинения в 4-х томах.— М.: Мысль, 1982.
- Рейхенбах Г. Направление времени.— М.: ИЛ, 1962.
- Розенталь И. Л. Элементарные частицы и структура Вселенной.— М.: Наука, 1984.
- Синг Дж. Общая теория относительности.— М.: ИЛ, 1963.
- Скобельцын Д. В. Парадокс близнецов в теории относительности.— М.: Наука, 1966.
- Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология.— М.: Наука, 1974.

- Уитроу Дж. Естественная философия времени. — М.: Прогресс, 1964.
- Уитроу Дж. Структура и природа времени. — М.: Знание, 1984.
- Фейнман Р. Характер физических законов. — М.: Мир, 1968.
- Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения. — М.: Физматгиз, 1961
- Франкфорт Г. и др. В преддверии философии. — М.: Наука, 1984.
- Фридман А. А. Сочинения. — М.: Наука, 1966.
- Хокинг С. Край Вселенной.// Природа. — 1985. — № 4. — С. 21.
- Хокинг С., Изразль В. Общая теория относительности.// Успехи физ. наук. — 1981. — Т. 133, вып. 1. — С. 139.
- Эддингтон А. С. Теория относительности. — М.; Л.; ОНТИ, 1934.
- Эйнштейн А. Сочинения в 3-х томах. — М.: Наука, 1978.

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ВРЕМЯ И МЫ	5
<p>Чувство времени (5). Счетчик времени? (6) Альфа-ритм (7). Живые часы (10). От ощущения к понятию (11). Пространство (12). Пространство и время (14). Имена времени (15).</p>	
Глава 2. В ПОИСКАХ СУЩНОСТИ ВРЕМЕНИ	17
<p>Поток событий и законы природы (18). Великий год (19). Время и небо (20). Время и движение (21). Зенон (22). Ахиллес и черепаха (24). Мгновение и длительность (26). Окружность + прямая = спираль (27).</p>	
ГЛАВА 3. ИСТОРИЯ ЧАСОВ	31
<p>Солнечное время (31). «Время истекло» (35). Начало Нового времени (37). Часы на башне (38). Маятник Галилея (39). Автоколебания (40). Атомные часы (42). Модель Вселенной (43). Астрономические часы (45). Часы «Пульсар» (46).</p>	
Глава 4. АБСОЛЮТНОЕ ВРЕМЯ	49
<p>Галилей (49). Относительность (51). Инерция (52). Ньютон (54). Классическая механика (55). Инерциальные часы (56). Время классической механики (57). Время в «Началах» (58). Абсолютное время, абсолютное пространство (59).</p>	
Глава 5. ВРЕМЯ И СВЕТ	62
<p>Эйнштейн (63). Система отсчета (64). Скорость света (65). Ни прибавить, ни убавить (67). Абсолютный рекорд (68). Одновременность (69). Относительность времени (71).</p>	
Глава 6. СОБСТВЕННОЕ ВРЕМЯ	73
<p>Время <i>здесь</i> и время <i>там</i> (73). Быстрые пионы (77). Красное, зеленое, голубое (79). Эффект Доплера (81). «Световые» часы (82). Разбегание галактик (83). Сверхсветовые скорости? (85).</p>	
Глава 7. МИРОВАЯ ЛИНИЯ	87
<p><math>4 = 3 + 1</math> (87). Время — движение — пространство (88). События и лучи света (90). Прошлое, настоящее, будущее (92). Машина времени (93). Причина и следствие (97). Сегодня и вчера (98). Интервал (99). Бег времени (102).</p>	

Глава 8. ВРЕМЯ И ТЯГОТЕНИЕ	103
Всемирное тяготение (104). Принцип эквивалентности (106). Лифт Эйнштейна (107). Тяготение и свет (110). Замедление времени (111). Измерение (113). Астрономический экспери- мент (114). Черные дыры: время остановилось (115).	
Глава 9. ПАРАДОКС ЧАСОВ	118
Снаряд Жюль Верна (118). Ускорения и перегрузки (119). Кто старше? (121). Из пушки ... часами (122). Снова о четырехмерном (124). Кривизна (126).	
Глава 10. МИР ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ	128
Небесные сферы (129). Картина мира (132). Метагалакти- ка (139). Вне времени? (140). Фридман (141). Динамика Вселенной (143). Космическое время (145). Вселенная и мир (147).	
Глава 11. ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ	149
Сингулярность (149). Нуль времени (152). Часы Вселенной (153). Одновременность (154). Срезы времени (156). Гори- зонт (158). Будущее (160). Пульсации и связь времен (162).	
Глава 12. ВРЕМЯ И ЭНЕРГИЯ	164
Симметрия времени (166). Вечный двигатель (167). Как быть с энергией тяготения? (170). Кванты, волны, частицы (172). Соотношение неопределенностей (175). Время против энер- гии (176). Не сохраняется, но ... (178).	
Глава 13. ВОЛНЫ ВРЕМЕНИ	179
Тяготение и волны (180). Гравитон (182). Время среди кван- тов (183). Атом времени? (185). Время в самом начале (188). Из вакуума... (191).	
Глава 14. СТРЕЛА ВРЕМЕНИ	194
Бег и направление (194). Гипотеза Больцмана (195). Обра- щение времени (198). Гипотеза Эддингтона (201). <i>T</i> -ин- вариантность и «обширный ум» (202). От причины к следствию (205).	
Глава 15. ЧТО ТАКОЕ ВРЕМЯ?	206
Мир, время, мышление (207). Относительность (209). Кванты (212). Бег, необратимость, одномерность (215).	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	218

*Артур Давидович Чернин*

## ФИЗИКА ВРЕМЕНИ

---

Серия «Библиотечка «Квант». вып. 59

Редактор *М. Н. Андреева*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *Е. В. Морозова*

Корректоры *Л. И. Назарова, Л. С. Сомова*

ИБ № 32497

Сдано в набор 21.08.86. Подписано к печати 18.02.87. Т-05275. Формат 84 × 108/32. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,76. Усл. кр.-отт. 12,18. Уч.-изд. л. 13,58. Тираж 127 000 экз. Заказ 465. Цена 45 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы.

117071 Москва В-71, Леинский пр., 15.

Диапозитивы изготовлены в Ордена Октябрьской революции, Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградском производственно-техническом объединении «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136 Ленинград П-136, Чкаловский пр., 15.

Отпечатано с диапозитивов в типографии им. Котлякова издательства «Финансы и статистика» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 195273, Ленинград, Руставели, 13.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ В СЕРИИ «БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»:

- Вып. 1. М. П. Бронштейн. Атомы и электроны.  
Вып. 2. М. Фарадей. История свечи.  
Вып. 3. О. Оре. Приглашение в теорию чисел.  
Вып. 4. Опыты в домашней лаборатории.  
Вып. 5. И. Ш. Слободецкий, Л. Г. Асламазов. Задачи по физике.  
Вып. 6. Л. П. Мочалов. Головоломки.  
Вып. 7. П. С. Александров. Введение в теорию групп.  
Вып. 8. В. Г. Штейнгауз. Математический калейдоскоп.  
Вып. 9. Замечательные ученые.  
Вып. 10. В. М. Глушков, В. Я. Валах. Что такое ОГАС?  
Вып. 11. Г. И. Копылов. Всего лишь кинематика.  
Вып. 12. Я. А. Смородинский. Температура.  
Вып. 13. А. Е. Карпов, Е. Я. Гик. Шахматный калейдоскоп.  
Вып. 14. С. Г. Гиндикин. Рассказы о физиках и математиках.  
Вып. 15. А. А. Боровой. Как регистрируют частицы.  
Вып. 16. М. И. Каганов, В. М. Цукерник. Природа магнетизма.  
Вып. 17. И. Ф. Шарыгин. Задачи по геометрии: планиметрия.  
Вып. 18. Л. В. Тарасов, А. Н. Тарасова. Беседы о преломлении света.  
Вып. 19. А. Л. Эфрос. Физика и геометрия беспорядка.  
Вып. 20. С. А. Пикин, Л. М. Блинов. Жидкие кристаллы.  
Вып. 21. В. Г. Болтянский, В. А. Ефремович. Наглядная топология.  
Вып. 22. М. И. Башмаков, Б. М. Беккер, В. М. Гольховой. Задачи по математике: алгебра и анализ.  
Вып. 23. А. Н. Колмогоров, И. Г. Журбенко, А. В. Прохоров. Введение в теорию вероятностей.  
Вып. 24. Е. Я. Гик. Шахматы и математика.  
Вып. 25. М. Д. Франк-Каменецкий. Самая главная молекула.  
Вып. 26. В. С. Эдельман. Вблизи абсолютного нуля.  
Вып. 27. С. Р. Филонович. Самая большая скорость.  
Вып. 28. Б. С. Бокштейн. Атомы блуждают по кристаллу.  
Вып. 29. А. В. Бялко. Наша планета — Земля.  
Вып. 30. М. Н. Аршинов, Л. Е. Садовский. Коды и математика.  
Вып. 31. И. Ф. Шарыгин. Задачи по геометрии: стереометрия.  
Вып. 32. В. А. Займовский, Т. Л. Колупаева. Необычные свойства обычных металлов.  
Вып. 33. М. Е. Левинштейн, Г. С. Симин. Знакомство с полупроводниками.  
Вып. 34. В. Н. Дубровский, Я. А. Смородинский, Е. Л. Сурков. Релятивистский мир.  
Вып. 35. А. А. Михайлов. Земля и ее вращение.



- Вып. 36. А. П. Пурмаль, Е. М. Слободецкая, С. О. Травин.  
Как превращаются вещества.
- Вып. 37. Г. С. Воронов. Штурм термоядерной крепости.
- Вып. 38. А. Д. Чернин. Звезды и физика.
- Вып. 39. В. Б. Брагинский, А. Г. Полнарев. Удивительная гравитация.
- Вып. 40. С. С. Хилькевич. Физика вокруг нас.
- Вып. 41. Г. А. Звенигородский. Первые уроки программирования.
- Вып. 42. Л. В. Тарасов. Лазеры: действительность и надежды.
- Вып. 43. О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов. Международные физические олимпиады школьников.
- Вып. 44. Л. Е. Садовский, А. Л. Садовский. Математика и спорт.
- Вып. 45. Л. Б. Окунь.  $\alpha\beta\gamma\dots Z$  (Элементарное введение в физику элементарных частиц).
- Вып. 46. Я. Е. Гегузин. Пузыри.
- Вып. 47. Л. С. Марочник. Свидание с кометой.
- Вып. 48. А. Т. Филиппов. Многоликий солитон.
- Вып. 49. К. Ю. Богданов. Физик в гостях у биолога.
- Вып. 50. Занимательно о физике и математике.
- Вып. 51. Х. Рачлис. Физика в ванне.
- Вып. 52. В. М. Липунов. В мире двойных звезд.
- Вып. 53. И. К. Кикоин. Рассказы о физике и физиках.
- Рис. 54. Л. С. Понтрягин. Обобщения чисел.
- Вып. 55. И. Д. Данилов. Секреты программируемого микрокалькулятора.
- Вып. 56. В. М. Тихомиров. Рассказы о максимумах и минимумах.
- Вып. 57. А. А. Силин. Трение и мы.
- Вып. 58. Л. А. Ашкинази. Вакуум для науки и техники.