

Г. ЛИНДНЕР ФИЗИКА В КОСМОСЕ

ЛИНДНЕР

# ФИЗИКА В КОСМОСЕ





ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«М И Р»

HELMUT LINDNER

# PHYSIK IM KOSMOS

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG 1964

---

PHYSIK IM KOSMOS

**Г. ЛИНДНЕР**

---

**НОСИМОЕ**

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО

**В. А. РУДЕНКО**

С ПРЕДИСЛОВИЕМ

**Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКОГО**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»**

**Москва 1966**

Эта популярная книга излагает в общедоступной форме вопросы физики и астрономии, так или иначе связанные с завоеванием космоса.

Научное содержание книги богато и разнообразно. Автор обладает широкой и разносторонней эрудицией и вводит читателя в курс современного состояния науки. Уровень изложения не требует от читателя специальной подготовки. Книга написана ясным языком и прекрасно иллюстрирована. Она будет интересна и полезна широкому кругу читателей, в том числе школьникам старших классов.



Scan AAW

*Редакция по космическим исследованиям,  
астрономии и геофизике*

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В предлагаемой вниманию читателей популярной книге излагается в общедоступной форме ряд вопросов физики и астрономии, связанных так или иначе с завоеванием космоса.

Научное содержание книги богато и разнообразно. Это — основы механики Ньютона и ее применение к движениям небесных тел и космических кораблей, важнейшие проблемы астрономии и астрофизики (космические расстояния и размеры небесных тел, излучение звезд, источники их энергии, межпланетная и межзвездная среда, космические лучи и космическое радиоизлучение) с попутным изложением необходимых чисто физических вопросов и, наконец, понятие о проблемах общей космологии в связи с теорией относительности.

Автор обладает широкой и разносторонней эрудицией и вводит читателя в курс современного состояния науки. Уровень изложения довольно серьезен, хотя и не требует от читателя специальной подготовки. Впрочем, пониманию текста помогают 128 прекрасных иллюстраций.

Книга содержит изрядное количество формул, предполагающих знакомство читателя не только с элементарной алгеброй, но и с экспоненциальной функцией. Однако формулы сами по себе нисколько не мешают популярности изложения, примером чему может служить хотя бы «Занимательная механика» Я. И. Перельмана.

Довольно много места уделено также вопросам истории науки. При этом автор в ряде случаев подчеркивает приоритет и заслуги своих соотечественников, однако кое-где

допускает умаление роли ученых других стран или даже вообще не упоминает о них. Редакция позволила себе исправить некоторые прямые ошибки автора в этих и других вопросах и снабдить соответствующие места необходимыми примечаниями.

В наши дни, когда завоевание космоса стоит в центре внимания каждого мыслящего человека, книга Линднера будет интересна и полезна широкому кругу читателей.

*Д. А. Франк-Каменецкий*

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

## О чем пойдет речь в этой книге

Физика как наука о природе призвана помочь человеку в достижении великой цели: досконально изучить природу, проникнув в ее сокровеннейшие уголки и охватив весь огромный мир в целом. Физика не ставит границ нашему познанию мира и не отшатывается от необычайного. Для нее существует лишь один авторитет — реальные факты и явления, наблюдаемые человеком. Свободная от идолопоклонства и условностей, физика использует абсолютно все возможности разума и признает только те законы природы, которые можно установить при помощи наблюдений и эксперимента. Поэтому физические законы — это та же действительность, но выраженная в наиболее четкой форме. С течением времени стало ясно, что законы физики образуют единое большое целое. Уже давно поле деятельности физики не ограничивают стены лаборатории и стол экспериментатора. При помощи спектрографов, мощных телескопов и искусственных спутников физика проникает в глубины Вселенной. Эта наука поразительно любопытна. Космонавты — посланцы советских и американских ученых — ныне уже исследуют тайны космоса за пределами Земли. Разумеется, в этом деле нельзя проявлять легкомыслие и бросаться в космический океан без достаточной подготовки. Поэтому физические условия в космическом пространстве скрупулезно изучаются с поверхности Земли со всей возможной точностью.

Давайте и мы познакомимся с теми закономерностями, которые господствуют в космосе. Но правильно понять их мы сможем только в том случае, если основательно разберемся в некоторых основных физических законах, так как именно в понимании вещей, кажущихся очевидными, за последние десятилетия произошли кое-какие изменения.

Кроме того, автору хотелось бы сделать изучение физики возможно доступнее для любознательных. Для этого



мы постараемся показать на конкретных примерах, как можно объяснить во всех деталях действующие в космосе закономерности, и применить общие физические законы для решения чисто «космических» вопросов. При этом мы умышленно будем избегать гораздо более «простого» способа, который заключается в преподнесении читателю готовых результатов и ошеломляющих цифр. Читатель, который действительно хочет понять суть дела, должен не слепо доверять печатному тексту, а самостоятельно сделать расчет и убедиться, что все правильно. В большинстве случаев для этого не потребуется высшей математики.

Мы постараемся по возможности реже опираться на собственно астрономические данные и будем привлекать астрономию только в тех случаях, когда это безусловно необходимо для понимания взаимосвязи физических явлений или методов исследования, применяемых в космосе.

## Планетная система

Несмотря на многообещающие начинания в древности, до 1600 г. физика была лишь описательной наукой. Но задача физики состоит не только в описании наблюдаемых в природе явлений. Наукой в современном смысле слова она становится только тогда, когда начинает глубоко проникать в сущность вещей, познавать их взаимное влияние друг на друга и связь между ними, тем самым выявляя *всеобщую* закономерность, т. е. физический закон. Из таких законов при помощи перехода к менее общим, более частным законам можно получить все многообразие единичных фактов. Для этой цели проще и рациональнее всего формулировать закон в математической форме.

Описывая движение небесных светил таким образом, как оно представляется наблюдателю, мы получим довольно беспорядочную картину. Если при этом рассматривать Землю как неподвижное тело, то едва ли возможно установить какой-либо единый принцип движения. В то время как звезды кажутся равномерно обходящими Землю по кругам, с Луной и планетами дело обстоит иначе. Чтобы объяснить, почему они то опережают Солнце в видимом движении по небосводу, то отстают от Солнца, в древности принимали, что Луна и планеты движутся по *эпициклам*. Такая кривая с петлями образуется, если центр круга

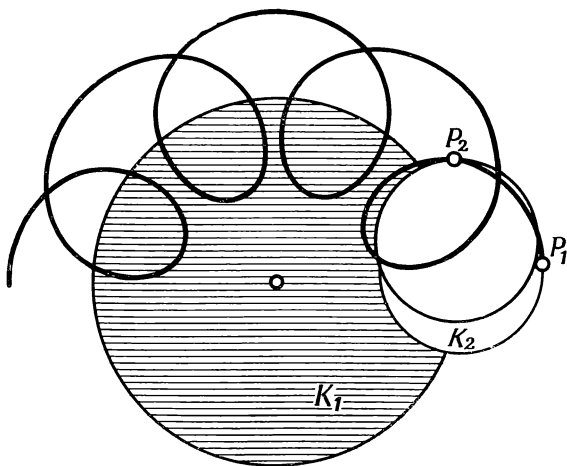


Рис. 1. Образование эпициклоиды.

$K_2$  (эпицикла.— *Перев.*) движется с постоянной скоростью по окружности другого круга  $K_1$ , так называемого *деферента* (рис. 1), и при этом круг  $K_2$  равномерно вращается. В то время как малый круг пройдет определенный отрезок пути по окружности большого круга, данная точка  $P_1$  окружности эпицикла переместится в новое положение  $P_2$ .

Посредством таких эпициклов можно было довольно правильно представить видимый путь планет <sup>1)</sup>. Однако, чтобы достичь более точного соответствия между этой теорией и наблюдениями, впоследствии пришлось принять всякого рода дополнительные гипотезы. Нужно было предположить, что Земля находится не в центре деферента, а планеты обращаются по вторичным эпициклам, которые в свою очередь движутся по главным эпициклам. Так возникли эпи-эпициклоиды, и картина стала невероятно запутанной. Но система все же целиком строилась из круговых движений, а Земля стояла как вкопанная. Эту картину мира, созданную Птолемеем (90—160 г. н. э.), в эпоху средневековья ревниво охраняли церковники, ибо в ней Земля считалась центром Вселенной.

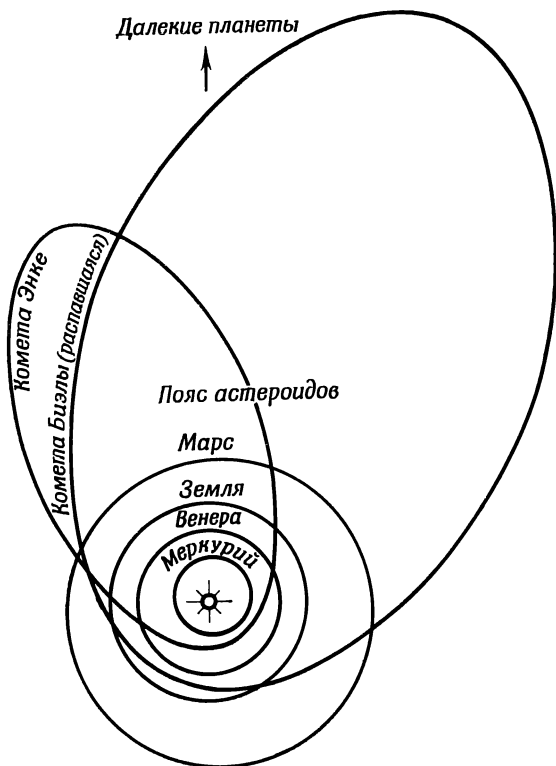
<sup>1)</sup> Не надо забывать, что телескоп был изобретен лишь в 1609 г., а до этого все наблюдения велись невооруженным глазом.— *Прим. ред.*

Поэтому предпринятая Николаем Коперником (1473—1543) попытка опровергнуть систему Птолемея и заменить ее принципиально другой теорией была по тем временам в высшей степени смелой. Коперник поместил Солнце в центр системы планет, обращающихся по круговым орбитам вокруг Солнца, и тем самым поразительно ее упростил.

Что же касается причины возникновения этого кругового движения, то здесь Коперник разделял взгляды Аристотеля: круговое движение является «естественным» и поэтому не нуждается в дальнейшем разъяснении. Правильное решение проблемы удалось найти только значительно позже. Коперник в ней разобраться не мог. Об этом свидетельствует и такой пример: в эпоху Коперника ученые, ни секунды не сомневаясь, переписывали утверждение Аристотеля, что у мухи должно быть восемь ног. Не удивительно, что и гипотеза о «естественном движении» тогда считалась немалым научным достижением.

Учению Коперника было трудно получить признание не только потому, что оно подвергалось ожесточенным нападкам церкви, но и по той причине, что положения планет, рассчитанные по этой теории, не совсем точно согласовались с наблюдениями. А закон движения, который не дает точных результатов, не может удовлетворить ученого, и, например, даже такой крупный астроном того времени, как Тихо Браге, также не был убежден в правильности системы Коперника.

В то время, когда Тихо Браге проводил свои наблюдения в Праге, у него работал очень способный помощник. Это был Иоганн Кеплер (1571—1630). Именно Кеплер снова и необыкновенно скрупулезно рассмотрел систему Коперника. Так как круговые орбиты не соответствовали действительным движениям планет, Кеплер исследовал другие возможные формы траектории. Шесть лет напряженной работы отдал он изучению орбиты Марса и в конце концов обнаружил, что она должна быть эллипсом определенных размеров и формы. В противоположность круговой орбите, планета в этом случае мчится вокруг Солнца не с постоянной скоростью, а быстрее вблизи него и относительно медленнее — вдали. Если бы Кеплеру был уже известен закон площадей (см. стр. 34), ему не надо было бы ломать голову. Но только после исключительно трудоемкого сравнения своих расчетов с наблюдениями он



Р и с. 2. Солнечная система с близкими планетами.

смог обнаружить, что произведение расстояния планеты от Солнца на ее скорость всегда постоянно.

Так были найдены первые два закона движения планет, названные именем Кеплера. Над открытием третьего закона, связывающего расстояние планеты от Солнца и время ее пробега по орбите, Кеплер работал еще 17 лет. Вот его законы:

**Первый закон.** Орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. (1)

**Второй закон.** Радиус-вектор планеты ометает в равные промежутки времени равные площади. (2)

**Третий закон.** Квадраты времен обращения двух планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит. (3)

# Тела солнечной системы

	Масса, кг	Диаметр по экватору, м	Среднее расстояние от Солнца, м	Звездный период обращения, сутки	Ускорение силы тяжести на поверхности, м/сек <sup>2</sup>	Число спутников	Критическая скорость м/сек
Солнце	$1,99 \cdot 10^{30}$	$1,392 \cdot 10^9$	—	—	273,98	—	$6,1756 \cdot 10^5$
Планеты							
Меркурий	$0,32 \cdot 10^{24}$	$4,840 \cdot 10^6$	$57,91 \cdot 10^9$	87,97	3,60	0	3 900
Венера	$4,87 \cdot 10^{24}$	$12,4 \cdot 10^6$	$108,21 \cdot 10^9$	224,70	8,50	0	10 300
Земля	$5,98 \cdot 10^{24}$	$12,756 \cdot 10^6$	$149,60 \cdot 10^9$	365,26	9,81	1	11 200
Марс	$0,64 \cdot 10^{24}$	$6,8 \cdot 10^6$	$227,9 \cdot 10^9$	686,98	3,76	2	5 100
Юпитер	$1900 \cdot 10^{24}$	$142,8 \cdot 10^6$	$778,3 \cdot 10^9$	4 332,59	26,0	12	60 200
Сатурн	$569 \cdot 10^{24}$	$120,8 \cdot 10^6$	$1428 \cdot 10^9$	10 759,2	11,2	9	36 300
Уран	$87 \cdot 10^{24}$	$47,6 \cdot 10^6$	$2872 \cdot 10^9$	30 687	9,4	5	22 000
Нептун	$103 \cdot 10^{24}$	$44,6 \cdot 10^6$	$4498 \cdot 10^9$	60 184	15,0	2	25 100

Плутон	$5,4 \cdot 10^{24}$	$14,4 \cdot 10^6$	$5910 \cdot 10^9$	90 700	8,0	0	10 730
--------	---------------------	-------------------	-------------------	--------	-----	---	--------

#### Спутники

Луна	$7,35 \cdot 10^{22}$	$3,476 \cdot 10^6$	$3,844 \cdot 10^8$ 1)	27,3217	1,62	—	2 375
Спутники Мар- са							
Фобос		$16 \cdot 10^3$	$9,4 \cdot 10^6$ 2)	0,32			
Деймос		$8 \cdot 10^3$	$23,5 \cdot 10^6$ 2)	1,26			

#### Крупнейшие астероиды

Церера	$8,3 \cdot 10^{20}$	$7,4 \cdot 10^5$	$413,9 \cdot 10^9$				
Паллада	$2,3 \cdot 10^{20}$	$4,8 \cdot 10^5$	$413,9 \cdot 10^9$				
Юнона	$0,16 \cdot 10^{20}$	$2,0 \cdot 10^5$	$399,4 \cdot 10^9$				
Веста	$1,1 \cdot 10^{20}$	$3,8 \cdot 10^9$	$353,2 \cdot 10^9$				

1) От центра Земли.

2) От центра Марса.

Изобразить всю солнечную систему в масштабе очень трудно из-за слишком больших различий в размерах орбит. Поэтому на рис. 2 даны только орбиты близких планет, почти круговые. Только орбиты Меркурия и Марса эксцентричны настолько, что это можно заметить на рисунке.

Но планеты со своими спутниками («лунами») — не единственные тела в солнечной системе. В промежутке между близкими и далекими планетами находится множество *астероидов*. Это маленькие и мельчайшие тела различной величины и формы, которые похожи на обломки ранее существовавшей небольшой планеты. До настоящего времени удалось точно определить орбиты около 1600 астероидов. Так как их пути многократно пересекаются, столкновения могут возникать довольно часто. Часть осколков выпадает на Землю и попадает к нам в руки как *метеориты*.

К членам солнечной системы принадлежат также многочисленные *кометы*, для которых характерны сильно вытянутые эллиптические орбиты. На рис. 2 показаны только две кометные орбиты.

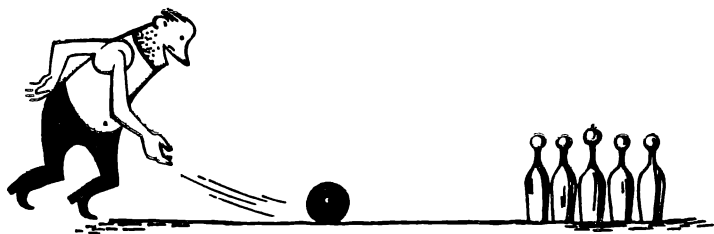
Структура комет такова, что они могут легко разрушаться. При их распаде образуется целый поток небольших метеорных тел, которые сгорают при входе в земную атмосферу, образуя дождь «падающих звезд» (см. стр. 160).

## О возникновении классической механики

В законах, найденных Кеплером, отсутствовал важнейший элемент, необходимый с точки зрения современной физики. Хотя законы Кеплера с достаточной точностью переводили результаты наблюдений на язык цифр и создали отличную основу для точного расчета положения каждой планеты в любой момент времени, никто не мог объяснить, почему планеты должны двигаться именно по эллипсам.

Как мы сегодня знаем, здесь речь идет об общих законах механики. Им подчиняется и футбольный мяч и кегельный шар (рис. 3).

До Галилея (1564—1642) механика ограничивалась только законами статики. Никому еще не удавалось охватить процессы движения или, точнее, никто не прило-



Р и с. 3. Инерция.

жил достаточно труда, чтобы исследовать их. Если камень падал на землю, то он лишь достигал «своего естественного положения». Так учил Аристотель, и потому все дальнейшие размышления считались ненужными.

Галилей не только построил телескоп и при помощи его открыл на небе много нового. Он был ревностным защитником системы Коперника и стал основателем научного учения о движении. Он открыл закон инерции, закон движения свободно падающего тела, закон, которому подчиняются колебания маятника, и многие другие. Инквизиция преследовала великого ученого вплоть до смерти. Под угрозой пожизненного тюремного заключения ему было запрещено излагать ненавистное инквизиции учение о *движущейся* Земле. В одном из своих писем он писал: «Я думаю, что в мире нет большей ненависти, чем та, которую невежда испытывает к знанию».

Метод установления законов природы при помощи эксперимента и логических выводов, принесший столько успехов Галилею, был дополнен и усовершенствован Исааком Ньютоном (1643—1727). Прежде всего он выяснил важную роль *массы* тела, участвующего в движении, и выработал современное понятие *силы*. Он был основателем динамики и разработал ее законы так всеобъемлюще и точно, что они и в настоящее время господствуют в мире тел привычных нам размеров и скоростей.

Механика Ньютона пригодна для любых тел, как земных, так и космических. Сегодня ее называют также *классической механикой*. Так Ньютон поставил на службу астрономии, бывшей до того лишь искусством наблюдения, теоретическую небесную механику. Ему удалось вывести законы Кеплера из уравнений механики и тем самым обосновать их.



# АКСИОМЫ НЬЮТОНА

## Инерция

В естествознании истинными признаются лишь такие утверждения, которые можно обосновать логически. К такому порядку пришли не сразу, а после основательных размышлений. Зато теперь никого не удивляет, что в науке принято не столько говорить, сколько обдумывать и вычислять.

При этом каждая теорема выводится из других, более простых утверждений при помощи однозначных (в большинстве случаев математических) доказательств. Эта цепочка выводов всегда имеет где-то начало, т. е. место, где знания опираются на определенный простейший опыт. Формулировка такого «начала» похожа на формулировку теоремы, однако его уже нельзя вывести из других, еще более простых положений. Такое основное начало называется *аксиомой*. Аксиома не может быть доказана при помощи логики, но она со своей стороны служит для доказательства других теорем. Следовательно, правильность аксиомы может быть установлена только путем опыта.

Ньютон положил в основу своего учения три аксиомы. Будет неплохо, если мы займемся ими. Начнем с его первой аксиомы.

**Первая аксиома Ньютона.** *Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.* (4)

Это свойство тела называется *инерцией*. По своей природе каждое тело противится попытке изменить состояние своего движения. Это удастся только в том случае, если на тело действуют *силы*, которые ускоряют или замедляют его движение.

Ньютон мог отчетливо видеть, что чернильница, стоящая на его столе, не сдвигается с места, пока до нее никто

не дотрагивается; однако, чтобы проверить на практике вторую часть аксиомы, он должен был бы отправиться в космическое пространство. Если бы там можно было поместить тело, полностью изолированное от всех мыслимых внешних воздействий, то оно двигалось бы прямолинейно и сохраняло бы именно ту скорость, которую имело в тот момент, когда его выпустили из рук. На Земле такой опыт невыполним: непременно возникают силы, которые тормозят тело; невозможно ликвидировать силу тяжести. Закон инерции требует, чтобы поверхность, по которой движется тело, была предельно гладкой. Даже в космическом пространстве мало-мальски подходящее место надо искать очень долго; ибо и в самых отдаленных уголках Вселенной на исследуемое тело будет действовать сила притяжения звездных систем, находящихся не слишком далеко.

### Масса и сила

Инерцию, присущую телу, непосредственно обнаружить нельзя. Чтобы ее измерить, надо прикладывать к телу силы. В зависимости от величины силы тело приобретет большее или меньшее ускорение  $a$ , которое прямо пропорционально действующей силе  $F$ . Коэффициент пропорциональности называют массой  $m$  тела. Таким образом мы получаем

*основной закон механики:*

$$F = m \cdot a. \quad (5)$$

Отсюда видно, что масса — это не что иное, как мера инерции. Когда трогаешь какое-нибудь тело, ощущаешь его форму, когда осматриваешь — узнаешь его окраску. А как только захочешь столкнуть его с места или потянуть, почувствуешь, как оно этому сопротивляется и подчиняется только силе. Инерция — это лишь одно из многочисленных свойств вещества, а не само вещество. О веществе мы знаем, что оно состоит из крошечных атомов, а они в свою очередь — из еще более мелких элементарных частиц.

Допустим, оно находится перед нами, это первичное вещество, которое можно вполне себе представить сконцентрированным в виде крошечных ядрышек или шариков. С некоторыми его замечательными свойствами нам еще предстоит познакомиться. Однако было бы крайне необду-



Р и с. 4. Единица силы: 1 ньютон.

манно заключить, что эти свойства проявляются только как упомянутая выше масса  $m$ . Во-первых, от такого категорического суждения наше познание не продвинулось бы ни на шаг, а во-вторых, тело не может состоять из одних только с в о й с т в. Одно лишь можно сказать с уверенностью, что понятие массы тесно связано со в с е м и свойствами тела. Массу нельзя заставить исчезнуть, как по волшебству, и нельзя внезапно извлечь на белый свет, словно из пустого цилиндра фокусника. Это понятие есть часть действительности, или, как говорят философы, объективная реальность. Отвергнуть эту действительность еще не пришло на ум ни одному здравомыслящему физику или химику. Это сама жизнь.

Единицей меры инерции, или массы, является килограмм ( $кг$ ). Пусть нам надо увеличить скорость тела, имеющего массу  $1 кг$ , на  $1 м/сек$  в течение  $1 сек$ , другими словами, сообщить ему ускорение  $a = 1 м/сек^2$  (рис. 4). Для этого нам потребуется приложить силу

$$F = 1 кг \cdot 1 м/сек^2 = 1 кг \cdot м/сек^2.$$

В честь того, кто впервые обнаружил и сформулировал эту связь, единицу силы называют ньютон ( $н$ ).

$$1 н = 1 кг \cdot м/сек^2. \quad (6)$$

Кто больше привык к килограмм-силе ( $кгГ$ ), может пересчитать:

$$9,81 н = 1 кгГ. \quad (7)$$

## Количество движения

Только что описанный закон был сформулирован самим Ньютоном не в той форме, в которой мы его записали. Ученый пошел по другому, достойному внимания пути. Этот путь можно назвать окольным или обстоятельным, но ни в коем случае не старомодным. А именно, Ньютон исходил не из самой массы, а из произведения массы и скорости тела. Это произведение — *количество движения*, или *импульс*,

$$I = mv. \quad (8)$$

На первый взгляд может показаться, что эти две физические величины были соединены несколько произвольно. А как обстоит дело в действительности? Если кому-нибудь, как человеку на рис. 5, падает на ногу молоток, он причиняет боль не только потому, что имеет большую массу, но, кроме того, и по той причине, что падает с достаточной скоростью. В действие вступает не один из двух факторов, но оба вместе, и конечный результат зависит от их произведения. Тяжелый молоток, сброшенный с незначительной высоты, причиняет точно такие же неприятности, как и маленький молоточек, падающий с большой высоты, если только произведение массы на скорость в обоих случаях одинаково.

Понятие силы становится нагляднее, если при выводе исходить из количества движения. Ньютон так и поступил, и это отразилось в его второй аксиоме.

Р и с. 5. Количество движения  
(импульс).



**Вторая аксиома Ньютона.** *Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует:*

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} . \quad (9)$$

Что означает это равенство, станет тотчас же ясно, если вспомнить первую аксиому. Там сущность инерции проявлялась в свойстве тела сохранять постоянную скорость. Первую аксиому теперь можно выразить по-другому: при отсутствии внешних сил количество движения  $mv$  всегда должно оставаться постоянным. И наоборот, чем быстрее должно измениться количество движения, тем бóльшую силу надо приложить. Этим объясняется, например, огромное силовое воздействие кузнечного молота на наковальню. В какую-то долю секунды молот отдает весь свой импульс обрабатываемой детали.

Легко заметить, что уравнения (5) и (9) с формальной точки зрения говорят об одном и том же. Принимая как само собой разумеющееся, что при движении масса не изменяется, можно переписать последнее уравнение в следующем виде:

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} .$$

Частное  $\Delta v / \Delta t$  представляет собой не что иное, как ускорение  $a$ . Ньютон проявил очень тонкую научную интуицию, когда при определении силы исходил из количества движения  $mv$  и уравнения (9). Однако прошло более 200 лет, появилась теория относительности, и было установлено, что масса зависит от скорости (см. стр. 213). Правда, это заметно лишь при очень больших скоростях. Но Ньютон в пророческом предвидении избежал ошибки, не отделив в своей формулировке второй аксиомы массу от скорости.

### Действие и противодействие

В заключение Ньютон говорит о действии, которое оказывает одно тело на другое:

**Третья аксиома Ньютона.** *Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе, взаи-*

*модействия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны.* (10)

Часто употребляют сокращенную формулировку этой аксиомы:

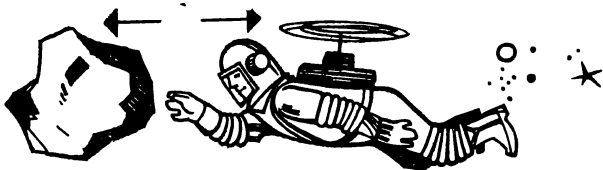
*Действие равно противодействию.*

О практическом значении этого закона можно не говорить. Он лежит в основе всей статики и выражает тот факт, что нигде в природе не существуют отдельные силы. Они возникают всегда парами.

Изучению следствий динамики, вытекающих из принципа противодействия, мешает трение. Оно возникает постоянно. Чтобы исключить это и прочие не подвластные контролю влияния, нам лучше всего отправиться в космическое пространство. Особого труда не составит найти там небольшой, подходящих размеров астероид. Мы оседлаем его, как когда-то Мюнхгаузен — пушечное ядро, и спокойно и бесшумно полетим на этом астероиде, не ощущая ни малейшего встречного ветра. Так как картина окружающего мира изменяется незаметно, мы совсем не будем чувствовать, что движемся. Тишина вокруг идеальная, чтобы не сказать скучная до зевоты.

Это наталкивает нас на легкомысленную идею. А почему бы нам не изменить каким-нибудь образом состояние движения нашего почтенного астероида, притормозить его или, наоборот, ускорить? Так как ничего более подходящего нам на ум не приходит, мы даем ему сильный толчок. Постараемся сделать это настолько искусно, чтобы направление толчка точно совпадало с прямой, соединяющей центры тяжести нашего тела и астероида. Если это не удастся, то оба тела начнут еще и вращаться. Итак, желаемый эффект достигнут — астероид тотчас же поддался нашему нажиму и бесшумно устремился вперед.

Но если бы можно было отметить в пространстве то место, где мы толкнули астероид, то мы с удивлением обнаружили бы, что скорость нашего собственного тела тоже изменилась и при этом в прямо противоположном направлении. Мы не только оттолкнули от себя небесное тело, но в тот же самый момент оттолкнулись *от него* сами (рис. 6). Мы хотели создать одну силу, а получили две, совсем не желая этого. С этим ничего не поделаешь.



Р и с. 6. Действие и противодействие.

Мы полностью подвластны третьей аксиоме Ньютона. В пустом пространстве нет ни тормоза, ни хотя бы километрового столба, за который мы могли бы ухватиться. До тех пор пока нам не подвернется какой-нибудь другой предмет, мы не сможем повторить этот опыт, так как инерция несет нас все дальше и дальше от нашего астероида.

Между тем у нас достаточно времени, чтобы осмыслить происшедшее. Если мы в уравнении (9) освободимся от знаменателя, то получим новое уравнение

$$F\Delta t = \Delta(mv), \quad (11)$$

или

*импульс силы равен изменению количества движения.*

Слева стоит причина, справа — результат. Причиной этого рокового и неисправимого стремления тел в стороны друг от друга была сила  $F$ , с которой мы в течение времени  $\Delta t$  так легкомысленно воздействовали на наш астероид. В результате количество движения увеличилось на величину  $\Delta(mv)$ . Но по третьей аксиоме Ньютона сила может существовать только одновременно с противодействующей силой. Таким образом, второе тело получает такое же приращение количества движения, но в противоположном направлении. В повседневной жизни этот импульс в большинстве случаев называют *отдачей*. Чтобы различать толчок и отдачу, присваиваем им индексы 1 и 2 и пишем

$$m_1\Delta v_1 = -m_2\Delta v_2. \quad (12)$$

Считая массу постоянной, мы вынесли ее за знак приращения. Знак «минус» показывает, что скорости направлены в противоположные стороны. Из этого равенства видно, что скорости обоих тел обратно пропорциональны их массам. Это поясняется также следующим примером.

*Пример.* Примем, что масса астероида составляет  $m_1 = 140$  кг, а масса нашего собственного тела  $m_2 = 70$  кг. Силу нашего толчка примем равной 7 н (около 0,7 кг) и действующей в течение времени соприкосновения, равного 4 сек. Из уравнения (12) получим изменения скоростей

$$\Delta v_1 = \frac{F \Delta t}{m_1} = \frac{7 \text{ кг} \cdot \text{м/сек}^2 \cdot 4 \text{ сек}}{140 \text{ кг}} = 0,2 \text{ м/сек};$$

$$-\Delta v_2 = \frac{F \Delta t}{m_2} = \frac{7 \text{ кг} \cdot \text{м/сек}^2 \cdot 4 \text{ сек}}{70 \text{ кг}} = 0,4 \text{ м/сек};$$

После толчка оба тела летят друг от друга с относительной скоростью  $(0,2 + 0,4) \text{ м/сек} = 0,6 \text{ м/сек}$ .



# ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

## Сохранение количества движения

Из третьей аксиомы можно получить еще одно следствие. Для этого в формуле (12) запишем все члены в левой части:

$$m_1\Delta v_1 + m_2\Delta v_2 = 0. \quad (13)$$

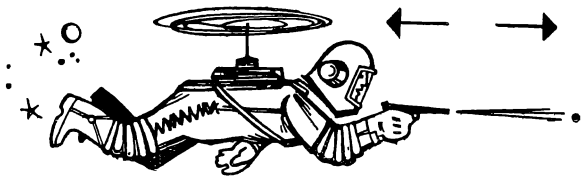
Полученное уравнение означает, что сумма изменений количеств движения обоих тел — астероида и нашего тела — равна нулю. Хотя каждое из них и изменило свое количество движения, полное количество движения осталось неизменным. Однако не надо забывать, что речь идет только о таких двух телах, которые считаются изолированными от всех посторонних воздействий. В таком случае говорят о «замкнутой системе», а соответствующий закон формулируется так:

**Закон сохранения количества движения.** *Полное количество движения замкнутой системы всегда остается постоянным.* (14)

Что бы ни произошло с отдельными телами системы, полное количество движения никогда не изменится ни в малейшей степени.

Но вернемся к нашему собственному положению в космосе. Как вы помните, мы необдуманно и легкомысленно отделились от астероида. С тех пор прошло уже немало минут. Мы безнадежным взглядом следим, как беглец исчезает вдаль, и начинаем отчаянно загребать руками и ногами. Ничто не помогает. Наши конечности — это только отдельные части ограниченной системы нашего тела, поэтому двигая ими, мы не можем ни задержать, ни ускорить движение всего тела.

Но как это часто бывает в напряженных ситуациях, внезапно нас осеняет спасительная идея. Мы засовываем



Р и с. 7. Отдача.

руку в карман скафандра и нащупываем там заряженный пистолет, который сунули туда на всякий случай. Ведь никогда нельзя узнать заранее, что тебе может встретиться в неизведанном космическом пространстве. Недолго думая, мы достаем это оружие, поворачиваемся к астероиду спиной, целимся в ту точку пространства, по которой мы собираемся ориентировать наш полет, и спускаем курок (рис. 7). Толчок, и мы чувствуем, что наша скорость значительно уменьшилась. Второй выстрел приводит нас почти в состояние покоя. А еще после нескольких выстрелов мы начинаем догонять астероид.

Казалось бы, это выглядит как недопустимое нарушение закона сохранения количества движения, который мы только что торжественно провозгласили. Но дело обстоит как раз наоборот, так как пистолетная пуля была и остается составной частью нашей системы. Она принадлежит к системе и когда мирно лежит в патроне, и когда вылетает из дула, сопровождаемая вспышкой и пороховым дымом. (Кстати, обратите внимание, что звука выстрела мы не слышали, так как в безвоздушном пространстве звуковые волны не распространяются.)

Итак, суммарное количество движения системы «стрелок — пистолетная пуля» не изменилось. Но нам достаточно того, что изменились импульсы ее обеих составных частей.

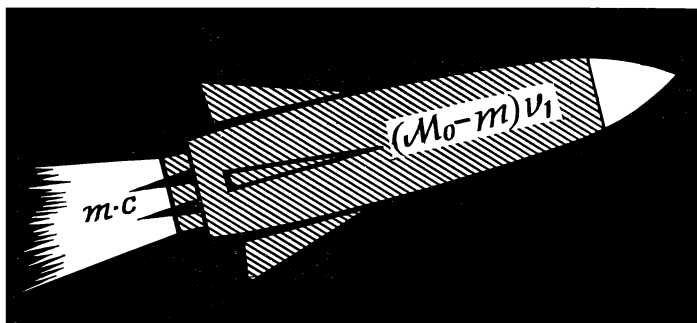
Итак, закон сохранения количества движения дает нам единственную возможность управлять полетом в пустом пространстве. Находясь там, всегда надо иметь с собой что-нибудь такое, что можно отбросить или чем можно выстрелить. Пистолет можно заменить небольшой ракетой. В случае крайней необходимости можно с силой отбросить бумажник или зажигалку. Все равно эти предметы в космосе бесполезны.

После всего сказанного легко понять, что из всех существующих типов двигателей для искусственных спутников и космических кораблей пригоден только ракетный двигатель. В случае применения такого двигателя отбрасываемая масса  $m$  состоит из газообразных продуктов сгорания, которые вытекают из камеры сгорания со скоростью  $v$ . Они образуются в результате взаимодействия горючего (углеводороды, водород, этиловый спирт, аммиак, скипидар и т. п.) и окислителя (жидкий кислород, перекись водорода, азотная кислота). Оба компонента берутся в большинстве случаев в жидком виде. В так называемых твердотопливных ракетах горючее и окислитель образуют твердую смесь. Чтобы количество движения  $mv$  было как можно больше, скорость истечения  $v$  должна быть достаточно велика. Она же в свою очередь будет тем больше, чем выше энергия, выделяющаяся при сгорании применяемой смеси, и чем меньше средний молекулярный вес продуктов сгорания. С другой стороны, удельный вес топлива должен быть по возможности наибольший, ибо тогда уменьшится объем и масса топливных баков и прочей аппаратуры на борту ракеты. У топлив, применяемых в настоящее время, скорость истечения составляет 2000—2500 м/сек. На современном этапе развития техники в самом лучшем случае может быть достигнута скорость истечения около 3800 м/сек.

### Уравнение движения ракеты

Итак, нам известен физический принцип движения в пустом пространстве. Технический путь к его осуществлению был намечен еще К. Э. Циолковским (1857—1935), впервые указавшим, что только ракетный двигатель дает человеку возможность разорвать оковы земного притяжения.

Мы не будем заниматься техническими деталями, а рассмотрим основной физический принцип, который был изложен в работах Циолковского. Речь идет о следующей задаче: за единицу времени ракета выбрасывает определенное количество продуктов сгорания, масса которых равна  $m$ . Они покидают ракету со скоростью  $s$ , которая остается постоянной. При этом общая масса ракеты непрерывно уменьшается, благодаря чему сила отдачи действует все более эффективно.



Р и с. 8. Уравнение импульсов в конце первого единичного отрезка времени.

Затем следует решающий вопрос: какова должна быть начальная масса  $M_0$  ракеты, если ракета *после выгорания топлива*, массу которой мы обозначим  $M$ , должна достичь заданной *конечной* скорости  $v$ ?

Чтобы яснее представить себе весь процесс, рассмотрим его по отдельным этапам. Пусть к концу первого единичного отрезка времени ракета приобрела скорость  $v_1$ , в то время как ее масса составляла  $M_1 = M_0 - m$ . Уравнение импульсов (12) в этом случае (рис. 8) запишется в виде

$$M_1 v_1 = m c.$$

Знак минус мы отбросили, так как нам и без того известно, что направления  $v$  и  $c$  противоположны. Зная, что  $m = M_0 - M_1$ , мы можем также написать

$$M_1 v_1 = (M_0 - M_1) c,$$

откуда получаем

$$\frac{M_0}{M_1} = 1 + \frac{v_1}{c}.$$

Пусть в течение второго единичного отрезка времени масса ракеты снова уменьшилась на величину  $m$  и к концу его составила  $M_2 = M_1 - m$ . Тогда соответствующее уравнение импульсов  $M_2 v_2 = m c$  дает нам

$$\frac{M_1}{M_2} = 1 + \frac{v_2}{c}.$$

Для следующего единичного отрезка времени получаем

$$\frac{M_2}{M_3} = 1 + \frac{v_3}{c} \text{ и т. д.}$$

Величины  $v_1, v_2, v_3$  являются по существу *приращениями* скорости за соответствующие единичные отрезки времени. Эти величины не равны друг другу. Отношение начальной массы к конечной можно представить в виде произведения

$$\frac{M_0}{M} = \frac{M_0}{M_1} \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{M_2}{M_3} \cdot \dots = \left(1 + \frac{v_1}{c}\right) \left(1 + \frac{v_2}{c}\right) \left(1 + \frac{v_3}{c}\right) \dots$$

Теперь необходимо еще привести это сложное выражение к удобному виду. Искомая конечная скорость получается при этом как сумма отдельных составляющих  $v_1 + v_2 + v_3 \dots$ . Вывод этот дан в подстрочном примечании<sup>1)</sup>.

1) Для этого разделим каждый отдельный единичный отрезок времени, например *первый*, на  $t$  равных частей. Тогда можно приблизительно принять, что за эти относительно малые промежутки времени скорость получает одинаковые по величине приращения, равные  $v_1/t$ . Исходя из этого, получим

$$\frac{M_0}{M_1} = \left(1 + \frac{v_1}{tc}\right) \left(1 + \frac{v_1}{tc}\right) \dots = \left(1 + \frac{v_1}{tc}\right)^t.$$

Сделаем подстановку  $\frac{v_1}{tc} = \frac{1}{n}$ . Тогда  $t = \frac{v_1 n}{c}$  и для *первого* единичного отрезка времени будем иметь

$$\frac{M_0}{M_1} = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{\frac{nv_1}{c}} \approx e^{\frac{v_1}{c}},$$

так как выражение  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$  для очень больших значений  $n$  как известно, равно основанию натурального логарифма  $e = 2,718\dots$ . Аналогично получаем для второго единичного отрезка времени

$\frac{M_1}{M_2} = e^{v_2/c}$  и т. д. Общее произведение запишется в виде

$$\frac{M_0}{M} = e^{\frac{v_1}{c}} \cdot e^{\frac{v_2}{c}} \cdot e^{\frac{v_3}{c}} \dots$$

Это произведение можно упростить, если сложить показатели, причем  $\frac{v_1}{c} + \frac{v_2}{c} + \frac{v_3}{c} + \dots = \frac{v}{c}$ . Отсюда и получаем уравнение движения ракеты без учета силы тяжести

$$\frac{M_0}{M} = e^{v/c}.$$

Как конечный результат получаем

*уравнение движения ракеты без учета силы тяжести:*

$$\frac{M_0}{M} = e^{v/c}. \quad (15)$$

Закон, выражаемый этим уравнением, дает строгую формулировку требования, которому должна удовлетворять каждая ракета: масса  $M_0$  ракеты на старте должна быть во много раз больше, чем масса  $M$  ракеты без топлива, т. е. полезная нагрузка. Большую часть массы ракеты должно составлять топливо, которое сгорает в процессе разгона. Как видно из уравнения (15), на отношение двух масс решающее влияние оказывает скорость истечения  $c$  продуктов сгорания.

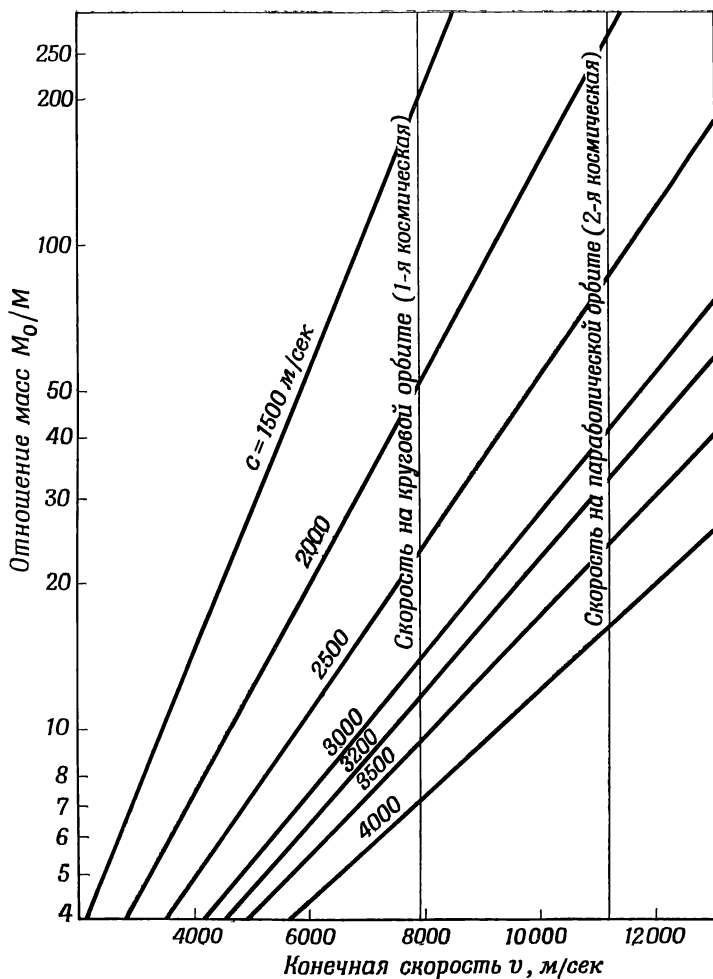
Предположим, что  $c = 3200$  м/сек, в то время как ракета должна достигнуть конечной скорости  $v = 8000$  м/сек. Тогда отношение масс получается равным

$$\frac{M_0}{M} = e^{\frac{8000}{3200}} = e^{2,5} \approx 12,2.$$

Это означает, что ракету, которая должна приобрести скорость, достаточную для выхода на круговую орбиту вокруг Земли, т. е. так называемую первую космическую скорость  $v_k$  (стр. 49), необходимо загрузить топливом (горючее + окислитель), масса которого будет примерно в 12 раз больше массы ракеты без топлива.

На рис. 9 показана зависимость отношения масс от конечной скорости, которую нужно достигнуть. Поскольку это отношение сильно зависит от скорости истечения  $c$ , графики построены для различных ее значений — от 1500 до 4000 м/сек. Рассматривая график для  $c = 3200$  м/сек, можно обнаружить, что отношение масс вырастает до еще более неприятного значения 33 в том случае, если надо достигнуть так называемой второй космической скорости  $v_{2k} = 11\,200$  м/сек (стр. 73).

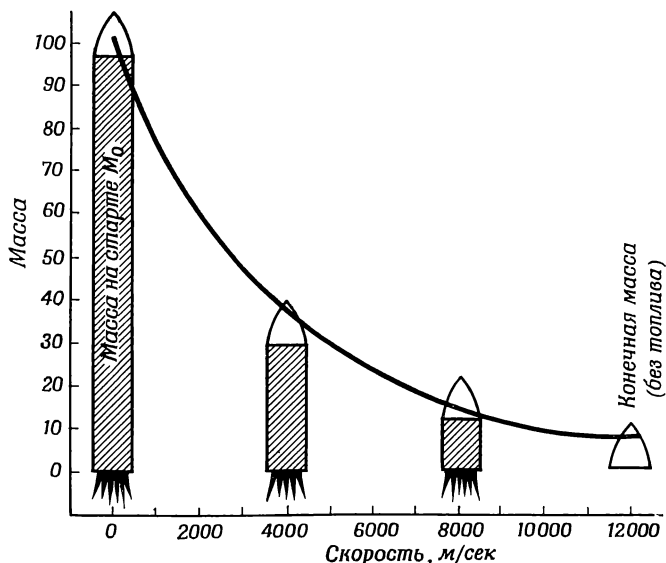
Однако отношение масс весьма заметно уменьшается, если мы располагаем горючим с более высокими скоростями истечения. Для химических топлив практически достижимый предел  $c$  составляет 3500 м/сек. Это означает, что для достижения второй космической скорости масса топлива должна в 25 раз превышать массу ракеты без топлива.



Р и с. 9. Отношение масс для идеальной ракеты в зависимости от конечной скорости (без учета силы тяжести).

На рис. 10 показано, насколько быстро уменьшается масса ракеты при возрастании ее скорости в том случае, когда скорость истечения газов  $c = 3000$  м/сек. При скорости полета ракеты  $v = 7900$  м/сек оставшаяся масса топлива составляет всего лишь 8% от первоначальной.

Все эти цифры получены в результате решения чисто теоретической задачи. При ее постановке мы не учитывали, например, обстоятельства, имеющие место при старте ракеты с Земли. Вывод уравнения (15) был основан только на законе сохранения количества движения, т. е. при условии, что на ракету не действуют никакие внешние силы. Но в действительности дело обстоит иначе. Помимо сопротивления воздуха в атмосфере существует еще сила тяжести, которую ракете необходимо преодолеть в первую очередь. Влияние этой силы можно учесть приближенно, если предположить, что ракета через промежуток времени  $t$  достигнет скорости падения  $v = gt$  [по уравнению (23), стр. 41], причем ее собственная скорость (относительно воздуха.— *Ред.*) при этом должна быть равна 0. Чтобы как-то учесть эту потерю скорости, надо вставить в уравнение (15) вместо  $v$  сумму  $v + gt$ .



Р и с. 10. Уменьшение массы ракеты во время полета при скорости истечения газов  $c = 3000$  м/сек.



С другой стороны, продолжительность подъема  $t$  зависит от того, с каким ускорением  $a$  ракета набирает высоту. Его часто выражают числом, в  $n$  раз бóльшим ускорения силы тяжести  $g$  и равным  $a = v/t = ng$ . Это равенство можно записать в виде  $gt = v/n$ , и тогда уравнение (15) в обобщенной форме примет вид

$$\frac{M_0}{M} = e^{\frac{v}{c} \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \quad (16)$$

— уравнение движения ракеты с учетом силы тяжести.

Предположим (см. пример на стр. 29), что ракета взлетает с ускорением, вдвое превышающим ускорение силы тяжести. Это означает, что она удаляется от Земли в направлении, перпендикулярном к земной поверхности, с ускорением  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ . Отсюда следует, что  $n = 2$  и  $\left(1 + \frac{1}{n}\right) = 1,5$ . Отношение масс вырастает благодаря этому до значения

$$\frac{M_0}{M} = e^{2,5 \cdot 1,5} = e^{3,75} = 42.$$

В результате нашего расчета мы выяснили, что для транспортировки массы  $M = 1 \text{ кг}$  необходимо вытолкнуть из двигателя в виде продуктов сгорания массу топлива, равную  $M_0 - M = 41 \text{ кг}$ . Чтобы транспортировать такое количество топлива, необходимы топливные баки и прочее оборудование, служащее для управления и других целей. Все эти агрегаты входят в собственную полезную массу ракеты. Чтобы свести этот необходимый для полета балласт к минимуму, применяют, как известно, принцип многоступенчатой ракеты, для чего двигатель разделяют на несколько (от 2 до 5) ступеней. После выгорания топлива в каждой ступени эта часть двигателя больше не нужна и поэтому отбрасывается, благодаря чему создавать дальнейшее ускорение становится намного легче.

В качестве примера можно привести американскую военную ракету «Атлас». Это двухступенчатая ракета, общая масса которой на старте равна  $110 \text{ т}$ , из которых  $100 \text{ т}$  составляет топливо. Она достигает конечной скорости  $v = 7200 \text{ м/сек}$  и доставляет «полезный» груз  $1,5 \text{ т}$  на расстояние  $10\,000 \text{ км}$ .

Мы видим, что ракетной технике приходится решать чрезвычайно трудные проблемы, когда надо достичь ско-

ростей, необходимых для выхода в космическое пространство. Решение этих проблем может быть очень важным и интересным. Но так как сейчас мы занимаемся физикой, нам вполне достаточно того, что технические задачи уже решены. Убедительнее всего об этом свидетельствуют блестящие успехи советской ракетной техники.

### Момент количества движения

Как следует из первой аксиомы Ньютона, закон инерции говорит только о прямолинейно движущемся теле. Но разве вращающееся тело ведет себя по-другому? Совсем нет; нетрудно заметить, что инерция махового колеса, насаженного на первоклассные, хорошо смазанные подшипники, проявляется еще отчетливей, чем, скажем, у скользящего по льду тела. Такое колесо может вращаться в течение очень долгого времени, пока не остановится полностью.

Для вращающегося тела вводят понятие *момента количества движения*, который рассчитывают определенным образом. Но так как на небе нет маховых колес, мы не будем уделять особого внимания этому понятию. Нам достаточно знать

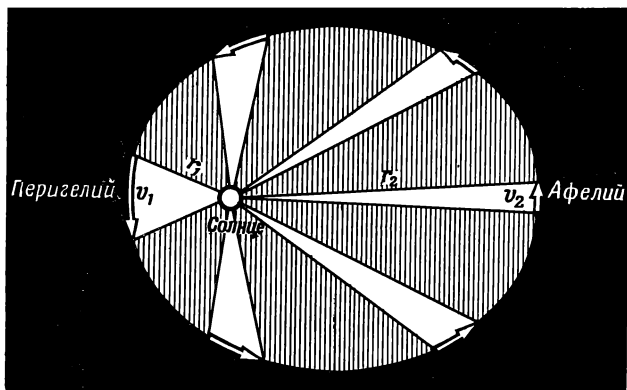
*момент количества движения материальной точки, движущейся по круговой орбите,*

$$I r = m r v. \quad (17)$$

Здесь  $r$  означает расстояние материальной точки от центра вращения,  $v$  — скорость ее движения по траектории, а  $I$  — импульс этой точки.

Мы уже видели, что количество движения тела, движущегося по прямой, остается постоянным до тех пор, пока на него не действуют никакие силы. Тот же самый закон справедлив и для момента количества движения. Так, согласно этому закону, момент количества движения системы Земля — Луна не изменяется.

Таким образом, момент количества движения в целом — величина постоянная. Однако он представляет собой произведение нескольких величин. Помимо массы  $m$ , которая остается постоянной, в его выражение входят еще расстояние  $r$  и скорость  $v$ . При движении планеты вокруг Солнца расстояние  $r$  между ними могло бы быть постоянным толь-



Р и с. 11. Второй закон Кеплера.

ко в случае круговой орбиты, но планеты движутся по эллипсам. Когда величина  $r$  достигает своего минимального значения  $r_1$ , говорят, что планета находится в *перигелии*, а когда максимального  $r_2$  — в *афелии*. Но так как в любом случае произведение  $r \cdot v$  должно оставаться неизменным, скорость движения планеты в перигелии должна быть больше, чем в афелии. Итак, в рассматриваемом случае движения планеты вокруг Солнца действует так называемый

*закон площадей*

$$r_1 v_1 = r_2 v_2. \quad (18)$$

Этот закон можно пояснить при помощи рис. 11, где изображены участки пути, которые планета проходит в равные промежутки времени. Длина отрезка, соединяющего планету с Солнцем, и представляет собой для каждого данного случая расстояние  $r$ . Плоскую фигуру, образованную этим «радиусом-вектором»  $r$  в единицу времени, можно приближенно рассматривать как треугольник с основанием  $v$  и высотой  $r$ . Площади всех этих треугольников должны быть равны.

Если бы во времена Кеплера был известен закон сохранения момента количества движения, ученый мог бы вывести свой второй закон движения планет (представляющий собой словесное выражение закона площадей. — *Ред.*) при помощи всего лишь куска веревки и маленького шари-

Р и с. 12. Опыт, иллюстрирующий закон площадей.



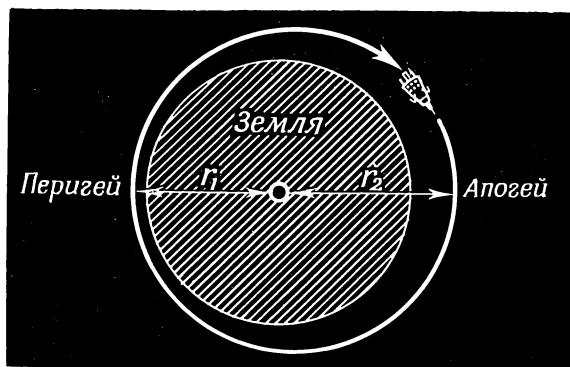
ка. Каждый читатель может проделать следующий простой и наглядный опыт. Надо взять небольшую полую трубку, протянуть сквозь нее веревочку, к которой привязан шарик, и начать медленно вращать этот шарик по кругу (рис. 12). Если затем потянуть за шнур, то радиус  $r$  круга вращения станет меньше, а скорость вращения шарика заметно увеличится.

Разумеется, для планет не существует такого резкого изменения расстояния  $r$  и связанного с этим заметного изменения скорости, как это нам продемонстрировал шарик. Орбиты планет близки к круговым, и расстояние  $r$  изменяется относительно мало.

То, что удаление искусственного спутника от Земли во время его движения по орбите может сильно изменяться, дела не меняет. Наименьшее и наибольшее расстояния от Земли в этом случае называются *перигеем* и *апогеем*. Для третьего советского искусственного спутника эти расстояния от земной поверхности составляли соответственно 220 и 1880 км (рис. 13). Однако соответствующие орбитальные скорости находились только в отношении 1,25 : 1,0<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Так как по теореме (22) (стр. 39) центр притяжения находится в центре Земли, мы должны измерять расстояние  $r$  от него. В данном случае  $r_1 = (6378 + 220) \text{ км} = 6598 \text{ км}$  и  $r_2 = (6378 + 1880) \text{ км} = 8258 \text{ км}$ . Отсюда из уравнения (18) получаем

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{8258}{6598} = 1,25 : 1.$$



Р и с. 13. Орбита третьего советского искусственного спутника (относительные размеры орбиты и Земли на рисунке сохранены).

### Вращение и противовращение

Мы называли «замкнутой системой» два связанных между собой тела, которые не подвержены никакому воздействию извне. Как мы уже видели, количество движения этой системы в целом не может измениться. То же самое справедливо и для момента количества движения.

Вернемся еще раз к нашему приключению в космосе, когда мы парили там в довольно беспомощном состоянии. Чтобы как-то убить время, займемся гимнастикой. Если мы поднимем правую руку, то тем самым сообщим ей при помощи силы наших мускулов момент количества движения определенной величины. Но поскольку *полный* момент системы не может увеличиться, наше тело сразу начнет поворачиваться в противоположном направлении. Если мы прекратим движение руки, тотчас же прекратится и движение тела. Начнем вращать рукой в обратную сторону — тело опять будет двигаться. Этим способом мы можем поворачивать наше тело во все стороны и с удобством осматривать мировое пространство.

Это важно прежде всего для искусственных спутников и космических кораблей, когда им надо изменить свое положение в пространстве. По этому принципу гироскопическая система третьей советской космической ракеты «Луна 3», управляемая по Солнцу, вращалась таким обра-

Р и с. 14. Каждый пешеход сообщает Земле очень небольшой момент количества движения.



зом, что объективы на ракете были направлены точно на Луну. Так были получены исторические снимки обратной стороны Луны.

Само собой разумеется, закон сохранения момента количества движения универсален. Вот, например, пенсионер Мюллер имеет обыкновение приносить каждый день домой свежие булочки. Степенно идет он от своего дома в булочную. Знает ли он, что при этом также имеет место сохранение момента количества движения? При каждом шаге Мюллер немного толкает земной шар назад, а себя самого вперед (рис. 14). Но надо принять во внимание, что Земля невообразимо массивнее его тела и не позволяет себя так легко сдвинуть с места. Мюллер может спокойно думать, что движется только он один. Также бесчисленные велосипеды, автомобили и поезда могут перемещаться по земле только потому, что наша планета откликнется на их импульсы, изменяя свое собственное движение на неизмеримо малую величину. Начиная от пешехода и кончая космической ракетой, везде и всегда при всех мыслимых способах передвижения господствует единый принцип <sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> В этой главе речь шла о двух «законах сохранения»: количества движения и момента количества движения. Следует упомянуть еще об одном, и притом важнейшем и универсальнейшем законе природы — законе сохранения энергии. О нем речь пойдет на стр. 69. — *Прим. ред.*

# ПРЕОДОЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

## Тяготение

Все, с чем мы до сих пор познакомились, было только проявлением инерции, свойственной каждому телу. Но наряду с инерцией существует еще одно свойство материи, открытие которого было величайшей заслугой Ньютона. Исследуя математически свойства орбит планет, форма которых была установлена Кеплером, он обнаружил, что все тела в мире притягивают друг друга по определенному закону:

**Закон всемирного тяготения.** *Два тела притягиваются друг к другу с силой, которая пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.* (19)

Коэффициент пропорциональности называется *постоянной тяготения*  $f$ , и закон тяготения записывается в виде

$$F = \frac{f m_1 m_2}{r^2}, \quad (20)$$

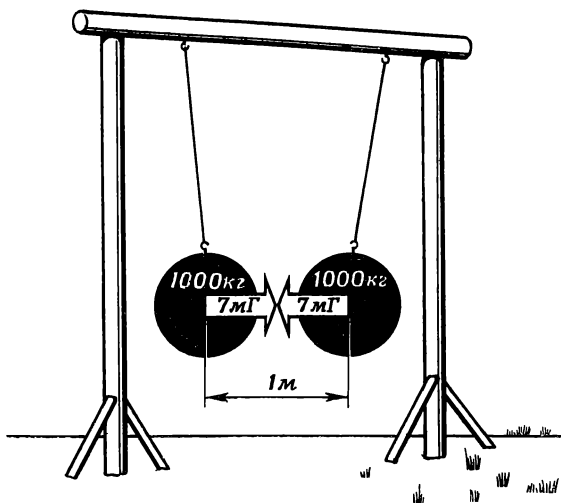
причем

$$f = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2. \quad (21)$$

Явление притяжения масс встречается абсолютно везде. Оно не только определяет движение планет. Все на свете тела притягивают друг друга. Держим ли мы друг против друга два карандаша или два яблока, между ними всегда возникает сила тяготения. Однако в подобных случаях сила эта настолько мала, что ее попросту нельзя ощутить. Если мы возьмем два больших свинцовых шара с массами по 1000 кг, центры которых удалены друг от друга на расстояние 1 м, то сила притяжения по формуле (20) получится около 7 мГ (рис. 15)<sup>1)</sup>.

---

1)  $F = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot 1000 \text{ кг} \cdot 1000 \text{ кг}}{1 \text{ м}^2} = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ н}$ , или  
около  $7 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 7 \text{ мГ}$ .



Р и с. 15. Притяжение двух свинцовых шаров с массами по 1000 кг каждый.

Угол наклона тросов сильно преувеличен.

Закон всемирного тяготения проще всего применять к однородным шарообразным телам, так как в этом случае расстояние  $r$  можно найти очень легко на основании следующей теоремы.

**Теорема.** *Два однородных шарообразных тела притягиваются друг к другу таким образом, как если бы их массы были сосредоточены в их центрах.* (22)

Это особенно важно для небесных тел, которые в большинстве случаев можно рассматривать как шарообразные. Тогда расстояние между ними измеряют от центра до центра <sup>1)</sup>.

Сила тяготения не имеет ничего общего ни с электрическими, ни с магнитными силами. Она отличается от них тем, что от нее нельзя загородиться и ее нельзя произвольно ослабить или усилить, ибо в природе нет вещества, которое могло бы служить изолятором от тяготения. Но если мы отсюда сделаем вывод, что проблема притя-

<sup>1)</sup> К этому надо добавить, что размеры небесных тел весьма невелики по сравнению с расстояниями между ними, — *Прим. ред.*



жения масс является неразрешимой загадкой природы, то это будет серьезной ошибкой.

Ньютон установил, что инерция и тяготение тела всегда пропорциональны друг другу. Но в остальном обе эти физические характеристики казались полностью независимыми друг от друга. Замечательным шагом вперед, который помог объединить оба эти явления, было создание Альбертом Эйнштейном общей теории относительности. Она исходит из предположения, что инерция тела и его тяготение не только пропорциональны друг другу, но даже *равнозначны*. Тяготение, а тем самым и инерция, определяются геометрическими свойствами пространства. Мы еще раз вернемся к этой теме на стр. 229.

Дальнейшее развитие теории относительности приводит к гипотезе, что тяготение (гравитация) распространяется со скоростью света в виде *гравитационных волн*. Аналогично световым волнам, для которых введено понятие фотонов, или световых квантов, волнам гравитации могли бы соответствовать *гравитоны*, или кванты гравитации. Это были бы мельчайшие «частички», или порции, энергии гравитации, испускаемые телами, которые притягиваются друг к другу. Сам Эйнштейн еще в 1918 г. предполагал существование такого излучения и предпринял шаги для его изучения. С тех пор наука не очень далеко продвинулась в этом направлении. Существование гравитонов также до сих пор не доказано. Однако не все ученые считают положение дел таким уж безнадежным.

### Ускорение силы тяжести и сила тяжести

Относиться к окружающему миру можно по-разному. Можно принимать мир таким, каков он есть, и на все возникающие вопросы отвечать: «так уже все устроено». Можно, однако, начать задумываться: «возможно, мир совсем не таков, каким он кажется с первого взгляда, вовсе не так прекрасен, а гораздо неприятнее и сложнее?» После некоторого наблюдения и обдумывания человек обнаруживает, что в мире существует удивительный порядок. Не имея достаточных знаний, он может приписать этот порядок какой-то высшей воле и высшему разуму, которые создали наш мир. Именно такой путь привел человечество к религии. В этом случае человек отказывается от дальнейших размышлений и предоставляет это

другим, стоящим, как ему кажется, по разуму выше его. Однако можно не признавать существования высшей воли и попытаться самому, при помощи собственного разума, исследовать, как возник окружающий мир. Этот путь приводит к науке, к физике.

Можно долго удивляться тому, что любой предмет падает на Землю. Аристотель приписывал это явление «изначальному свойству», в силу которого предмет стремится достичь своего «естественного положения». Это не объяснение, а лишь мистическая перефразировка слова «падать». Чтобы объяснить это явление, не остается ничего другого, как экспериментально исследовать процесс падения. Первым это сделал Галилей.

При этом он обнаружил, что скорость  $v$  падающего тела равномерно возрастает в течение времени падения. Итак,

$$\text{скорость падающего тела в любой момент времени } t \\ v = gt. \quad (23)$$

Здесь  $g$  — ускорение силы тяжести (рис. 16). Так же важен был второй факт, установленный Галилеем. Ускорение силы тяжести для всех тел на поверхности Земли всегда имеет постоянную величину, независимо от того, велика или мала масса тела.

*Ускорение силы тяжести на земле*

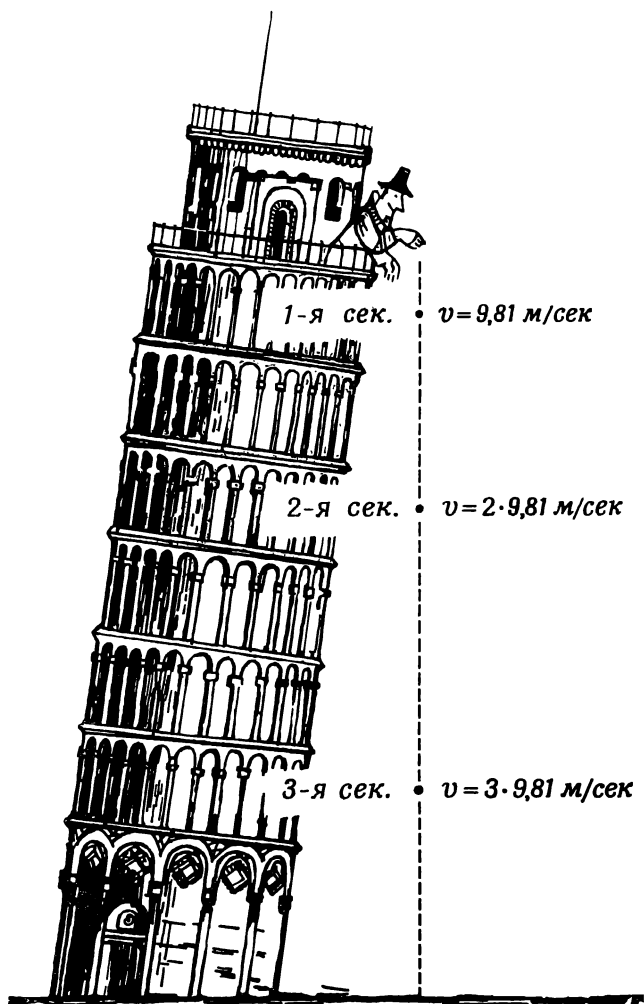
$$g = 9,81 \text{ м/сек}^2. \quad (24)$$

Но если масса  $m$  движется с ускорением, то должна существовать какая-то сила, которая является причиной этого ускорения. Это сила тяжести, которую обычно называют «весом» тела. Нужно только подставить в основном законе Ньютона (5) вместо произвольного ускорения  $a$  определенное значение  $g$  и тогда получим

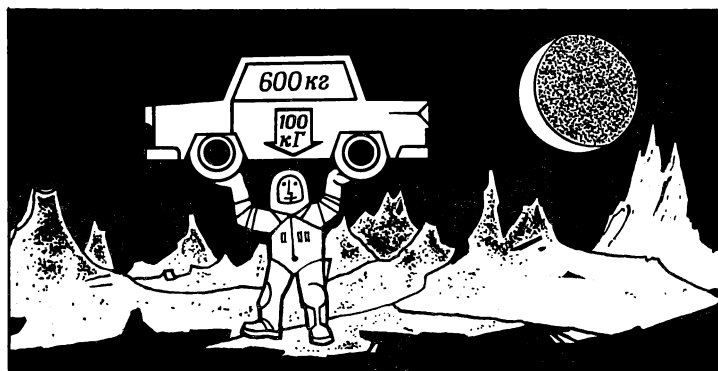
*вес тела*

$$G = mg. \quad (25)$$

Как утверждают, Ньютон открыл тяготение, глядя на падающее яблоко. Причиной существования силы тяжести можно считать только взаимное притяжение масс,



Р и с. 16. Опыт Галилея с телами, сбрасываемыми с «падающей башни» в Пизе.



Р и с. 17. Сила тяжести на Луне.

в данном случае двух масс: Земли и яблока. Если это правильно, то такая взаимосвязь соответствует не только паре Земля — яблоко, но должна иметь силу всеобщего закона. Обозначим массу какого-то небесного тела индексом  $m_1$ , его радиус  $r_1$ , массу предмета, находящегося на его поверхности  $m_2$ , тогда мы получим

$$m_2 g_1 = \frac{f m_1 m_2}{r_1^2}.$$

Множитель  $m_2$ , стоящий в правой и левой частях данного уравнения, сокращается, и мы получаем

*ускорение силы тяжести на любом небесном теле*

$$g_1 = \frac{f m_1}{r_1^2}. \quad (26)$$

Таким образом, для каждого небесного тела характерно определенное значение ускорения свободного падения. Оно зависит не только от массы этого тела, но и от его размеров. Если бы мы побывали на Луне, мы смогли бы к нашему облегчению (это слово здесь можно понимать буквально) установить, что ускорение силы тяжести составляет там только  $1/6$  часть земного ускорения <sup>1)</sup> (рис. 17).

<sup>1)</sup> Зная массу Луны  $m_1 = 7,35 \cdot 10^{22}$  кг и ее радиус  $r_1 = 1738$  км, получаем

$$g = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{1,738^2 \cdot 10^{12} \text{ м}^2} = 1,62 \text{ м/сек}^2.$$

Для того чтобы пережить такое необыкновенное состояние, нам совсем не обязательно отправляться на Луну. Значение  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  соответствует только определенному расстоянию от центра Земли. Чем больше мы от него отдаляемся, тем меньше становится величина ускорения  $g$ . Как следует из выражения (26), величина  $g$  должна при увеличении расстояния от Земли уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния. Отсюда сразу же получаем

*ускорение силы тяжести на любом расстоянии от центра Земли*

$$g_2 = \frac{g_1 r_1^2}{r_2^2}. \quad (27)$$

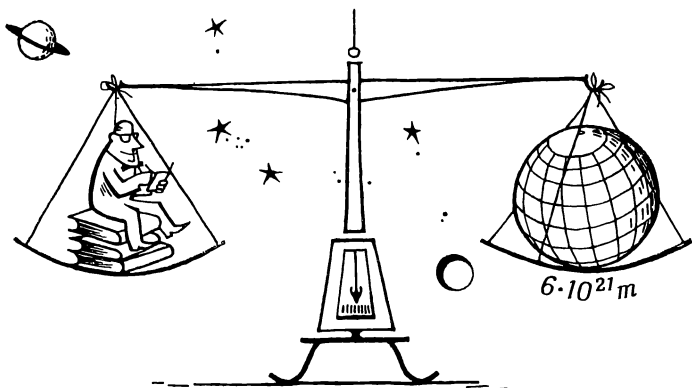
Величина  $g$  может существенно изменяться только в том случае, если расстояния  $r_1$  и  $r_2$  сильно отличаются друг от друга. Даже если подняться на гору высотой 1000 м, величина  $g$  уменьшится только на 0,03%. Это слишком мало ощутимо, чтобы альпинист смог это заметить. Правда, в различных отраслях науки, например в геофизике, существуют задачи, в которых учитывают даже такие малые различия. Однако при этом необходимо принимать во внимание и другие факторы — центробежную силу, вызываемую вращением Земли, отклонение формы Земли от шарообразной, влияние плотности горных пород и т. п. А нам выражение (27) понадобится в дальнейшем, когда мы будем определять период обращения искусственного спутника, ибо для него значения  $r_1$  и  $r_2$  значительно отличаются друг от друга.

Из той же формулы (26) мы можем извлечь еще больше. При помощи только карандаша и бумаги можно взвесить Землю!

Для этого нам достаточно уравнение (26) разрешить относительно  $m_1$ :

$$m_1 = \frac{g r_1^2}{f}.$$

Значения радиуса Земли  $r_1$  и ускорения силы тяжести  $g_1$  на поверхности Земли нам известны. Тогда из получен-



Р и с. 18. Масса Земли.

ного равенства можем легко найти, что масса Земли составляет  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}^1$ ) (рис. 18).

Итак, мы установили, что тело должно обладать массой  $6 \cdot 10^{21} \text{ т}$ , чтобы притягивать другое тело массой в  $1 \text{ кг}$  с силой в  $1 \text{ кГ}$ .

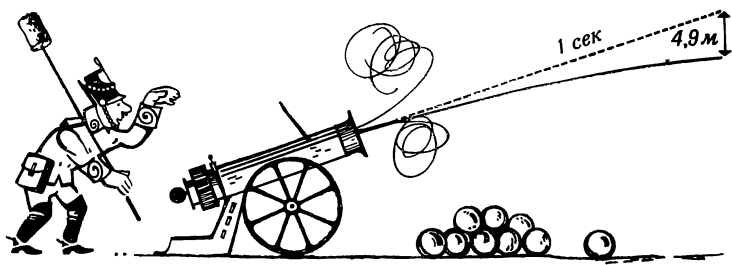
### Скорость на круговой орбите

В любом возрасте человек получает удовольствие, бросая камешки. Посмотрите на древние рисунки. Там часто изображены дети, которые кидаются камнями, стреляют из рогаток и воздушных трубок, причем в большинстве случаев они целятся туда, куда им запрещено.

Потом эти ребята вырастают и становятся разумнее. Тогда они берутся за дело более серьезно. Они отправляются на стадионы и спортивные площадки и там не менее усердно начинают толкать ядра, метать диски и кидать копья. Как и в детстве, моральное удовлетворение спортсменов, а также успех у зрителей, зависит от того, какое расстояние эти спортивные снаряды пролетели в воздухе. Невидимым противником спортсменов является сила тяже-

<sup>1)</sup> Для среднего радиуса Земли  $r_1 = 6378 \text{ км}$  и  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  последняя зависимость дает

$$m_1 = \frac{9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot 6,378 \cdot 10^{12} \text{ м}^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2} = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$



Р и с. 19. Потеря высоты летящим снарядом.

сти. Это противник в высшей степени честный, однако он никогда не дает себя победить. Полет ядра или копья длится считанные секунды, но заставить врасплох силу тяжести все же не удастся.

Ни ружье, ни пушка также не могут с ней справиться. Ни один снаряд не летит по прямой линии. Как только он взлетает в воздух, в тот же миг начинает действовать сила тяжести и изгибает его траекторию книзу. Потеря высоты у снаряда происходит по тому же самому закону, что и у камня, который свободно падает на землю. Как установил Галилей, свободно падающее тело проходит за время  $t$  расстояние

$$h = \frac{g}{2} t^2. \quad (28)$$

В 1 сек это тело пролетает расстояние 4,9 м, в  $1/10$  сек — 4,9 см<sup>1</sup>). Даже самый быстрый снаряд не может избежать действия этого закона (рис. 19). Существует только один выход: умело использовать время полета. Нужно сообщить снаряду такую скорость, чтобы в течение этого короткого промежутка времени он, прежде чем упасть на землю, пролетел возможно дальше.

Результат соревнования между скоростью снаряда после выстрела и ускорением силы тяжести изображаются кривыми, которые всегда имеют одинаковый вид. Это баллистические параболы, конечная точка которых лежит на поверхности Земли. Но в данный момент искусство

<sup>1</sup>) Высота падения за 0,1 сек

$$h = \frac{g}{2} t^2 = \frac{9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot 0,1^2 \text{ сек}^2}{2} = 0,049 \text{ м.}$$

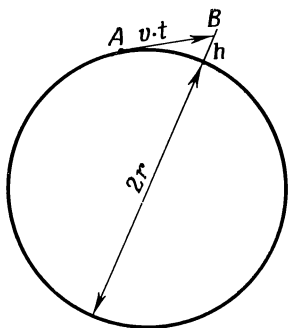
стрельбы не представляет для нас особого интереса. Мы заняты сейчас одной мыслью — как бы нам все-таки «обмануть» силу тяжести.

Ведь у нее непременно существуют свои слабые стороны. Например, то обстоятельство, что Земля круглая. Если бы не было силы тяжести, то горизонтально брошенный снаряд должен был бы по закону инерции лететь по прямой линии в космическое пространство, причем лететь точно по касательной к поверхности Земли. Чем большее расстояние пролетит снаряд по этой касательной, тем сильнее удалится он от земной поверхности. Как раз этому и препятствует сила тяжести, превращая прямолинейную касательную в параболу.

Но сила тяжести не всемогуща. Самое большее, что эта сила может сделать в первую секунду, — это заставить тело опуститься вниз на 4,9 м. Итак, если мы бросим камень строго горизонтально и сообщим ему такую скорость, что при отсутствии силы тяжести он за секунду удалится бы от поверхности Земли на 4,9 м, то в этом случае сила тяжести будет бессильна. Начиная с поверхности Земли, тело за каждую секунду набирает точно такую же высоту, на какую его заставляет опускаться действие силы тяжести и, таким образом, его расстояние от Земли все время будет оставаться постоянным. В результате получится не что иное, как *круговая орбита* вокруг Земли. У наблюдателя, восхищенного этим зрелищем, должно сложиться впечатление, что внезапно появилась сила, которая уравнивает силу тяжести. Однако сила эта совсем другого рода, чем те, которые мы рассматривали до этого.

Если хочешь приобрести сигару, то нужно иметь деньги и причем в достаточном для этого количестве. А тут неожиданно хороший друг с любезной улыбкой протягивает свой ящик с сигарами. Разумеется, отказываться не будешь и с радостью возьмешь. Причиной этого неожиданного приобретения (пусть это слово не портит вам впечатления от любезности вашего друга) является дружелюбный обычай, очень часто встречающийся среди мужчин. Если так можно выразиться, у снаряда тоже существует обычай: сразу после выстрела вызывать появление некоторой силы. Благодаря инерции он летит только по прямой линии и сопротивляется любому воздействию, которое стремится свернуть его с прямого пути.





Р и с. 20. К вычислению скорости на круговой орбите.

Это выглядит так, как если бы на снаряд действовала сила, направленная противоположно силе тяжести. Такие силы, которые своим существованием обязаны инерции тела, называются *силами инерции*. В данном случае результатом взаимодействия сил инерции и тяжести является круговая орбита; силу инерции в этом случае называют *центробежной силой*. Благодаря ей снаряд не будет ни подниматься, ни падать, а будет сохранять одинаковую высоту полета над Землей.

Чтобы рассчитать центробежную силу, будем исходить из следующего. Тело проходит участок касательной  $\overline{AB}$  (рис. 20) со скоростью  $v$  за время  $t$ . Поэтому  $\overline{AB} = vt$ . Чтобы тело не упало на Землю, эта высота должна быть равна, как уже было сказано, расстоянию, проходимому телом в свободном падении:  $h = (g/2)t^2$ . Известная из геометрии теорема дает нам

$$\overline{AB}^2 = h(2r + h).$$

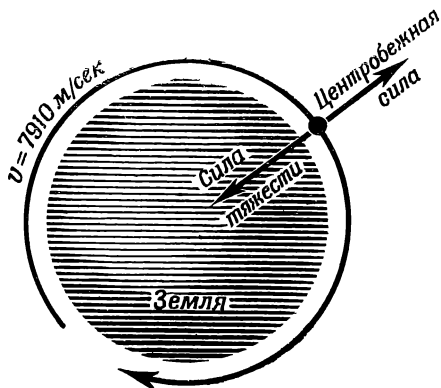
Но если мы вспомним, что тело проходит за 1 сек небольшой отрезок пути  $h = 4,9$  м, то увидим, что эта величина очень мала по сравнению с размерами Земли и ею, без сомнения, можно пренебречь. Тогда последнее уравнение можно упростить:  $\overline{AB}^2 = 2rh$ . Теперь надо только подставить значения  $\overline{AB}$  и  $h$ , которые указаны выше, и мы получаем

$$v^2 t^2 = \frac{2rgt^2}{2}$$

или, после сокращения,

$$v^2 = r \cdot g. \quad (29)$$

Р и с. 21. Скорость на круговой орбите (первая космическая скорость).



Перемножая обе части на массу  $m$ , находим зависимость:

*центробежная сила равна силе тяжести*

$$\frac{mv^2}{r} = mg. \quad (30)$$

Нам, конечно, любопытно знать, при каком значении скорости  $v$  получается этот важный результат. Решая уравнение (29) относительно  $v$ , находим

*скорость полета по круговой орбите вокруг Земли вблизи ее поверхности*

$$v_1 = \sqrt{r_1 \cdot g_1}. \quad (31)$$

При известных значениях радиуса Земли и ускорения силы тяжести можно вычислить <sup>1)</sup> величину  $v_1$ . Это так называемая

*первая космическая скорость (рис. 21)*

$$v_k = 7910 \text{ м/сек}. \quad (32)$$

Нетрудно догадаться, к какому практическому результату ведет этот расчет. Скорость, только что вычисленная

<sup>1)</sup> Для среднего радиуса Земли  $r_1 = 6378 \text{ км}$  и  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$

$$v = \sqrt{6,378 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot 9,81 \text{ м/сек}^2} = 7910 \text{ м/сек}.$$

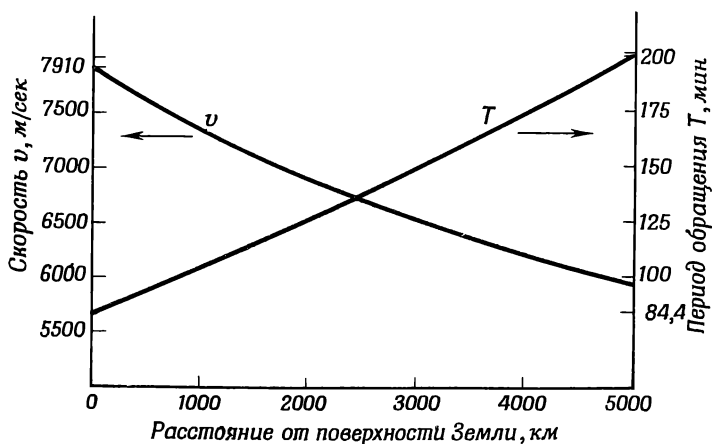
нами,— это та самая скорость, которой должен обладать искусственный спутник, запущенный с Земли по касательной к земной поверхности, т. е. в горизонтальном направлении. В этом случае он начнет обращаться вокруг Земли по круговой орбите.

Только в течение 6 лет после успешного запуска 4 октября 1957 г. первого спутника этот эксперимент удавался около 200 раз. Основная задача при запуске спутника заключается в том, что он, двигаясь по орбите, должен пролетать по возможности дальше от плотных слоев воздушной оболочки земного шара. Иначе сила трения воздуха будет постепенно тормозить движение спутника, он начнет терять высоту, войдет в плотные слои атмосферы и сгорит.

Однако на больших высотах величина скорости на старте 7910 м/сек, полученная по формуле (31), оказывается уже неверной. Здесь надо подставлять большее расстояние  $r_2$  от центра Земли. Величина  $g_1$  в согласии с (27) также изменится. Если мы произведем все эти подстановки, то формула (31) будет определять

*скорость полета по круговой орбите вокруг Земли на любом расстоянии от ее центра*

$$v_2 = r_1 \sqrt{\frac{g_1}{r_2}}. \quad (33)$$



Р и с. 22. Скорость на круговой орбите  $v$  и период обращения  $T$  для различных расстояний от Земли.

Правда, различие между значениями скоростей, которые мы получаем из формул (31) и (33), в большинстве случаев невелико. Круговая скорость второго советского космического корабля-спутника (запущен 19 августа 1960 г.), среднее расстояние которого от поверхности составляло 325 км, получается равной 7716 м/сек<sup>1</sup>). На рис. 22 показано, что каждому значению круговой скорости соответствует свое расстояние от Земли.

### Период обращения и синхронные спутники

Вместо скорости движения небесных тел (в том числе искусственных) чаще пользуются их периодами обращения, так как период можно легко измерить и проверить при помощи часов. Период обращения получают по известному соотношению:

$$\text{Время} = \frac{\text{Путь}}{\text{Скорость}} .$$

При этом надо помнить, что тело, обращающееся по окружности вокруг данного центра, пробегает за один оборот путь  $2\pi R$ . Отсюда сразу находим

*период обращения*

$$T = \frac{2\pi r}{v} . \quad (34)$$

Пользуясь этим и предыдущими соотношениями, мы можем произвести многие расчеты, связанные с движением небесных тел по круговым орбитам. Законы движения являются всеобщими, независимо от того, идет ли речь о планетах или об искусственных спутниках. Если нас интересует период обращения спутника, обращающегося по приблизительно круговой орбите<sup>2</sup>), то надо только

1) Для  $r_1 = 6378$  км и  $r_2 = 6378 + 325 = 6703$  км из уравнения (33) находим

$$v = 6,378 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \sqrt{\frac{9,81 \text{ м/сек}^2}{6,703 \cdot 10^6 \text{ м}}} = 7716 \text{ м/сек}.$$

2) Для второго советского космического корабля-спутника имеем: радиус Земли  $r_1 = 6378$  км, среднее удаление от центра Земли  $r_2 = (6378 + 325) \text{ км} = 6703 \text{ км}$ , и  $g_1 = 9,81 \text{ м/сек}^2$ . По уравнению (35) получим

$$T = \frac{2\pi \cdot 6,703}{6,378} \sqrt{\frac{6,703 \cdot 10^6 \text{ м}}{9,81 \text{ м/сек}^2}} = 5458 \text{ сек} = 90,9 \text{ мин}.$$

По результатам наблюдения  $T = 90,7 \text{ мин}$ .

подставить в равенство (33)  $v_2 = \frac{2\pi r_2}{T_2}$  и мы получим

*период обращения спутника по круговой орбите*

$$T_2 = 2\pi \frac{r_2}{r_1} \sqrt{\frac{r_2}{g_1}}, \quad (35)$$

где  $r_1$  — радиус Земли,  $g_1$  — ускорение силы тяжести на поверхности Земли,  $r_2$  — расстояние спутника от центра Земли.

Таким образом, мы сделали еще один шаг вперед и можем заняться теперь одним особенно интересным вопросом. Речь будет идти о спутнике, орбита которого лежит в плоскости экватора Земли и который имеет такую скорость, что делает один оборот вокруг Земли точно за 24 часа. Если при этом спутник движется с запада на восток, то с Земли будет казаться, что он стоит над определенной точкой экватора, как неподвижная звезда. Могут сказать, что такой *синхронный спутник* явился бы замечательной безделушкой, сделанной только для того, чтобы убедить удивленных современников в поразительном искусстве ее создателей. На самом деле дело обстоит иначе: это был бы первый спутник, который действительно быстро окупил бы себя. Как пассивный спутник связи, а именно как отражатель ультракоротких радиоволн, он мог бы служить для установления не подверженной помехам радио- и телевизионной связи на большие расстояния и через океаны. Можно использовать его также как ретрансляционный передатчик, которым управляют с Земли.

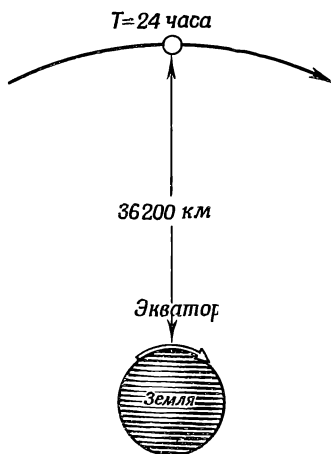
Спутник должен совершать один оборот вокруг Земли за 24 час со всей возможной точностью. Как видно из формулы (35), это зависит только от точности, с которой выдерживается расстояние  $r_2$ . Нетрудно вычислить<sup>1)</sup>, что

<sup>1)</sup> Зная, что период обращения  $T = 24$  час, или 86 400 сек, можно решить уравнение (35) относительно  $r_2$ . При  $r_1 = 6378$  км и  $g_1 = 9,81$  м/сек<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} r_2 &= \sqrt[3]{\frac{T^2 r_1^2 g_1}{4\pi^2}} = \\ &= \sqrt[3]{\frac{86400^2 \text{ сек}^2 \cdot 6,378^2 \cdot 10^{12} \text{ м}^2 \cdot 9,81 \text{ м/сек}^2}{4\pi^2}} = 4,257 \cdot 10^7 \text{ м.} \end{aligned}$$

Это расстояние спутника от центра Земли. Чтобы получить расстояние от поверхности Земли, отсюда необходимо вычесть радиус Земли.

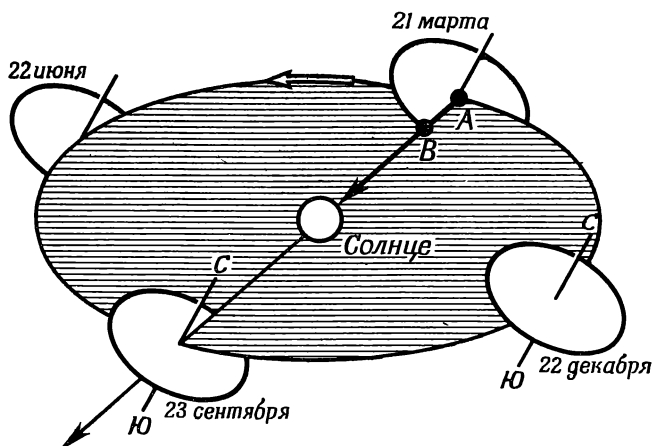
Р и с. 23. Синхронный спутник неподвижно «стоит» над экватором.



спутник должен лететь над экватором на высоте 36 200 км (рис. 23). Оказывается, что уже трех таких постоянных космических станций достаточно, чтобы весь земной шар был равномерно охвачен радиопередачами из космоса. Но технически реализовать этот проект совсем не так просто. Например, необходимо, чтобы спутник постоянно автоматически мог исправлять свое положение в пространстве. Дело в том, что даже при большой точности запуска нельзя избежать отклонений (пусть очень малых) от заданного курса; ошибки могут возникать и после выхода на орбиту. Однако осуществление проекта синхронного спутника становится, как нам кажется, все более реальным.

### Сидерический и тропический годы

Если мы захотим определить период обращения небесного тела, то одних часов для этой цели недостаточно. Кроме часов нам нужна еще постоянная точка на небе, через которую наше небесное тело проходит по меньшей мере два раза, что позволяет наблюдателю, находящемуся на Земле, измерить промежуток времени между двумя одинаковыми положениями исследуемого тела в пространстве. К счастью, такие неподвижные точки на небе найти совсем нетрудно, хотя есть такие звезды, которые по определенным причинам (стр. 62) имеют заметное «собственное движение» по небу. Однако, несмотря на это, звездное



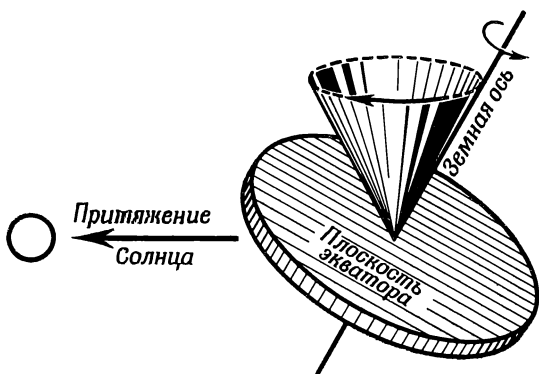
Р и с. 24. К определению тропического года.

небо является хорошей системой координат для измерения времени.

Для нашей жизни важнейшей единицей времени является период обращения Земли вокруг Солнца. Мы можем определить его продолжительность, наблюдая видимое перемещение Солнца по небу <sup>1)</sup>. Выберем определенную «неподвижную» звезду в качестве фиксированной точки и измерим промежуток времени между двумя прохождением Солнца через эту точку. Так мы получим *сидерический год*, который длится 365, 25636 суток.

Однако движение Земли вокруг Солнца на самом деле сложнее. Во-первых, земная ось наклонена к плоскости орбиты Земли на угол  $23^{\circ}27'$ . Во-вторых, положение земной оси в пространстве изменяется, хотя и очень медленно. Сначала рассмотрим движение Земли, не учитывая это изменение. Плоскость земного экватора составляет тот же угол  $23^{\circ}27'$  с плоскостью земной орбиты, называемой *плоскостью эклиптики*. Эти плоскости пересекаются по прямой  $AB$  (рис. 24). При постоянном направлении земной оси направление этой прямой не меняется.

<sup>1)</sup> Речь идет о видимом перемещении Солнца среди звезд, а не о суточном движении Солнца по небу с востока на запад; заметным это перемещение становится потому, что вид ночного звездного неба в течение года постепенно меняется. — *Прим. ред.*



Р и с. 25. Прецессионное движение земной оси.

Во время своего годовичного обращения вокруг Солнца Земля дважды проходит через точки, где линия пересечения  $AB$  направлена в центр Солнца. В эти моменты день и ночь на Земле имеют одинаковую продолжительность. Это день весеннего равноденствия 21 марта (начало весны) и день осеннего равноденствия 23 сентября (начало осени). Если мы продолжим линию  $A-B$  — Солнце в день 21 марта, то она будет направлена на определенную точку неба, которую называют *точкой весеннего равноденствия*. Промежуток времени между двумя прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия называется *тропическим годом*. Если бы ось Земли занимала неизменное положение в пространстве, то сидерический и тропический годы были бы равны друг другу. При этом абсолютно безразлично, относительно какой точки звездного неба рассматривать движение Земли.

Но Земля не является идеальным шаром. Она немного сплюснута с полюсов, или, другими словами, имеет небольшое утолщение вокруг экватора. Солнце стремится повернуть Землю так, чтобы плоскость земного экватора совпала с плоскостью земной орбиты. Вращающаяся Земля реагирует на это, но совсем не так, как этого «хотело» бы Солнце. А именно, Земля ведет себя как любой волчок, когда его пытается опрокинуть какая-нибудь внешняя сила. В этом случае ось волчка отклоняется перпендикулярно к направлению действующей силы и медленно описывает коническую поверхность (рис. 25). Это известное



явление *прецессии*, которое можно наблюдать на любом игрушечном волчке.

Прецессия земной оси протекает крайне медленно. Полную окружность земная ось описывает в течение 25 730 лет. Плоскость экватора, перпендикулярная земной оси, также совершает медленные колебания в пространстве. В результате направление линии *AB* пересечения плоскости экватора с плоскостью земной орбиты непрерывно изменяется, и она оказывается направленной на Солнце не строго в один и тот же момент 21 марта, а каждый год немного раньше, чем в предыдущий. Другими словами, точка весеннего равноденствия в течение столетий медленно передвигается. В древности она была расположена в созвездии Овна, и поэтому ее и сегодня обозначают знаком Овна ( $\gamma$ ), хотя в наши дни она находится уже в созвездии Рыб.

Итак, для сидерического года визирная прямая *A* — Солнце — фиксированная звезда остается постоянной, а прямая *A* — *B* — Солнце изменяет свое направление. Вследствие этого тропический год, составляющий 365,24220 суток, приблизительно на 20 мин 23 сек короче сидерического года <sup>1)</sup>.

В заключение добавим, что в основе нашего деления времени на секунды и обычного календарного счета лежит тропический год.

### Период обращения и масса

Движение Земли вокруг Солнца не является каким-то исключительным событием в природе. Все тела, которые обращаются вокруг какого-нибудь центрального светила, подчинены одним и тем же законам. Различие может заключаться только в численных значениях. Так, мы уже рассматривали период обращения искусственных спутников и нашли, каким образом он зависит от их расстояния до Земли. Однако существует еще один всеобщий закон, благодаря которому можно непосредственно сравнивать периоды обращения вокруг одного центра двух небесных тел.

---

<sup>1)</sup> Эту разницу можно определить достаточно точно, если разделить продолжительность тропического года на период прецессии  $\frac{365,2422}{25\,730} = 0,01420$  суток  $\approx 20$  мин.

При выводе будем исходить не из формулы (35), а снова обратимся к равенству (29). Подставим в него выражение для  $v$  из (34) и  $g$  — из (26). В результате получим равенство

$$\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{r m f}{r^2},$$

или

$$T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{m f}. \quad (36)$$

Для любых двух тел, обращающихся вокруг одного центрального тела с массой  $m$ , это равенство остается справедливым, с той только разницей, что  $T$  и  $r$  принимают различные значения. Остальные величины  $4\pi^2$ ,  $m$  и  $f$  остаются неизменными. Если мы возьмем теперь отношение периодов обращения двух тел, то постоянные величины сократятся, и это даст нам

*третий закон Кеплера (рис. 26)*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}. \quad (37)$$

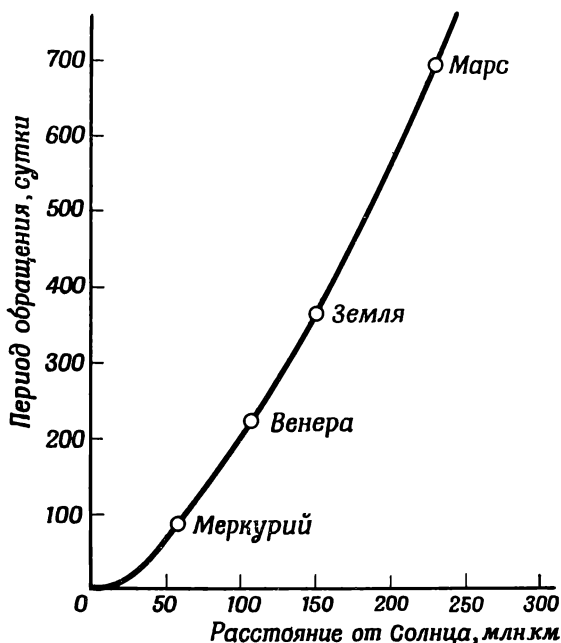
Чтобы разъяснить содержание этого закона, лучше всего прибегнуть к примеру, в котором он как раз не удовлетворяется. А именно представим себе очень упрощенную модель солнечной системы. Пусть Солнце находится в центре огромного колеса, а планеты укреплены при помощи спиц на различных расстояниях. Если колесо вращается, то все планеты, несмотря на их различное удаление от центра, имеют один и тот же период обращения. Итак, такая модель неверна и ее надо исправить.

Если мы возьмем для сравнения две планеты, расстояния которых от Солнца относятся как  $1 : 2$ , то периоды обращения этих планет должны иметь разную продолжительность. По закону Кеплера кубы этих расстояний должны находиться в отношении  $1^3 : 2^3 = 1 : 8$ , а периоды обращения будут относиться друг к другу, как  $\sqrt{1} : \sqrt{8} = 1 : 2,82$ . Более удаленная планета совершает один оборот за время почти в три раза большее! Чтобы построить правильно действующую модель планетной системы, нужно делать ее не в виде колеса, а монтировать из концентрических окружностей, которые по мере увеличения их диаметров должны вращаться все медленнее и медленнее.

Это была бы поистине трудная задача для любителя мастерить.

Но можно избежать лишних хлопот. Постоянная модель существует уже в готовом виде, и притом довольно давно. Это планета Сатурн со своим замечательным кольцом — подлинное украшение всей семьи планет. Если бы кольцо представляло собой сплошное тело, то налицо было бы явное противоречие третьему закону Кеплера, который мы только что провозгласили. Однако в настоящее время известно, что вся система колец Сатурна состоит из крохотных крупинок и пылинок, которые окружают Сатурн как облако миниатюрных спутников, сверкающих в отраженном солнечном свете.

При изучении «механики небес» мы до сих пор не обращали внимания на еще одну важную величину: массу небесного тела. Законы Кеплера о ней умалчивают. Они справедливы как для микроскопической массы, так и для



Р и с. 26. Третий закон Кеплера.

огромных планет. Для движения искусственного спутника также абсолютно безразлично, насколько велика его масса. Однако равенство (36) содержит массу тела и дает нам возможность познакомиться с тем, в чем выражается влияние массы. Решая уравнение (36) относительно  $m$ , находим, что

*Масса центрального притягивающего тела*

$$m = \frac{4\pi^2 r^3}{T^2} . \quad (38)$$

Эту массу можно вычислить, если известно расстояние  $r$  и период обращения  $T$  любого тела вокруг центрального. Таким способом находим, например, массу Солнца  $m = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг<sup>1)</sup>, подставляя в равенство (38) соответствующие параметры земной орбиты.

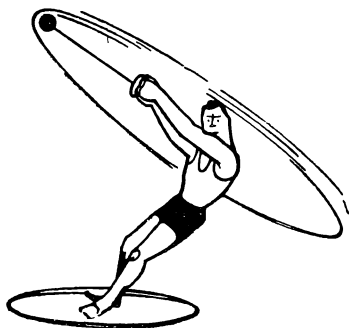
Правда, во всех этих рассуждениях мы сделали одно допущение, которое значительно облегчило нам работу. В наших расчетах молча предполагалось, что центральное тело (Солнце в последнем примере) прочно «привязано» к определенной точке пространства. Но это допустимо только в тех случаях, когда его масса так велика по сравнению с массой обращающегося тела, что движение последнего незначительно влияет на центральное тело. Для пары Солнце — Земля об этом обратном влиянии можно и не думать. Но имеются случаи, для которых такое упрощение привело бы к ошибочным результатам.

### Масса Луны и двойные звезды

Метание молота хотя и относится к легкой атлетике, но доступно только сильным мужчинам. Чугунный шар, который надо вращать на стальной проволоке, чтобы с максимально возможной скоростью послать в воздух, весит более 7 кг. Центробежная сила огромна, она готова вырвать руки человеку. Стоя прямо, он не смог бы удерживать молот. Когда метатель поворачивается, его тело и молот находятся по разные стороны от общего центра

<sup>1)</sup> Измерения и формулы тригонометрии (стр. 95) дают нам расстояние от Земли до Солнца  $r_1 = 149,6 \cdot 10^6$  км; 1 сутки = 86400 сек. Отсюда масса Солнца

$$m_1 = \frac{4\pi^2 \cdot 1,496 \cdot 10^{33} \text{ м}^3}{365,25^2 \cdot 86400^2 \text{ сек}^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}.$$



Р и с. 27. Метатель молота и молот обращаются вокруг общего центра тяжести.

тяжести. Центр тяжести в этом случае расположен выше точки опоры, т. е. той точки, где мускулистые ноги атлета упираются в землю (рис. 27).

Аналогично обстоит дело и с парой Земля — Луна, с той только разницей, что Земля никогда не отбрасывает Луну прочь. Тяготение заставляет их всегда быть вместе. Кроме того, у Земли нет также надежной точки опоры. Хотя и принято говорить, что Луна обращается вокруг Земли, но это верно только наполовину, так как на самом деле оба тела, Земля и Луна, обращаются друг вокруг друга. В покое остается только общий центр масс обоих тел.

Итак, поставлена задача рассчитать движение двух небесных тел, на которые не действуют никакие силы, кроме взаимного притяжения. Такую задачу в небесной механике называют *задачей двух тел*. Она решается без труда и поможет углубить наши представления об этих вещах.

Положение центра можно найти по правилу рычага. При этом мы будем Землю и Луну рассматривать как «материальные точки», т. е. считать, что их массы сосредоточены в центрах. Такое допущение вполне возможно согласно теореме (22). Из рис. 28 видно, что

$$r_1 : r_2 = m_2 : m_1$$

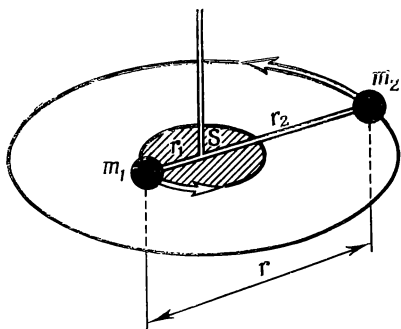
или также

$$r : r_2 = (m_1 + m_2) : m_1.$$

Расстояние массы  $m_2$  от общего центра обращения получается отсюда равным

$$r_2 = \frac{r m_1}{m_1 + m_2},$$

Р и с. 28. Обращение двух масс вокруг их общего центра.



Возникающая центробежная сила определяется именно этим расстоянием, а не полным расстоянием  $r$  от массы  $m_1$  до массы  $m_2$ . Итак, правило «центробежная сила равна силе тяжести» [в равенстве (30)] надо исправить, ибо там мы принимали, что масса  $m_1$  неподвижна. В результате более точного расчета <sup>1)</sup> получается

*общая масса двух тел, обращающихся относительно друга друга*

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 r^3}{fT^2}. \quad (39)$$

Сравнивая полученное выражение с формулой (38), можно заметить, что выражение (39) более совершенно.

Итак, (38) было промежуточным решением. Его можно применять только в том случае, когда масса одного тела настолько мала по сравнению с массой другого, что, пренебрегая ею, мы не делаем грубой ошибки. Как мы видим, формула (39) всегда дает нам только сумму обеих масс.

<sup>1)</sup> Из равенства (30) при неподвижной массе  $m_1$  для центробежной силы получаем выражение  $m_2 v^2 / r$ . Подставив  $v$  из (34), можно переписать это выражение в виде  $4\pi^2 m_2 r / T^2$ . Если взять вместо  $r$  истинное значение  $r_2$ , то получим

$$\frac{4\pi^2 m_2 m_1 r}{T^2 (m_1 + m_2)} = \frac{f m_1 m_2}{r^2}.$$

Выражение для силы тяготения, стоящее в правой части, взято из формулы (20). В нем полное расстояние  $r$  должно оставаться неизменным. После сокращения получаем равенство (39).

Это позволяет нам оценить массу Луны. Она получается равной около  $6 \cdot 10^{22}$  кг<sup>1)</sup>.

Однако этот результат неточен и является только первым приближением, так как Солнце также довольно сильно влияет на движение Луны. В этом случае речь идет уже не о задаче двух тел, а о задаче трех тел или, если учесть влияние остальных планет, даже о задаче многих тел. Математическое решение в этих случаях чрезвычайно трудно. Точную величину массы Луны можно получить только путем учета воздействия Солнца и исправления полученного значения массы сравнением теоретически рассчитанной лунной орбиты с действительной. Очень трудоемкий расчет дает для массы Луны величину  $7,35 \cdot 10^{22}$  кг. Масса Луны составляет всего около  $1/81$  массы Земли.

Законы Кеплера справедливы не только для солнечной системы. Эти законы одинаково пригодны и для микромира, где они блестяще подтвердились при расчете модели атома Бора, и для мира звезд. Во Вселенной часто можно наблюдать пары звезд, которые расположены настолько близко одна от другой, что они обращаются относительно друг друга по замкнутым орбитам.

Около четверти всех видимых звезд — это двойные, а иногда даже многократные системы. Их намного больше, чем это может показаться с первого взгляда. Подобно системе Земля — Луна эти звезды обращаются по эллиптическим орбитам вокруг общего для них центра масс. Определение их взаимного движения, зачастую возможное лишь по косвенным признакам, — довольно сложная задача. В конце концов удастся, однако, измерить периоды обращения и большие полуоси эллиптических орбит у большинства таких звездных пар.

Чтобы упростить расчет, в формуле (39) большую полуось  $r$  эллипса выражают в «астрономических единицах» (1 а. е. равна расстоянию от Земли до Солнца)<sup>2)</sup>, массы —

---

1) Зная массу Земли  $m_1 = 5,977 \cdot 10^{24}$  кг, среднее расстояние до Луны  $r = 384\,400$  км и ее сидерический период обращения вокруг Земли, равный 27,32 суток, получаем

$$m_2 = \frac{4\pi^2 \cdot 3,844^3 \cdot 10^{24} \text{ м}^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot 27,32^2 \cdot 86\,400^2 \text{ сек}^2} \\ - 5,977 \cdot 10^{24} \text{ кг} = 6 \cdot 10^{22} \text{ кг}.$$

2) В случае эллиптической орбиты расстояние  $r$  в формуле (39) равно большой полуоси.

в массах Солнца, а периоды обращения — в годах. Если затем опустить постоянные величины  $f$  и  $4\pi^2$ , то получится

суммарная масса двойной звезды (масса Солнца = 1) <sup>1)</sup>

$$M_1 + M_2 = \frac{r^3}{T^2} . \quad (40)$$

Самая известная из всех двойных звезд — Сириус — самая яркая звезда неба. Его можно легко найти на зимнем ночном небе, если провести линию через три звезды пояса Ориона и продолжить ее налево. Уже 100 лет назад установили, что Сириус не совсем «неподвижная» звезда, ибо за определенный промежуток времени он описывает на небосводе небольшой эллипс. Установили также, что большая полуось этого эллипса составляет 20,3 а. е. Причиной этого движения должен быть невидимый спутник. Его называют Сириус В (в отличие от главной звезды Сириуса А. — *Ред.*). Из-за очень слабого блеска он неразличим невооруженным глазом. По периоду обращения, равному 49,9 года, можно судить о суммарной массе системы:

$$M_1 + M_2 = \frac{20,3^3}{49,9^2} = 3,35 \text{ массы Солнца.}$$

С другими характеристиками этой двойной звезды мы познакомимся на стр. 138.

### Приливы и отливы

Явления природы можно разделить на приятные и неприятные для нас. Со многими мы примирились, так как благоразумно признаем, что не смогли бы жить

---

<sup>1)</sup> Запишем формулу (38) в специальных обозначениях, применяемых, когда речь идет о Солнце:

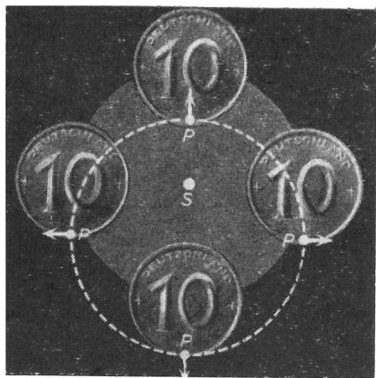
$$M = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{f\Theta^2} .$$

Деля это равенство на (39), получим

$$\frac{m_1}{M} + \frac{m_2}{M} = \frac{(r/R)^3}{(T/\Theta)^2} .$$

Затем обозначим частные:  $m_1/M$  через  $M_1$  и  $m_2/M$  через  $M_2$  (доли массы Солнца),  $r/R$  выразим в а.е., а  $T/\Theta$  — в годах. Как можно заметить, формула (40) записана в этих новых обозначениях.





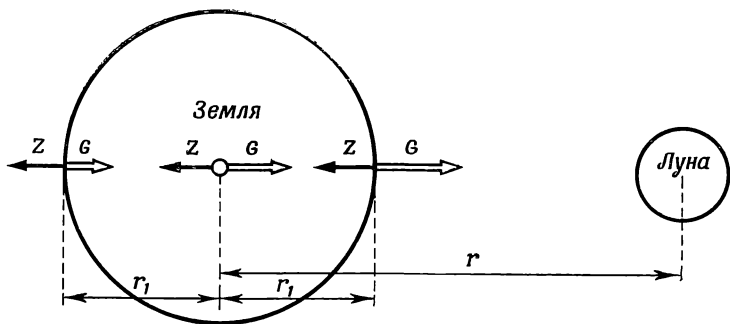
Р и с. 29. Движение монеты вокруг точки  $S$ , при котором все точки монеты описывают круги равного радиуса.

Стрелками показано направление центробежной силы в точке  $P$  монеты.

без них. Другие же вызывают у нас только досаду и приносят заботы. Таким злом, от которого лучше всего было бы избавиться вообще, являются *приливы* и *отливы*. Однако, к сожалению, здесь нам не остается ничего другого, как старательно строить дамбы.

Можно легко убедиться, что приливы и отливы вызваны силой притяжения Луны. Но тут играет роль еще и то обстоятельство, что Земля и Луна обращаются вокруг общего центра масс. При этом Луна всегда повернута к нам одной и той же стороной. Как выглядит другая сторона Луны, человечество узнало только после замечательного полета третьей советской космической ракеты. Сама Земля не так «застенчива». Ежедневно совершая один оборот вокруг своей оси, она, не таясь, показывает Луне все свои стороны. А это в свою очередь приводит к тому, что жители всех мест на Земле регулярно получают возможность видеть Луну. Но предположим на минуту, что Земля не вращалась бы вокруг своей оси. Однако и в этом случае жители Луны могли бы рассматривать Землю со всех сторон. Хотя Земля, точно так же, как и Луна, кружится вокруг общего центра масс системы, она все время сохраняет в пространстве одну и ту же ориентировку.

Возьмем монету в 10 пфеннигов и будем перемещать ее по столу вдоль окружности небольшого радиуса с таким расчетом, чтобы цифра 10 всегда оставалась вертикальной (рис. 29). Если вообразить, что центр такого кругового движения — это центр масс системы Земля — Луна, то мы получим простую модель действительных условий.



Р и с. 30. Разность центробежной силы  $Z$  и силы притяжения Луны  $G$  представляет собой силу, вызывающую приливы и отливы.

Короче говоря, Земля *обращается* вокруг центра масс *не так*, словно она закреплена на спице колеса.

Теперь поговорим о самом главном. Любая точка нашей монеты описывает при этом в течение полного оборота круг одного и того же диаметра. Для Земли радиус этой орбиты равен расстоянию между центром Земли и центром масс системы. Этот последний не находится в покое по отношению к Земле, а также обращается вокруг Земли по такой же окружности. Как следствие этого возникает центробежная сила, одинаковая во всех точках Земли и направленная (что очень важно) всегда в сторону, противоположную Луне.

Таким образом, здесь действуют две силы: во-первых, притяжение Луны и, во-вторых, центробежная сила. Они противоположно направлены. Их результирующая (которая в простейшем случае представляет собой обычную разность) и является силой, вызывающей приливы и отливы.

На рис. 30 мы видим это явление в самом простом с точки зрения геометрии случае. Стрелки, изображающие центробежную силу  $Z$ , должны быть везде одинаковы по величине. А сила притяжения Луны  $G$  на противоположной стороне Земли меньше, чем на обращенной к ней, так как в последнем случае расстояние до Луны меньше на целый диаметр Земли. Кроме того, как мы сейчас увидим,  $G$  слева оказывается немного меньше  $Z$ , а справа — немного больше. Поэтому приливные силы на обеих сторонах земной поверхности примерно равны по величине.

В центре же Земли центробежная сила уравновешена силой притяжения. Поэтому мы можем выразить центробежную силу через силу тяготения  $\frac{fm_1m_2}{r^2}$ . А так как мы уже установили, что во всех точках Земли действует одна и та же по величине центробежная сила, то это выражение справедливо для любой точки земной поверхности, если только мы под  $m_1$  будем понимать не всю массу Земли, а массу отдельных материальных точек. Сила притяжения Луны  $G$  выразится этой же формулой, но с тем различием, что для точки на поверхности Земли вместо расстояния  $r$  надо подставить  $r + r_1$  для противоположной Луне и  $r - r_1$  для обращенной к ней стороне Земли.  $r_1$  обозначает здесь радиус Земли. Разделив на массу  $m_1$ , получим ускорения, вызываемые приливными силами: на обращенной к Луне стороне Земли

$$g - a_2 = fm_2 \left[ \frac{1}{(r - r_1)^2} - \frac{1}{r^2} \right];$$

на противоположной Луне стороне Земли:

$$a_2 - g = fm_2 \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r + r_1)^2} \right];$$

При известных значениях массы Луны  $m_2 = 7,35 \cdot 10^{22}$  кг, расстояния от Земли до нее  $r = 384\,400$  км и радиуса Земли  $r_1 = 6378$  км получаем для обеих сторон около  $11 \cdot 10^{-7}$  м/сек<sup>2</sup>. Разница между ускорениями на обеих сторонах совершенно незначительна.

Этот результат поразителен. Кто бы мог подумать, что сила, приводящая в движение океаны, так мала по сравнению с силой тяжести! Огромные силы, действующие при движении масс воды во время прилива возникают благодаря тому, что по обеим сторонам гребня прилива появляются касательные составляющие, которые и заставляют воду океанов устремляться по направлению рассчитанной нами максимальной силы прилива.

Таким образом, водяной горб образуется с двух сторон Земли: обращенной к Луне и противоположной ей. Суточное вращение Земли заставляет эту двухгорбую приливную волну ежедневно один раз обойти вокруг Земли. Но так как Луна со своей стороны обращается вокруг Земли, Земля должна совершить чуть больше одного полного

оборота, чтобы Луна появилась в той же самой точке неба. Поэтому полный период прилива составляет не 12 час, а 12 час 25 мин.

Впрочем некоторые ученые допускают, что Луна в прежние времена тоже вращалась вокруг своей оси значительно быстрее. Если она когда-то была раскаленным жидким или пластичным телом, на нее также действовали большие приливные силы, вызванные притяжением Земли. Это должно было создавать значительное трение между могучими приливными волнами и недрами Луны. Оно тормозило вращение Луны до тех пор, пока время ее оборота вокруг оси окончательно не совпало с продолжительностью обращения вокруг Земли. Тогда движение приливных горбов относительно Луны стало невозможным. С тех пор мы видим Луну только с «фасада».

# КАК УЛЕТЕТЬ С ЗЕМЛИ

## Критическая скорость

Как-то раз при демонстрации учебного кинофильма зрителям пришлось увидеть поразительное зрелище. Камень, лежавший на земле, вдруг самостоятельно взлетел в воздух и устремился вверх, потом наверху повернул и снова полетел вниз прямо в поднятую руку какого-то мужчины. Этот мужчина, как-то странно изогнув тело, схватил в воздухе этот камень и положил его обратно на землю (рис. 31). В этот момент свет внезапно зажегся. «Извините,— смущенно пробормотал киномеханик,— я вставил ленту с конца, подождите минутку, пожалуйста».

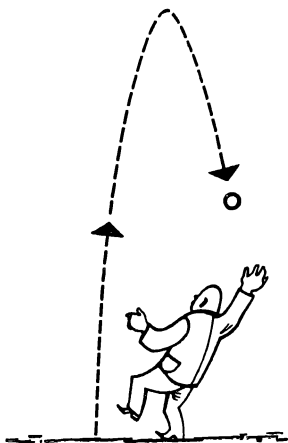
Как жаль, что он не придумал более удачного оправдания. Он не чувствовал бы себя так неловко, если бы заявил с умным видом: «Уважаемые зрители! Я нарочно показывал вам фильм в обратном порядке. Теперь я покажу его правильно, и тогда вы увидите, что при броске камня вертикально вверх процесс подъема и процесс падения полностью симметричны. Начальная и конечная скорость камня равны друг другу. Налицо не что иное, как превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно». Тогда никто бы и не подумал сердито оглядываться назад, а ошибка киномеханика стала бы доходчивым приемом преподавания.

Дело в том, что все сказанное абсолютно соответствует истине. Камень, летящий вверх, накапливает по дороге потенциальную энергию, одновременно теряя скорость. В точке подъема потенциальная энергия равна работе, затраченной, чтобы поднять камень на высоту  $h$ . Эта энергия равна произведению веса на высоту.

*Потенциальная энергия при постоянном ускорении силы тяжести*

$$W_{\text{пот}} = mgh. \quad (41)$$

Р и с. 31. Бросок «наоборот»



Расстояние, проходимое падающим телом, рассчитывается по уже известной нам формуле (28)

$$h = \frac{g}{2} t^2.$$

Ускорение можно в этом случае представить как частное от деления прироста скорости  $v$  на время падения  $t$ :

$$g = \frac{v}{t}.$$

Если подставить оба эти выражения в (41), то получим формулу, которой выражается

*кинетическая энергия*

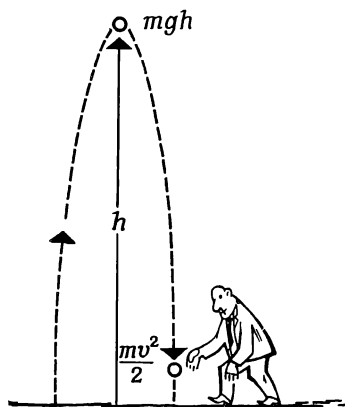
$$W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}. \quad (42)$$

Поскольку в нашем случае речь идет о превращении кинетической энергии в потенциальную, то можем записать

$$\frac{mv^2}{2} = mgh.$$

Из этого равенства сразу находим начальную скорость при броске вертикально вверх или равную ей конечную скорость при свободном падении (рис. 32).

Но сколько ни старайся, брошенное тело неизбежно падает обратно на Землю. Это только кажется, что спутники и планеты избавлены от действия силы притяжения.



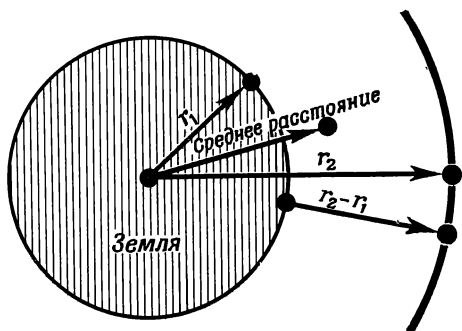
Р и с. 32. Потенциальная  
и кинетическая энергии.

Двигаясь без усталости по своим траекториям, они все равно остаются пленниками тяготения. Они не могут сойти со своих орбит. Сила притяжения как невидимая цепь не позволяет им слишком удаляться от Земли; любая попытка к бегству безжалостно подавляется.

Так было до 2 января 1959 г., когда первая советская космическая ракета, пролетев недалеко от Луны, навсегда покинула Землю. До этого момента ни одному снаряду не удавалось преодолеть силу притяжения, хотя людям было точно известно, что необходимо для этой цели. А звучит это очень просто: чтобы преодолеть силу тяжести, тело должно иметь на старте скорость, равную по меньшей мере той скорости, с которой оно падает с бесконечной высоты на Землю.

Итак, снова выполняется условие:  $W_{\text{кин}} = W_{\text{пот}}$ . Но с потенциальной энергией связана одна особенность. Выражение  $W_{\text{пот}} = mgh$  в данном случае непригодно, так как ускорение силы тяжести, а следовательно, и вес с увеличением расстояния до Земли становятся все меньше и меньше. Чтобы все же получить правильный результат, представим себе тело с массой  $m_2$ , которое должно улететь с поверхности Земли в точку, отстоящую от центра Земли на расстояние  $r_2$  (рис. 33).

Сила притяжения — величина непостоянная. На некотором среднем расстоянии  $r$  она равна  $\frac{fm_1m_2}{r^2}$  [формула (20)]. Разумеется, величину  $r$  нельзя брать как среднее арифметическое между  $r_1$  и  $r_2$ , так как эта сила изменяется



Р и с. 33. Расчет работы, необходимой для достижения второй космической скорости.

с увеличением расстояния не линейно, а пропорционально квадрату расстояния. Тут лучше всего подходит подстановка  $r^2 = r_1 \cdot r_2$ , предложенная великим французским математиком Ферма (1601—1665) <sup>1)</sup>.

Путь, пройденный между двумя точками, находящимися соответственно на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$ , равен  $r_2 - r_1$ , а затраченная работа равна произведению силы на путь:

$$\frac{f m_1 m_2}{r_1 r_2} (r_2 - r_1),$$

или

$$f m_1 m_2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

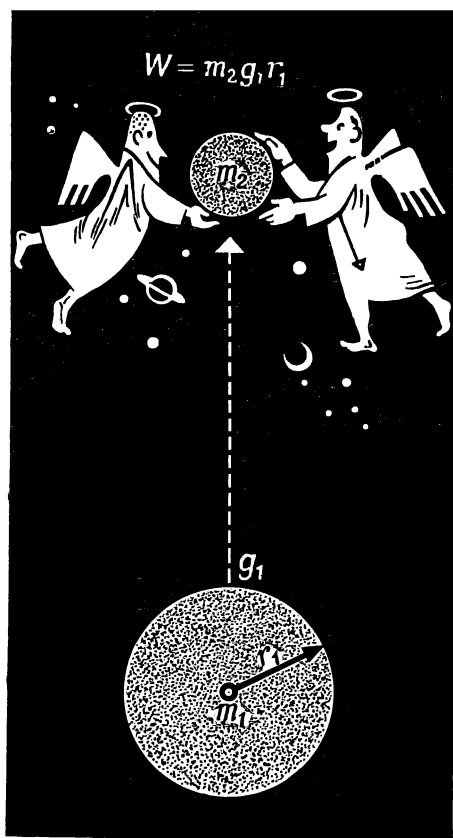
Если мы теперь потребуем, чтобы тело поднималось до бесконечно удаленной точки (рис. 34), где  $1/r_2 = 0$ , то по формуле (26) получим:

*потенциальная энергия тела с массой  $m_2$  по отношению к телу с массой  $m_1$ , находящемуся от него на бесконечном расстоянии,*

$$W_{\text{пот}} = \frac{f m_1 m_2}{r_1} = m_2 r_1 g_1. \quad (43)$$

<sup>1)</sup> Собственно говоря, эту задачу можно решить только при помощи интегрального исчисления. Но так как в ту эпоху, когда жил Ферма, оно еще не было открыто, он только благодаря своей математической интуиции безошибочно решил, что здесь нужно взять среднее геометрическое  $r = \sqrt{r_1 \cdot r_2}$ .





Р и с. 34. Потенциальная энергия тела, поднимающегося в бесконечность.

Так как при падении тела весь этот запас энергии превращается без остатка в кинетическую энергию  $m_2 v^2/2$ , можно составить уравнение

$$\frac{m_2 v^2}{2} = \frac{f m_1 m_2}{r_1} = m_2 r_1 g_1.$$

Отсюда мы без труда выведем выражение для минимальной скорости, которую должно иметь тело, чтобы полностью преодолеть земное притяжение. Это так называемая

*критическая, или вторая космическая, скорость*<sup>1)</sup>

$$v_{2k} = \sqrt{\frac{2fm_1}{r_1}} = \sqrt{2r_1 g_1}. \quad (44)$$

Если сопоставить (44) с выражением (31), то можно легко заметить, что

*вторая космическая скорость  $v_{2k}$  в  $\sqrt{2}$  раза больше, чем первая космическая скорость на поверхности Земли*

Расчет<sup>2)</sup> показывает, что (45)

*вторая космическая скорость*

$$v_{2k} = 11\,186 \text{ м/сек} \approx 11,2 \text{ км/сек}. \quad (46)$$

Весь наш вывод основан, разумеется, на некоторых допущениях. Не учитывалось, например, сопротивление воздуха, которое действует даже на больших высотах. Практически это означает, что вторая космическая скорость реальной ракеты должна быть немного больше.

С физической точки зрения абсолютно безразлично, как тело приобретет эту первоначальную скорость  $v_{2k}$ , чего нельзя сказать о технической стороне дела. Герои романа Жюль Верна «Из пушки на Луну» построили огромную пушку и мало задумывались о том, как пассажиры этого снаряженного, как космический корабль, ядра перенесут чудовищное ускорение в момент выстрела.

---

1) Из вывода формулы (44) ясно, что она годится не только для Земли, но и для любого небесного тела. — *Прим. ред.*

2) При радиусе Земли, равном 6378 км, получим

$$v_{2k} = \sqrt{2 \cdot 6,378 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot 9,81 \text{ м/сек}^2} = 11\,186 \text{ м/сек}.$$

Конструкторы современных космических кораблей поступают по-другому. В наше время применяют двигатели, которые обеспечивают относительно постепенный разгон ракеты. После достижения скорости  $11,2 \text{ км/сек}$  считается, что они выполнили свою задачу, так как дальше тело летит уже по инерции.

Однако после посадки на какое-нибудь небесное тело космический корабль становится пленником нового поля тяготения. И если этот корабль должен вернуться на Землю, перед ним во второй раз возникает задача пробить невидимую броню силы притяжения. Так как каждое небесное тело имеет свои параметры (радиус, масса, ускорение силы тяжести), то зависящая от них критическая скорость будет иметь свою величину. Например, при старте с Луны <sup>1)</sup> она составляет только  $2,4 \text{ км/сек}$ , а при старте с Марса —  $5,1 \text{ км/сек}$ . Эти величины значительно меньше, чем при старте с поверхности Земли.

### Скорость и продолжительность полета ракеты, улетающей с Земли

После разгона полет ракеты подобен полету ядра, посланного вертикально вверх. Сила тяжести уменьшает скорость ядра до тех пор, пока оно не остановится и не начнет падать обратно на Землю. Так и улетающая ракета движется все медленнее и медленнее. Однако, имея достаточную скорость, она прекратит свое движение только в бесконечности — там, где поле тяготения Земли полностью исчезнет. После этого ракета никогда больше не вернется на Землю. Можно легко рассчитать, как с ростом высоты уменьшается скорость ракеты. Будем исходить из того, что тело, например ракета, стартовала с критической скоростью  $v_{2k}$ . При этом совершенно безразлично, какой высоты достигла ракета; перед ней все время стоит неизменная задача достичь бесконечно удаленной точки. Чтобы гарантировать выполнение этой задачи, ракета должна в каждый момент времени иметь критическую скорость, соответствующую высоте, на которой она находится. Эта

<sup>1)</sup> Взяв массу Луны  $m_1 = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$  и ее радиус  $r_1 = 1738 \text{ км}$ , из формулы (44) получим

$$v_{2k} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{1,738 \cdot 10^6 \text{ м}} = 2375 \text{ м/сек},$$

скорость вычисляется по формуле (44), в которой вместо радиуса Земли надо подставлять все время увеличивающееся расстояние от центра Земли до летящей ракеты, а вместо  $g_1$  — значение ускорения силы тяжести, которое соответственно уменьшается. Как это легко доказать <sup>1)</sup>,

*критическая скорость на расстоянии, в  $n$  раз большем радиуса Земли,*

$$v = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{2r_1 g_1}. \quad (47)$$

Если, например,  $n = 100$ , то ракета находится на расстоянии 637 800 км от Земли. В этом случае ее скорость составляет только  $1/10$  начального значения (рис. 35).

В той же самой мере, в какой уменьшается скорость ракеты с увеличением ее расстояния от Земли, все больше возрастает время, затраченное ракетой на преодоление этого расстояния. Так как вывод соответствующей зависимости довольно сложен, дадим готовую формулу:

*продолжительность полета улетающей с Земли ракеты, когда пройденный путь в  $n$  раз превышает радиус Земли,*

$$T = \frac{r_1}{v_{2k}} \cdot \frac{2}{3} (n \sqrt{n} - 1). \quad (48)$$

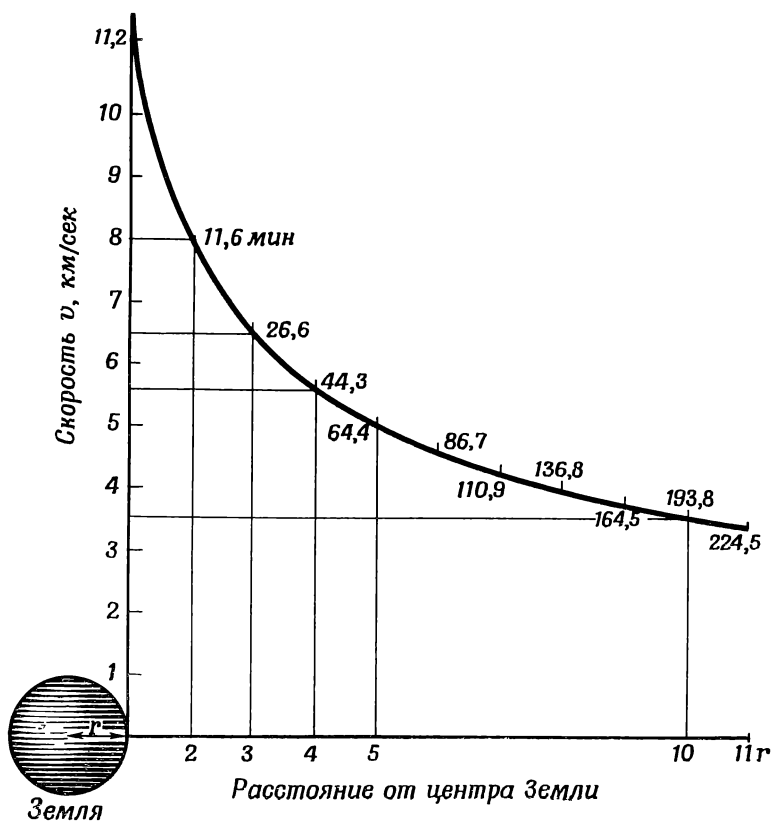
Например, время полета до Луны получается по этой формуле равным около 42 час <sup>2)</sup>. Однако в действительности траектория полета не прямая. Вблизи Луны она переходит в траекторию падения. Кроме того, продолжитель-

<sup>1)</sup> При расстоянии, в  $n$  раз большем радиуса Земли, надо подставить в формулу (44) вместо  $r_1$  значение  $nr_1$  и вместо  $g_1$  значение ускорения силы тяжести из формулы (27), тогда получим:

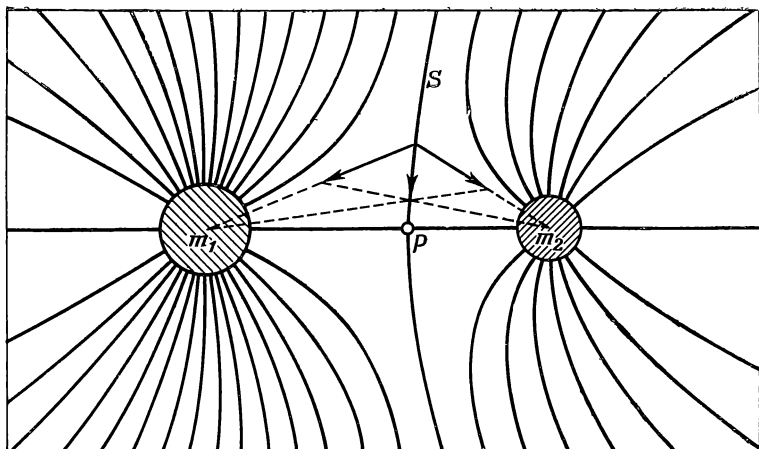
$$v = \sqrt{\frac{2nr_1 g_1 r_1^2}{(nr_1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{2r_1 g_1}.$$

<sup>2)</sup> До точки, в которой отсутствует сила притяжения, ракета должна пролететь 345 960 км (см. стр. 77). Тогда  $n = \frac{345960}{6378} = 54,24$ . При  $v_{2k} = 11\,200$  м/сек продолжительность полета будет равна

$$\begin{aligned} T &= \frac{6,378 \cdot 10^6 \text{ м}}{1,12 \cdot 10^4 \text{ м/сек}} \cdot \frac{2}{3} (54,24 \sqrt{54,24} - 1) = \\ &= 1,5127 \cdot 10^5 \text{ сек} = 42 \text{ час.} \end{aligned}$$

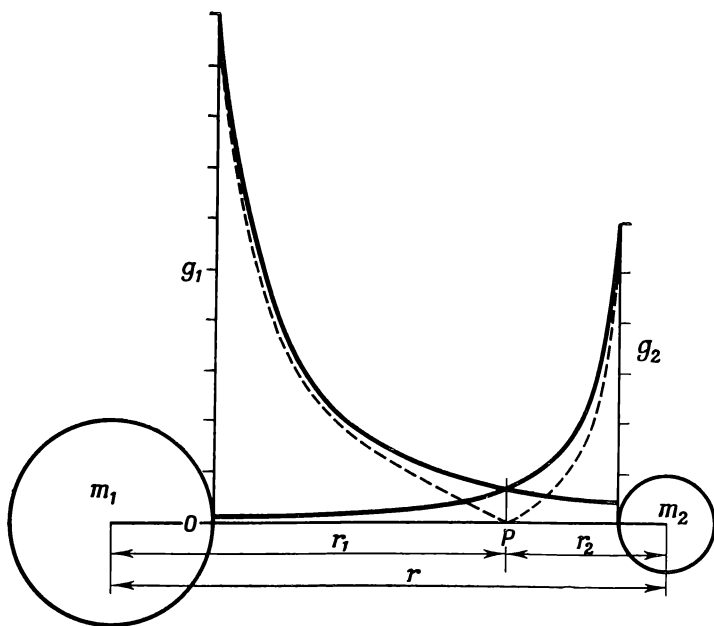


Р и с. 35. Зависимость второй космической скорости и продолжительности полета улетающей с Земли ракеты от ее расстояния от Земли.



Р и с. 36. Меридиональное сечение суммарного поля тяготения двух шарообразных масс ( $m_1 : m_2 = 2 : 1$ ).

$P$  — точка, где нет притяжения. На силовой линии поля  $S$  силы тяготения, исходящие от обеих масс, равны по величине.



Р и с. 37. Изменение ускорения силы тяготения вдоль линии, соединяющей две различные по величине массы.

Пунктиром показано результирующее ускорение;  $P$  — точка, где нет тяготения.

ность полета сокращается, если начальная скорость больше критической скорости при вылете с Земли. По этой причине вторая советская космическая ракета, запущенная 12 сентября 1959 г., достигла поверхности Луны через 38 час.

### Наложение полей тяготения

Чтобы объяснить новичкам, как выглядит магнитное поле, на магнит кладут лист бумаги и рассыпают по нему железные опилки. Тотчас же образуется красивая система дугообразных линий. Затем говорят: «Это силовые линии поля. Они показывают направление сил, действующих в магнитном поле. Расстояние между этими линиями — мера величины этих сил».

К сожалению, не существует такого порошка, который можно рассыпать в поле тяготения и посмотреть на силовые линии. Но кое-что можно сказать и про поля сил тяготения. Для изолированного шарообразного тела силовые линии должны были бы разбегаться по всем направлениям, как иголки у ежа.

Но тело никогда не бывает изолировано от полей тяготения других тел. Так, на поле тяготения Земли накладываются поля Солнца, Луны и других планет солнечной системы, и только совместное действие всех этих полей дает величину и направление силы, которая действует на тело, находящееся в пространстве. Эту результирующую силу надо определять с учетом всех приложенных к телу сил. Если рассматривать поле тяготения только двух тел, то результирующую можно найти по известному правилу параллелограмма. Как выглядит в этом случае суммарное поле, видно из рис. 36.

В подобном поле принцип сложения должен давать одну замечательную точку, в которой силы притяжения обеих масс равны по величине, но противоположны по направлению (точка *P* на рис. 36 и 37). В этой точке сила тяготения как бы исчезает. Положение такой точки, где нет притяжения, легко рассчитать. Между Землей и Солнцем она лежит на расстоянии 259 100 км от Земли. Такая же точка в системе Земля — Луна находится на расстоянии 38 440 км от центра Луны <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> В точке, где отсутствует притяжение, ускорения сил тяготения равны по величине  $\frac{fm_1}{r_1^2} = \frac{fm_2}{r_2^2}$ . При  $r_1 = r - r_2$  это равен-

Поэтому ракета, посланная на Луну или на какую-либо планету, должна, строго говоря, обладать не полной критической скоростью, а лишь скоростью, которая необходима для достижения нейтральной точки, после чего ракета летит к цели под действием силы притяжения небесного тела-цели, т. е. попросту падает на него.

### «Побег» из солнечной системы

Хотя поле тяготения нашей Земли уже доставляет нам много хлопот, мы также подвержены действию поля тяготения Солнца (помимо поля тяготения Луны). Правда, мы этого не замечаем, так как ускорение, сообщаемое этим полем, составляет сотые доли процента от ускорения свободного падения  $g$ . Причина этого — большое расстояние Земли от Солнца. Только жители побережий океанов и некоторых морей временами получают возможность ощущать поле тяготения Солнца во время так называемых *сизигийных* приливов. Это бывает, когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной прямой (в новолуние или полнолуние.— *Перев.*). В это время силы притяжения Солнца и Луны растягивают водную оболочку Земли вдоль одной прямой: оба прилива, лунный и солнечный, складываются, и в результате прилив бывает особенно высоким. Когда же (во время первой и последней четвертей Луны.— *Перев.*) тяготения Луны и Солнца направлены под прямым углом друг к другу, лунный и солнечный приливы вычитаются, и наблюдается самый низкий, так называемый *квадратурный* прилив.

Но, несмотря на все сказанное, нельзя недооценивать поле тяготения Солнца. Оно само по себе намного мощнее земного, и его «радиус действия» значительно больше; оно сказывается довольно заметно там, где поле Земли практически исчезает. Мы говорим об этом потому, что когда-нибудь в будущем человек непременно поставит

---

ство можно записать так:

$$\frac{(r - r_2)^2}{r_2^2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

Для системы Земля — Луна  $\frac{m_1}{m_2} = 81$  (стр. 62), а расстояние между Землей и Луной  $r = 384\,400$  км; отсюда получаем  $r_2 = 0,1 \cdot r = 0,1 \cdot 384\,400$  км  $= 38\,440$  км.



себе задачу вырваться за пределы солнечной системы. Тогда будет необходимо преодолеть не только поле тяготения Земли, но и поле тяготения Солнца.

Такой полет потребует, разумеется, дополнительной затраты энергии. Одна часть ее пойдет на то, чтобы достичь расчетной скорости вылета с Земли  $v_{2k} = 11200$  м/сек. Другая будет потрачена на достижение скорости, необходимой для выхода за пределы поля тяготения Солнца. Величину этой скорости мы можем рассчитать на основании зависимости (45), исходя из скорости Земли на круговой орбите вокруг Солнца; последняя равна  $29\,800$  м/сек<sup>1)</sup> (она в этом расчете играет роль первой космической скорости и поэтому обозначена нами  $v'_k$ ). Увеличение ее в  $\sqrt{2}$  раза даст нам скорость, необходимую для вылета из поля тяготения Солнца (аналогичную второй космической скорости. — *Ред.*):  $v'_{2k} = \sqrt{2} \cdot v'_k = 42300$  м/сек.

Это колоссальная величина, и все наше предприятие могло бы быть обречено на неудачу, если бы сама природа не пришла на помощь технике. Дело в том, что Земля уже имеет, по нашим расчетам, скорость  $29\,800$  м/сек. Было бы просто безрассудством оставить без внимания эту, так сказать, даровую возможность. Мы можем использовать Землю в качестве бесплатной катапульты. Разумеется, надо не ошибиться и стартовать в нужном направлении! Если направление старта совпадает с направлением движения Земли, то необходимо создать только дополнительную прибавку к скорости  $\Delta v = v'_{2k} - v'_k = 42300 - 29800 = 12500$  м/сек (рис. 38).

Для массы  $m$  на старте общая затрата энергии состоит из двух составляющих кинетической энергии, необходимых для преодоления полей тяготения Земли и Солнца:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_{2k}^2}{2} + \frac{m(\Delta v)^2}{2}.$$

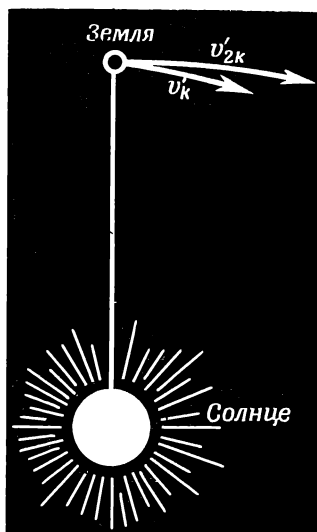
Сомножитель  $m/2$  сокращается, и мы получаем общую скорость

$$v = \sqrt{v_{2k}^2 + (\Delta v)^2}.$$

<sup>1)</sup> Для радиуса орбиты Земли  $r = 149,6 \cdot 10^6$  км и периода ее обращения  $T = 365,256$  суток  $= 3,1558 \cdot 10^7$  сек получаем [по формуле (34)] скорость Земли на круговой орбите вокруг Солнца

$$v'_k = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \cdot 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}}{3,1558 \cdot 10^7 \text{ сек}} = 29\,800 \text{ м/сек.}$$

Р и с. 38. Из-за собственного движения Земли надо из скорости вылета из поля тяготения Солнца  $v'_{2k}$  вычесть скорость движения Земли по круговой орбите  $v_k$ .



После подстановки числовых значений  $v_{2k}$  и  $\Delta v$  получаем

*критическая скорость для вылета из солнечной системы (третья космическая скорость)*

$$v_{3k} = 16,7 \text{ км/сек.} \quad (49)$$

### Виды траекторий

Знания скорости на старте далеко не достаточно, чтобы попасть на одно из многочисленных небесных тел. Правда, при хорошей погоде цель видна довольно хорошо, она не качается и спокойно позволяет взять себя на мушку. Но что только не случается за длительный промежуток времени, пока снаряд находится в полете! Небесное тело, на которое необходимо попасть, движется по сложной кривой вокруг Солнца, причем одновременно меняется его удаление от Земли. При этом перемещается также связанное с ним поле тяготения. Оно оказывает влияние на снаряд задолго до того, как он попадает в цель. Но это еще не все. Так как прямое падение на исследуемое небесное тело приведет к неминуемому разрушению летательного аппарата, нужно стремиться произвести «мягкую посадку». Для этого необходимо заранее располагать надежными

сведениями о свойствах поверхности этого небесного тела, изучив его с достаточно близкого расстояния. Такие данные можно получить, если облететь это тело по близкой орбите и вернуться обратно. Уже доказано, что такая задача практически разрешима. 4 октября 1959 г. третья советская космическая ракета, несущая автоматическую межпланетную станцию «Луна-3», облетела Луну по заранее рассчитанной петлеобразной траектории и в течение 40 мин станция делала снимки обратной стороны Луны (рис. 39).

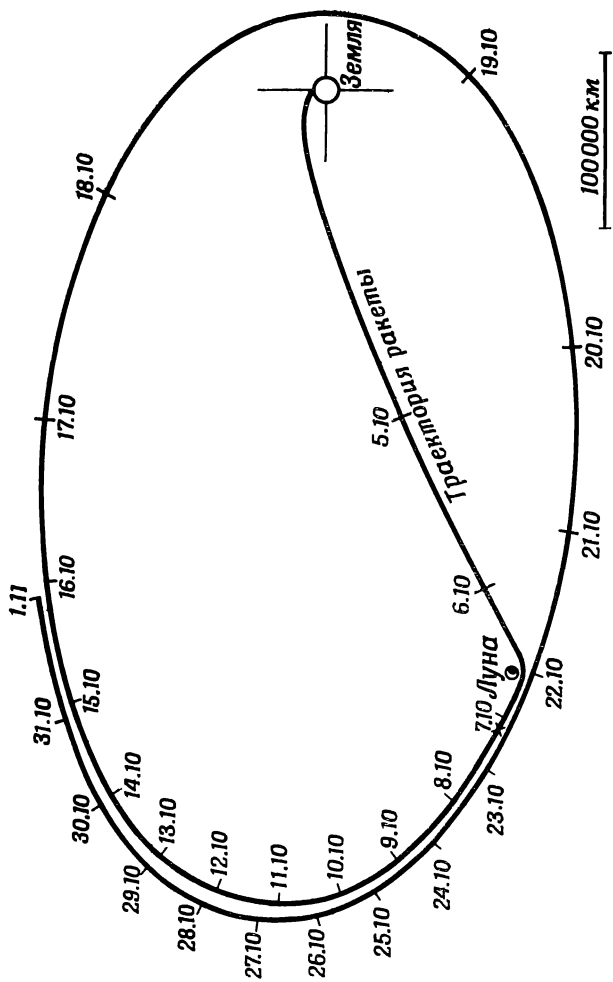
Решение всех связанных с этой проблемой частных вопросов мы можем предоставить специалистам в области астронавтики. Но нам остается ответить на основной вопрос: как в общем случае движется снаряд, находящийся в поле тяготения, будь то поле тяготения Земли или небесного тела, к которому он летит? До сих пор мы рассматривали только круговую траекторию или вылет в поле тяготения по прямолинейному пути. А как ведет себя тело, летящее в поле тяготения с произвольно направленной скоростью? Такая задача полностью и математически точно решена еще Ньютоном 250 лет назад.

Рассматривая эту задачу, мы снова будем исходить из допущения [теорема (22)], что масса сосредоточена в одной точке. Действительные размеры небесных тел не оказывают на движение никакого влияния, так как все эти тела приблизительно шарообразны. Их размеры проявляются только в том, что в определенных случаях снаряд проходит теоретическую траекторию не до конца: траектория прерывается, когда снаряд достигает поверхности небесного тела, или при старте траектория начинается не из центра тела, а с его поверхности.

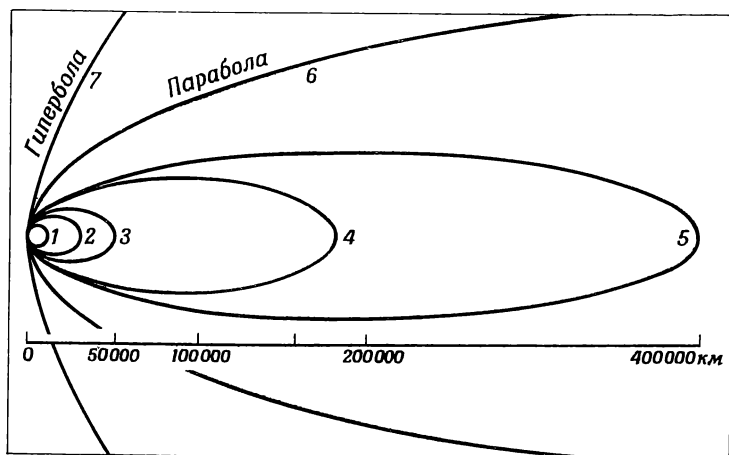
В таком случае геометрический вид траектории определяется только двумя величинами: кинетической энергией  $W_{\text{кин}}$  и потенциальной энергией  $W_{\text{пот}}$  в каждой определенной точке траектории. При этом безразлично, удаляется ли тело от притягивающего центра или приближается к нему. Закон, определяющий траекторию, в одинаковой степени верен как при старте, так и во время приближения к цели.

Возможны следующие три вида траекторий:

- 1) *парабола*:  $W_{\text{кин}} = W_{\text{пот}}$ ,
- 2) *гипербола*:  $W_{\text{кин}} > W_{\text{пот}}$ ,
- 3) *эллипс*:  $W_{\text{кин}} < W_{\text{пот}}$ .



Р и с. 39. Траектория полета к Луне третьей советской космической ракеты.



Р и с. 40. Орбиты искусственных спутников Земли.

Начальные скорости:

Круговая орбита (1)	7,9 км/сек
Эллипс (2)	10,0 км/сек
Эллипс (3)	10,5 км/сек
Эллипс (4)	11,0 км/сек
Эллипс (5)	11,1 км/сек
Парабола (6)	11,2 км/сек
Гипербола (7)	16,7 км/сек

Все три кривые принадлежат к так называемым «коническим сечениям» (рис. 40).

### 1. Параболическая траектория

Парабола — кривая, разомкнутая с одной стороны, причем обе ее ветви в бесконечности идут параллельно друг другу. Центр поля тяготения лежит в *фокусе* параболы. Для осуществления полета по параболической траектории необходимо, чтобы кинетическая энергия летящего тела была в каждый момент точно равна потенциальной энергии, которую имеет это тело по отношению к притягивающему центру. Другими словами, справедливо равенство (стр. 73)

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{fmm_1}{r_1}.$$

Мы уже получили из него скорость  $v_{2k} = \sqrt{\frac{2fm_1}{r_1}}$  и назва-

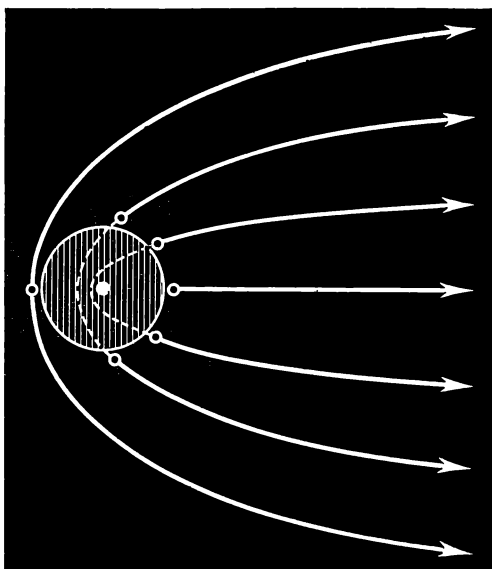
ли ее «критической скоростью», необходимой для вылета из поля тяготения соответствующего небесного тела. Итак, если летящее тело приближается к Земле с любого направления и имеет в какой-нибудь точке своего пути скорость, равную критической скорости, соответствующей расстоянию в этот момент до Земли, то это тело обогнет центр Земли по параболической траектории и после этого снова уйдет в бесконечность. Ради простоты мы не учитываем при этом влияния поля тяготения Солнца.

Однако такое возвращение в бесконечность может не состояться, если параболическая траектория пересечет где-нибудь поверхность Земли (рис. 41). Тогда летящее по более или менее наклонной кривой тело в этом месте столкнется с земной поверхностью, имея в момент столкновения скорость  $v_{2k} = 11,2 \text{ км/сек.}$

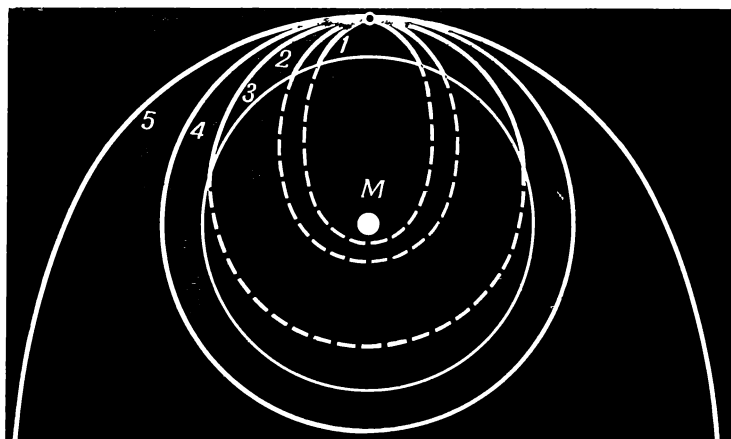
Правда, после этого удара тело может снова стартовать с той же скоростью  $v_{2k} = 11,2 \text{ км/сек.}$  Новая траектория будет также ветвью параболы. Поэтому вторую космическую скорость называют иногда *параболической скоростью*. Из рис. 41 нетрудно видеть, что возможен горизонтальный старт — по параболической траектории, касательной к земной поверхности, причем точка касания совпадает с вершиной этой параболы. Если же старт происходит вертикально, тело преодолет поле тяготения в радиальном направлении. Парабола превратится в прямую линию, и обе ее ветви совпадут.

## 2. Гиперболическая траектория

Гипербола состоит из двух отдельных симметричных ветвей, имеющих свой фокус. Небесную механику интересует только одна из этих ветвей — именно та, в фокусе которой лежит центр поля тяготения. В противоположность параболе обе ветви гиперболы в бесконечности идут не параллельно друг другу, а приближаются к двум прямым (асимптотам), которые образуют между собой определенный угол. Тело летит по гиперболической траектории, если его скорость в любой точке пути больше параболической скорости, соответствующей этой точке. Приближение к небесному телу происходит так же, как и при параболической траектории. Разумеется, теоретически ничто не мешает стартовать с гиперболической скоростью.



Р и с. 41. Параболические орбиты при различных углах старта.  
Внешняя орбита — горизонтальный старт. Прямая — вертикальный старт.  
Пунктиром отмечено прохождение траекторий внутри Земли.



Р и с. 42. Эллиптические траектории при горизонтальном старте  
на высоте 1600 км.

Начальные скорости:

Орбита (1)	3,0 км/сек
Орбита (2)	4,1 км/сек
Орбита (3)	6,1 км/сек
Круговая орбита (4)	7,0 км/сек
Орбита (5)	8,7 км/сек

Пунктир — гипотетические траектории при условии, если бы масса Земли была сосредоточена в ее центре М.

### 3. Эллиптическая траектория

В соответствии с первым законом Кеплера, центр притяжения находится в одном из фокусов эллипса. Эллипс — замкнутая кривая. По такой траектории тело движется только в том случае, если его скорость меньше критической скорости в любой рассматриваемой точке траектории. Поэтому каждое тело, которое улетает с Земли со скоростью меньшей  $11,2 \text{ км/сек}$ , должно описывать эллипс. При этом безразлично, под каким углом это тело стартовало. Исключение составляет упомянутый выше вертикальный старт, когда эллипс становится бесконечно узким и превращается в прямую линию.

Окружность тоже можно рассматривать как эллипс. Мы знаем, что тело, улетевшее с земной поверхности в горизонтальном направлении со скоростью  $v_k = 7,9 \text{ км/сек}$ , облетает Землю по круговой орбите. Если телу была сообщена та же скорость, но под каким-то углом к поверхности, то оно не может выйти на круговую орбиту, а движется по эллиптической, нисходящая ветвь которой пересекает земную поверхность. Точно так же ведет себя тело, запущенное хотя и горизонтально, но со скоростью меньшей  $7,9 \text{ км/сек}$ . Оно также должно будет упасть на Землю (рис. 42).

Последний случай представляет не что иное, как обычный горизонтальный бросок. Могут сразу же возразить, что при этом должна получиться «баллистическая парабола», но противоречие улаживается благодаря практике. А именно в условиях движения вблизи поверхности Земли поле тяготения можно рассматривать как однородное и с практически достаточной точностью принимать, что ускорение силы тяжести постоянно на любой высоте. Однако в действительности это не совсем так, поэтому все баллистические параболы в действительности являются эллиптическими кривыми, хотя их отклонение от параболической формы имеет только теоретическое значение.

Все эти соотношения приобретают, так сказать, обратный смысл, если летательный аппарат приближается к другому небесному телу. Если при этом скорость полета меньше, чем соответствующая критическая скорость, летящее тело будет захвачено полем тяготения того космического объекта, к которому оно летит. Пусть, например,

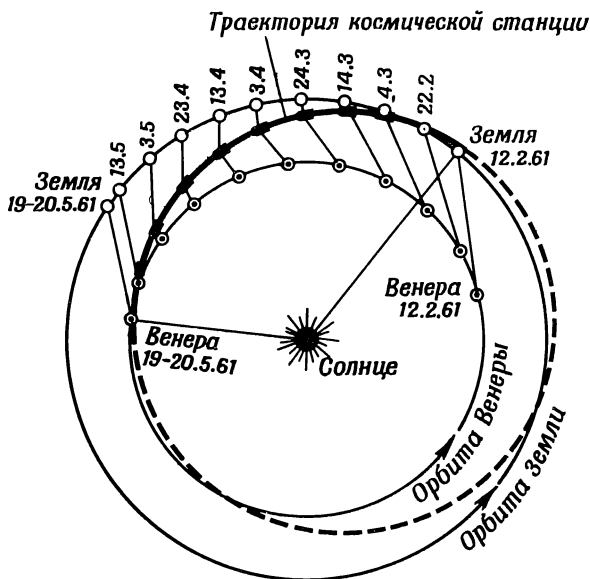


снаряд захвачен Луной; это означает, что скорость его полета была меньше критической скорости на Луне, равной  $2,4 \text{ км/сек}$  (стр. 74). Поскольку это произошло, появляются две возможности: или этот снаряд превратится в спутник, который будет облетать Луну по эллиптической орбите, или эллиптическая орбита пересечет лунную поверхность и полет снаряда закончится. Выйти на круговую орбиту вокруг Луны — такая задача требует от техники в ее сегодняшнем состоянии подлинного искусства, ибо здесь необходимо точно согласовать между собой три величины: расстояние до Луны, соответствующую скорость полета по круговой орбите и направление полета точно по касательной.

### Составные орбиты

Как мы уже вскользь упоминали, истинная траектория снаряда, запущенного в космическое пространство, не всегда соответствует трем названным теоретическим кривым. Всю траекторию можно с самого начала разбить на два участка. На *активном участке* характер полета снаряда целиком определяется работой ракетного двигателя и системы управления. По сравнению со всей траекторией этот участок относительно невелик и служит для того, чтобы придать летящему телу требуемые начальные скорость и направление. После отключения двигателя начинается *пассивный участок* траектории. Лишь теперь полет протекает по законам небесной механики, так как, начиная с этого момента, тело подвластно только своей инерции и силам тяготения. Траектория будет точным Эллипсом, параболой или гиперболой лишь тогда, когда можно принимать во внимание поле тяготения только одного тела. На практике это может быть лишь тогда, когда влияние других небесных тел пренебрежимо мало из-за их удаленности.

О том, как может выглядеть траектория ракеты в сложном поле тяготения, можно судить по полету советской автоматической станции «Венера-1», запущенной 12 февраля 1961 г. (рис. 43). Вначале на круговую орбиту вокруг Земли с высотой около  $250 \text{ км}$  была запущена многоступенчатая ракета. С этой первой космической базы стартовал спутник, который при помощи собственной тяги приобрел скорость около  $11\,860 \text{ м/сек}$ . Уже от этой



Р и с. 43. Траектория советской космической станции, посланной к Венере.

второй базы отделилась сама космическая станция весом 634,5 кг, дальнейший полет которой совершался пассивно. Таким образом, скорость станции была на 661 м/сек выше второй космической скорости, благодаря чему она покинула Землю по гиперболической траектории.

Однако с увеличением расстояния от Земли станция все больше и больше попадала под действие поля тяготения Солнца. Но так как для вылета из солнечной системы необходима скорость 16,7 км/сек по отношению к Земле, гипербола перешла в заранее рассчитанный эллипс. По этой орбите космическая станция прошла за время около трех месяцев 270 млн. км. При входе в поле тяготения Венеры она имела по отношению к этой планете гиперболическую скорость и поэтому не могла быть захвачена ею. Станция приблизилась к Венере на расстояние примерно 100 000 км и затем покинула ее. Начиная с этого момента у Солнца появилась новая планета. Она совершает один оборот за 296 суток по эллиптической орбите, которая расположена между Землей и Венерой.

# СВЕТ КАК МАСШТАБНАЯ ЛИНЕЙКА

## Скорость света

Чтобы узнать что-то о процессах и событиях в космосе, человечество до недавних пор располагало только одним средством. Это — тонкие нити лучей света. Как сверкающая паутина соединяют они с Землей самые далекие светила. Если бы это были всего лишь простые нити, то нам от них было бы мало толку. Но они представляют собой сложную смесь электромагнитных волн, и, подробно изучая их, мы все более обогащаем свои знания. Просто удивительно, сколько интересных подробностей сообщают тончайшие лучи звезд внимательному ученому.

Кроме этого, лучи света являются точнейшим эталоном для всех земных и астрономических измерений расстояний и всего, что прямо или косвенно с этим связано. Длины волн лучей света поразительно постоянны, и, что особенно важно, скорость света в вакууме всегда имеет определенное и неизменное значение. Впрочем, когда-то господствовало мнение, что свет распространяется с бесконечно большой скоростью. Это убеждение имело очень простое «обоснование»: отсутствовали доводы, при помощи которых можно было бы доказать обратное. Со всей серьезностью утверждали, что свет бывает здесь в тот же момент, когда он возник где-нибудь в другом месте.

Датскому астроному Олафу Рёмеру (1644—1710) это утверждение показалось не столь уж достоверным, когда он наблюдал в телескоп спутник Юпитера Ио. Видимый как светлая точка этот спутник при каждом своем обращении должен войти в тень Юпитера и «затмиться» на определенный промежуток времени, прежде чем снова появиться в виде яркой точки с другой стороны. Между двумя затмениями спутника Ио проходит *42 час 28 мин.* Это время соответствует его периоду обращения вокруг Юпитера. Если бы все шло так гладко, по Ио можно было бы ставить часы.

Но директор Парижской обсерватории Кассини и его тогдашний ассистент Рёмер заметили, что дело обстоит не совсем так. Когда Земля при своем обращении вокруг Солнца удаляется от Юпитера (рис. 44), «часы Ио» из дня в день все больше отстают. Опоздание в точке 2 по отношению к точке 1 составляет 1000 сек. Когда же Земля проходит вторую половину своей орбиты, это запаздывание исчезает. Рёмер нашел убедительное объяснение этому явлению: между двумя затмениями свет, идущий от Ио, должен пройти тот самый отрезок пути, на который Земля отделилась от Юпитера. Чтобы преодолеть это добавочное расстояние, свету нужно дополнительное время, которое в случае максимального удаления Земли от Юпитера и равно этим 1000 сек. С другой стороны, наибольшее добавочное расстояние представляет собой диаметр земной орбиты, равный примерно  $2 \cdot 150 \cdot 10^6$  км. Отсюда скорость света

$$c = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ км}}{1000 \text{ сек}} = 300\,000 \text{ км/сек.}$$

Теория Рёмера была правильна, и поэтому на ее утверждение в науке не могло повлиять то, что Кассини, а вместе с ним и вся Парижская академия полностью отвергли ее. Позже, вплоть до последнего времени, были выполнены многочисленные наземные измерения скорости света, причем с более высокой точностью. По этим данным

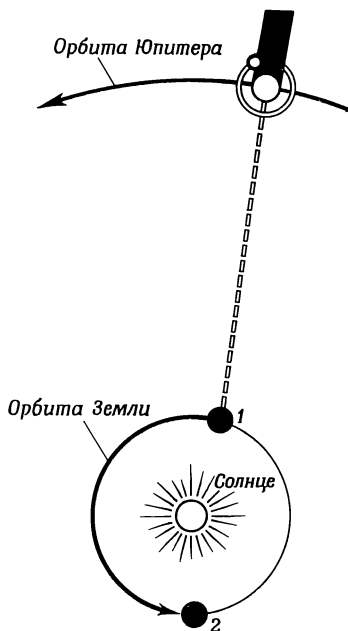
*скорость света в вакууме*

$$c = (299\,790 \pm 6) \text{ км/сек.} \quad (50)$$

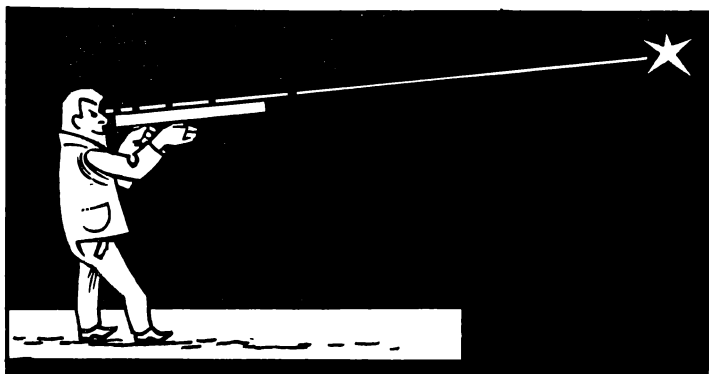
Это численное значение хотелось бы знать еще более точно, чтобы окончательно выяснить чрезвычайно важный вопрос, действительно ли скорость света в вакууме является абсолютно постоянной величиной, как этого требует теория относительности. Но такие измерения очень трудны, и этой проблемой науке предстоит заниматься еще долгое время.

## Расстояния

Мы с детства слепо убеждены в том, что луч света — это идеально прямая линия (рис. 45). Все измерения длин и углов без света были бы невысказимо



Р и с. 44. Определение скорости света по Рёмеру.



Р и с. 45. Поверка линейки.

трудны. Не только потому, что в темноте ничего не видно, но и по той причине, что не существует другого физического объекта, о котором можно со спокойной совестью утверждать, что он безусловно прямой.

Так как линейка и рулетка слишком коротки для измерения космического пространства, приходится в этом случае полностью положиться на свет. При этом космические расстояния измеряют точно так же, как это делает на поле землемер. Берут определенный *базис*, длина которого заранее известна, и из его конечных точек визируют объект (светило). Угол, заключенный между двумя визирными линиями, дает возможность рассчитать расстояние до него. Этот угол называют *параллаксом*. С таким же успехом можно начать измерения с самого объекта и сказать:

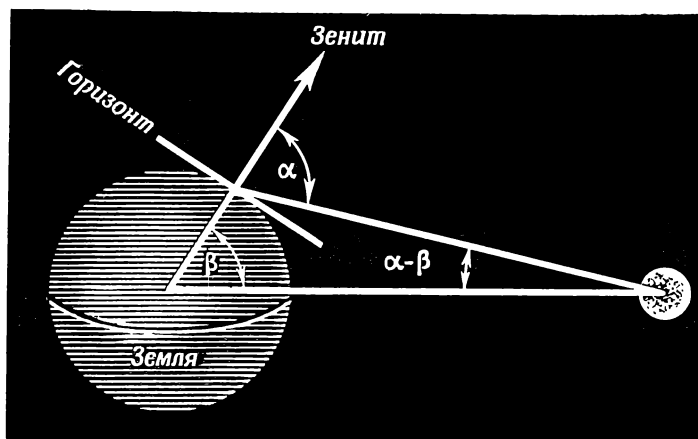
*параллакс светила — угол, заключенный между двумя прямыми, направленными от светила в два различных наблюдательных пункта.*

Колоссальные космические расстояния требуют также и базиса соответствующей величины. Для измерений в пределах солнечной системы в качестве базиса используют радиус Земли (рис. 46). Когда светило в течение суточного оборота Земли достигает своей наивысшей точки, луч, направленный на него, и перпендикуляр к земной поверхности, проходящий через точку наблюдения, образуют угол  $\alpha$ . Если теперь соединить прямой это светило с центром Земли, то получим угол  $\beta$ . Разность между двумя углами  $\alpha - \beta$  называется *суточным параллаксом* светила.

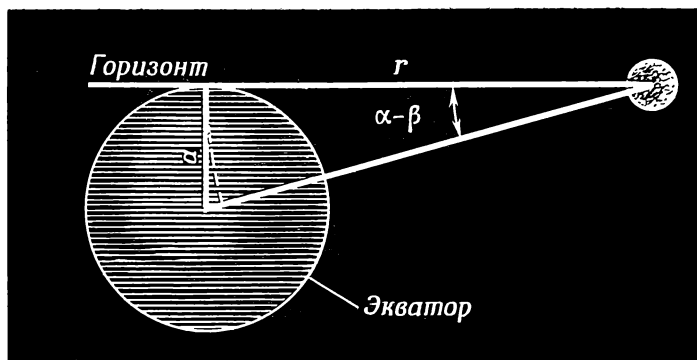
Угол  $\alpha$  достигает своего максимально возможного значения, а именно  $90^\circ$ , когда светило расположено на горизонте. Если наблюдатель находится одновременно и на экваторе, то получают особый случай *экваториального горизонтального параллакса* (рис. 47). Хотя треугольник, построенный на радиусе Земли, как на основании, является в этом случае прямоугольным, из-за малости угла  $\alpha - \beta$  можно использовать известное соотношение:

$$\text{Угол в радианной мере} = \frac{\text{Длина дуги}}{\text{Расстояние}}. \quad (51)$$

Равенство справедливо, так как дуга окружности (изображения пунктиром на рис. 47) практически совпадает с



Р и с. 46. Суточный параллакс.



Р и с. 47. Экваториальный горизонтальный параллакс.

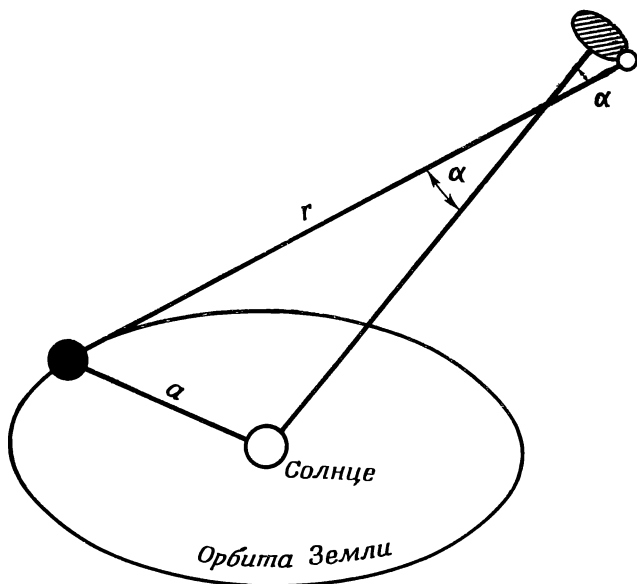
радиусом Земли. Отсюда находим

$$\text{Расстояние } r = \frac{\text{Радиус Земли } a}{\text{Параллакс}}. \quad (52)$$

Например, параллакс Луны равен  $\alpha = 0^{\circ},95068$ . Этот угол составляет в радианной мере  $\alpha = \frac{\alpha \cdot \pi}{180^{\circ}} = 0,01659$  и расстояние Земля — Луна  $r = \frac{6378 \text{ км}}{0,01659} = 384400 \text{ км}$ .

Для измерения расстояния до звезд радиус Земли слишком мал. Здесь надо перейти к значительно большему базису; в этих случаях используют половину диаметра земной орбиты. Многие звезды, расположенные сравнительно близко к Земле, в течение года описывают на небосводе бóльшие или меньшие эллипсы. Однако это только кажущееся смещение; оно является следствием изменения нашего местоположения. Если измерить большую полуось такого эллипса в угловых единицах, то получим *годовой параллакс* звезды (рис. 48).

Хотя в сравнении с рассматриваемыми гигантскими расстояниями базис, равный половине диаметра земной



Р и с. 48. Годичный параллакс.



орбиты, довольно мал, все же он еще достаточен для многих звезд, находящихся в относительной близости к нам. Ближе всего к Земле находится звезда Проксима в созвездии Центавра — очень слабая звезда, которая в наших северных широтах не видна. Ее параллакс составляет  $0'',765$ . Используя этот же самый способ, который мы только что применили для Луны, и зная радиус орбиты Земли  $149,6 \cdot 10^6$  км, получаем расстояние до Проксимы Центавра  $4,034 \cdot 10^{13}$  км.

Наше воображение настолько несовершенно, что мы не можем представить себе такие огромные числа. Чтобы сделать их более удобными для сравнения и вычислений, ввели две особые единицы измерения. Одна из них — *параллакс-секунда*, сокращенно парсек, *пс*. Это расстояние до объекта, годичный параллакс которого составляет одну угловую секунду. Расстояние до Проксимы Центавра равно  $\frac{1''}{0'',765} = 1,31$  пс. Отсюда также легко можно найти

$$1 \text{ пс} = 3,0857 \cdot 10^{13} \text{ км.} \quad (53)$$

Другая, тоже довольно часто применяемая единица, *световой год*, возможно, немного нагляднее. Световой год — это путь, который свет проходит за один год, точнее в течение времени  $31,557 \cdot 10^6$  сек. Так как скорость света  $c = 299\,790$  км/сек, то расстояние в один световой год равно произведению этих двух чисел, а именно:

$$\begin{aligned} 1 \text{ св. год.} &= 9,4605 \cdot 10^{12} \text{ км;} \\ 1 \text{ пс} &= 3,26 \text{ св. года.} \end{aligned} \quad (54)$$

Легко сказать: один световой год. Но попробуйте себе представить соответствующее ему расстояние! Это невозможно, и все сравнения только приводят нашу мысль на край новой пропасти. Можно попытаться преодолеть это расстояние на ракете, летящей со второй космической скоростью. Но перед стартом следует предупредить пассажиров такой ракеты, что их путешествие будет продолжаться 27 000 лет!

Можно сравнить это расстояние с расстоянием от Земли до Солнца; тогда обнаружим, что один световой год длиннее радиуса нашей орбиты более чем в 6 млн. раз. Ни один портной не рискнет представить себе нить толщиной с человеческий волос и длиной в один световой год,

так как масса такой нитки должна составлять 200 млн. тонн! Впрочем, все более или менее искусственные попытки представить световой год при помощи привычных понятий ничего не изменяют ни в его размерах, ни в том факте, что наиболее близкая звезда Проксима Центавра удалена от нас на расстояние 4,26 св. года. По сравнению с другими звездами и звездными системами это расстояние еще можно назвать очень небольшим.

Однако, поскольку точность измерений при помощи тригометрических методов ограничена величиной  $\pm 0",03$ , пользуясь этими методами, мы не можем проникнуть сколь угодно далеко. В самом лучшем случае можно определить расстояние порядка 100 св. лет.

Для измерения еще больших расстояний приходится прибегать к совершенно другим методам, о которых речь будет идти дальше. Там имеют дело уже с м и л л и о н а м и световых лет. От наиболее удаленных небесных тел нас отделяет не меньше 3 млрд. св. лет. Точнее надо сказать так: три миллиарда лет они находились на том месте, откуда сегодня до нас дошел свет. Как обстоит дело с ними в настоящее время, мы узнаем только еще через три миллиарда лет. Тому, кто очень спешит это узнать, придется подождать...

## Система Млечного Пути

Говоря о Млечном Пути, мы далеко перешагнем тесные рамки нашей планетной системы и будем все больше и больше расширять наши познания о звездном мире.

Еще долгое время после смерти Коперника ученые никак не связывали звезды с солнечной системой. Эти небесные тела называли *неподвижными звездами*, так как они в противоположность движущимся светилам — планетам — казались прочно скрепленными с небосводом.

Доминиканский монах Джордано Бруно в своем смелом предвидении осмелился изменить это общепринятое со времен Аристотеля представление. Перед его проносящим в бесконечность взором небесный свод превратился в неизмеримое пространство, в котором витали звезды — бесчисленные далекие солнца. Они были окружены планетами, подобными Земле и населенными живыми существами. Но эпоха средневековья еще не была

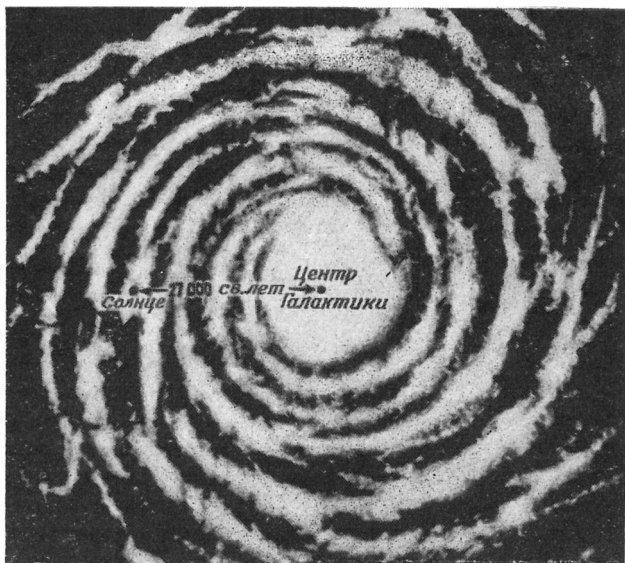
готова для принятия таких «еретических» идей. Преследуемый церковью, Бруно переезжал из одной страны в другую, пока злой рок окончательно не настиг его. Спокойный и непоколебимый вплоть до последнего момента, взошел он на костер в 1600 г. в Риме, стойкостью своих убеждений вызывая негодование всего христианского мира.

Идеи Бруно были сильнее, чем костры и консерватизм Ватикана. Дальнейшее развитие астрономии подтвердило их правильность: наша солнечная система всего лишь крошечная частица Вселенной и нет никаких оснований ставить ее в какое-то особое положение. Давайте и мы отбросим выражение «неподвижная звезда» и начнем в будущем все небесные тела, подобные Солнцу, называть просто *звездами*.

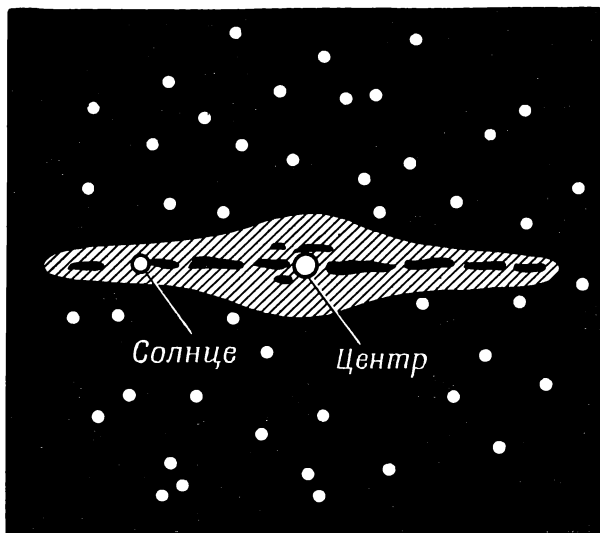
Все звезды, видимые невооруженным глазом и в обычный телескоп, образуют систему высшего порядка, которую называют *Галактикой*. Радиоастрономические наблюдения на волне 21 см (стр. 163), проведенные за последние годы, помогли создать довольно надежную картину этой гигантской звездной системы. Хотя наша солнечная система находится внутри Галактики, структуру последней нельзя изучить при помощи оптических средств, так как огромные темные туманности закрывают нам вид центральных областей Галактики. Видна только слабо светящаяся полоса, протянувшаяся вдоль ночного неба, — Млечный Путь. Взгляд в телескоп при достаточно сильном увеличении помогает различить в этой полосе огромное число звезд.

Галактика включает около 100 млрд. звезд. Грубо говоря, она имеет вид диска, утолщенного в середине. Если смотреть на этот диск, так сказать, сверху, то видно, что он распадается на некоторое количество спиральных рукавов (рис. 49). Диаметр диска составляет около 80 000 св. лет. Толщина в середине — 16 000 св. лет. Солнце лежит почти точно в плоскости симметрии, на краю одного из удаленных спиральных рукавов, на расстоянии 27 000 св. лет от центра Галактики. Вся Галактика вращается со скоростью, все возрастающей по мере удаления от ее центра. Солнце имеет скорость 220 км/сек и совершает один оборот за 230 млн. лет.

Эта подобная диску главная система окружена шарообразной областью диаметром около 140 000 св. лет,



Р и с. 49. Вероятный вид Галактики «сверху».



Р и с. 50. Схематический вид Галактики «с ребра».  
Черным обозначены темные облака. Светлые точки — шаровые звездные скопления.

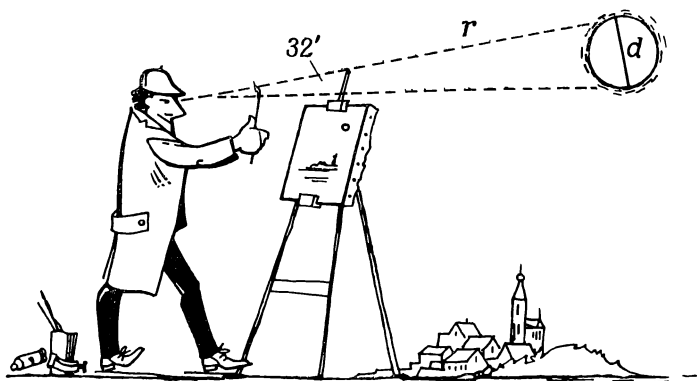
в которой находятся более удаленные от центра звезды. Они объединяются в *шаровые звездные скопления*, каждое из которых может содержать от 50 000 до 50 млн. звезд (рис. 50).

Мы нарисовали лишь грубую картину звездного мира, так как нас интересуют не столько астрономические детали, сколько физические законы, господствующие в космосе. Но мы еще увидим (стр. 218), что мир не исчерпывается одной лишь Галактикой. Она — только маленький островок в океане Вселенной.

### Размеры небесных тел

Рядом с вопросом о расстоянии до небесных тел стоит вопрос об их действительных размерах. На него также не легко ответить. Что говорить о далеких звездах, если такой близкий объект, как Луна, различные наблюдатели видят по-разному. Не только обычные люди, но и художники, которые, как специалисты, должны обладать особенно хорошим глазомером, не одинаково оценивают ее величину. То ли из-за собственного мечтательного состояния, то ли из-за стремления угодить покупателям и зрителям, они всегда рисуют ее чрезмерно большой. Наверное, все ценители живописи с презрением отнеслись бы к тому художнику, который осмелился бы изобразить Луну в ее настоящую величину.

Какова же эта величина? Посмотрите с расстояния 33 см на этот маленький кружок диаметром 3 мм — ○.



Р и с. 51. Видимый и действительный диаметр Луны.

Здесь в масштабе представлен диаметр Луны точно так, как он выглядит на небе! Это безошибочно можно проверить по фотографическому снимку и при этом также исправить широко распространенную ошибку, будто Луна в зените меньше, чем на горизонте. Дело в том, что в этом случае тоже имеет место оптическая иллюзия. Если восходящая или заходящая Луна стоит над горизонтом, ее бессознательно сравнивают с другими, находящимися на горизонте предметами, такими, как дом или группа деревьев, и невольно «преувеличивают» ее размеры. Если же это окружение отсутствует, то человек бывает разочарован и думает, будто Луна стала меньше.

Диаметр Луны, как и размеры других небесных тел, измеряют в угловых единицах. Этот *видимый диаметр* Луны колеблется между  $29',3$  и  $33',4$ , так как ее орбита вокруг Земли немного эллиптична (рис. 51). По чистой случайности Луна кажется такой же по величине, как и Солнце (видимый диаметр  $32'$ ). Линейный, т. е. *действительный диаметр*, получают из соотношения (51):

$$\begin{aligned} & \text{Действительный угловой диаметр} = \\ & = \text{Видимый угловой диаметр} \times \text{Расстояние.} \end{aligned}$$

Для Луны получаем<sup>1)</sup>  $d = 3476$  км, т. е. более четверти диаметра Земли.

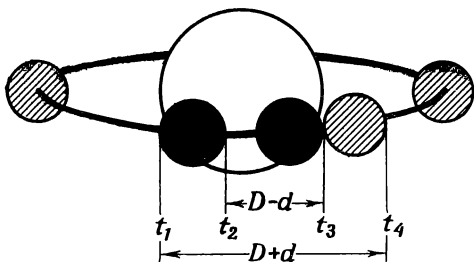
Планеты кажутся нам еще меньше, чем Луна. Все же в хороший телескоп они видны как маленькие диски, видимый диаметр которых можно довольно точно измерить. Для Марса он, например, колеблется между  $3''$  и  $25''$ , в зависимости от удаления планеты от Земли.

Но все старания определить размеры звезд при помощи простого измерения углов терпят провал из-за колоссальной удаленности звезд. Пользуясь другими методами измерения, нашли, что «видимый» диаметр одной из наиболее крупных звезд равен  $0'',02$ . Примерно таков же предел разрешающей способности самого крупного телескопа (стр. 106). Поэтому даже в самые мощные телескопы

---

<sup>1)</sup> Видимый диаметр надо подставить в радианной мере. Если взять его среднее значение  $31',5$  и расстояние до Луны  $384\,400$  км, то получим

$$d = r \cdot \alpha = \frac{384\,400 \text{ км} \cdot 31,083 \cdot 2\pi}{360 \cdot 60} = 3476 \text{ км.}$$



Р и с. 52. Прохождение спутника перед главной звездой.

звезды видны как светящиеся точки, так что непосредственное определение их диаметра невозможно.

Чтобы все-таки определить размеры звезд, необходимо идти другими путями. Один из наиболее успешных методов основывается на том, что многие звезды являются *двойными* и обращаются вокруг общего центра масс. Если на плоскость орбиты смотреть «с ребра», то одна из двух звезд во время своего обращения проходит перед другой и затмевает ее (рис. 52). Такой тип двойных звезд называют *затменно-переменными*. Когда одна звезда загораживает другую, блеск системы уменьшается (как, например, при затмении Солнца), а потом снова медленно возрастает. Поскольку речь идет здесь о звездах, расположенных очень близко одна к другой, это периодическое изменение блеска является вообще единственным признаком того, что это две звезды, а не одна.

Как по этому изменению блеска можно рассчитать диаметры обеих звезд, показано в следующем схематическом примере с произвольно взятыми простыми числовыми значениями. Пусть период обращения составляет 30 час. От начала до конца затмения пусть проходит  $t_4 - t_1 = 5$  час, а время максимального затмения, в течение которого расположенная ближе к нам звезда целиком проектируется на более отдаленную, продолжается  $t_3 - t_2 = 2$  час. Определяемая по специальной методике (стр. 116) орбитальная скорость звезды  $v = 10^5$  м/сек. Тогда (см. рис. 52) можно записать соотношения:

$$D + d = v(t_4 - t_1)$$

и

$$D - d = v(t_3 - t_2).$$

Отсюда получаем

$$D = \frac{(D+d) + (D-d)}{2} = v \frac{(t_4 - t_1) + (t_3 - t_2)}{2} = 1,26 \cdot 10^9 \text{ м}$$

и

$$d = \frac{(D+d) - (D-d)}{2} = v \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} = 5,4 \cdot 10^8 \text{ м.}$$

Итак, речь идет о двух звездах, близких по размерам к Солнцу.

Вообще говоря, действительные диаметры звезд различаются чрезвычайно сильно. Солнце является так называемой «нормальной звездой-карликом». Однако «белые карлики» намного меньше его — их диаметр сравним с диаметром Земли. Самыми большими являются звезды-гиганты и сверхгиганты, размеры которых могут во много сотен раз превышать диаметр Солнца.

### Телескоп

В прежние времена, чтобы вызвать у окружающих людей ужас, им рассказывали леденящие душу истории, в которых фигурировали таинственные духи и призраки. Сегодня эти рассказы уже утратили власть над людьми. Удовольствие, получаемое от бегающих по коже мурашек и стука зубов, было окончательно потеряно с тех пор, как люди стали все лучше понимать, что действительный мир природы и современной техники содержит гораздо больше удивительных вещей, чем все сказки, вместе взятые. Наш современник направляет свою фантазию по другому пути и постоянно получает для нее все новую и новую пищу. Все мощнее становятся двигатели, все больше корабли, все быстрее человек рассекает воздух, а границ развитию техники по-прежнему не видно. В этом соревновании «участвуют» и телескопы, пытливно вглядывающиеся в космическое пространство. «Знаток» с нетерпением ожидает, когда же, наконец, он сможет положить на стол первую фотографию марсианина. Он уверен, что увеличение, даваемое оптическими инструментами, должно повышаться точно так же, как и мощность электростанций.

К сожалению, мы должны сообщить ему, что марсианина, по всей вероятности, вовсе не существует, но зато на планетах солнечной системы есть много куда более интересных вещей. Однако вряд ли когда-нибудь удастся

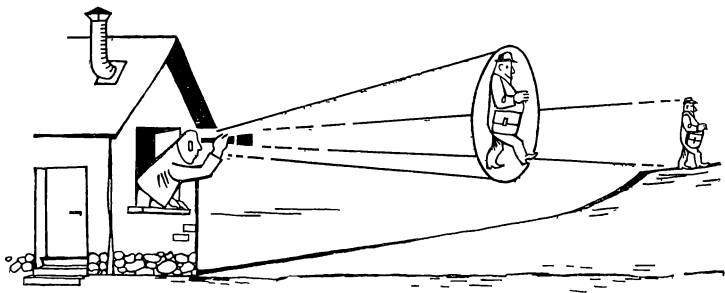


найти там что-нибудь любопытное при помощи одного лишь телескопа. Еще меньше можно обнаружить, наблюдая звезды. Даже в самый большой в мире телескоп-гигант видно ненамного больше, чем в первую зрительную трубу Кеплера.

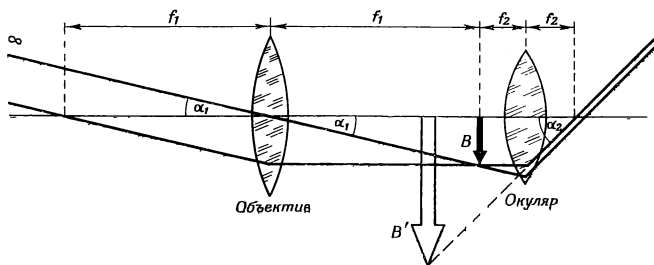
Поэтому создается впечатление, что, несмотря на общий прогресс науки, техника создания телескопов отстает. Почему, в самом деле, не изготовить мощные телескопы, дающие гораздо бóльшие, чем прежде, изображения? Однако причина возникающих здесь затруднений имеет не столько технический, сколько физический характер и заключается в «непокорном» свойстве самого света. С ним нельзя обращаться как вздумается. Мало того, что свет «требует» самой тщательной шлифовки зеркала и безупречной «настройки» линз, он еще и сам устанавливает границы, до которых возможно увеличение. Непреодолимые преграды технике ставят длины световых волн.

Прежде всего давайте выясним, что следует понимать под *увеличением* телескопа? Его выражают так же, как оценивают величину видимого предмета. Предположим, что мы видим вдалеке судебного исполнителя. Он кажется нам тем больше, чем больший угол образуют между собой лучи, направленные от его крайних точек в глаз наблюдателя (рис. 53). Если к нашему облегчению этот человек уходит в противоположную сторону от нас, то этот угол становится все более острым. Вдали эта опасная личность сокращается до размеров небольшой точки, а угол зрения составляет только доли углового градуса.

Зрительная труба снова увеличивает угол зрения, ставший слишком маленьким. Глядя в трубу, мы видим,



Р и с. 53. Угол зрения.



Р и с. 54. Увеличение телескопа.

$\alpha_1$  — угол зрения без телескопа. Наблюдатель, смотря в окуляр, видит под углом  $\alpha_2$  изображение  $B'$ , превышающее по величине изображение  $B$ , которое дает объектив.

как этот субъект, устремляющийся широкими шагами к своей очередной жертве, самым комичным образом кажется едва сдвигающимся с места, так как изменилась вся перспектива.

Поскольку через зрительную трубу смотрят обычно вдаль, попадающие в трубу лучи света почти параллельны (рис. 54). Поэтому изображение  $B$ , которое дает первая линза зрительной трубы (объектив), лежит в его фокальной плоскости. Для телескопа совсем не имеет значения, что это изображение получается перевернутым. Прибор устроен так, что изображение  $B$  находится одновременно в фокальной плоскости второй линзы (окуляр), в которую смотрит наблюдатель. На рис. 54 можно сразу заметить, что угол  $\alpha_2$  больше угла  $\alpha_1$ . Если выразить оба угла при помощи тригонометрических зависимостей, то получим  $\operatorname{tg} \alpha_2 = B/f_2$  ( $f_2$  — фокусное расстояние окуляра) и  $\operatorname{tg} \alpha_1 = B/f_1$  ( $f_1$  — фокусное расстояние объектива). Но так как оба эти угла очень малы, вместо значения тангенсов можно подставлять сами углы, выраженные в радианной мере. Получаем соотношение  $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{B}{f_2} : \frac{B}{f_1}$ . Оно и представляет собой

*увеличение телескопа*

$$v = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (55)$$

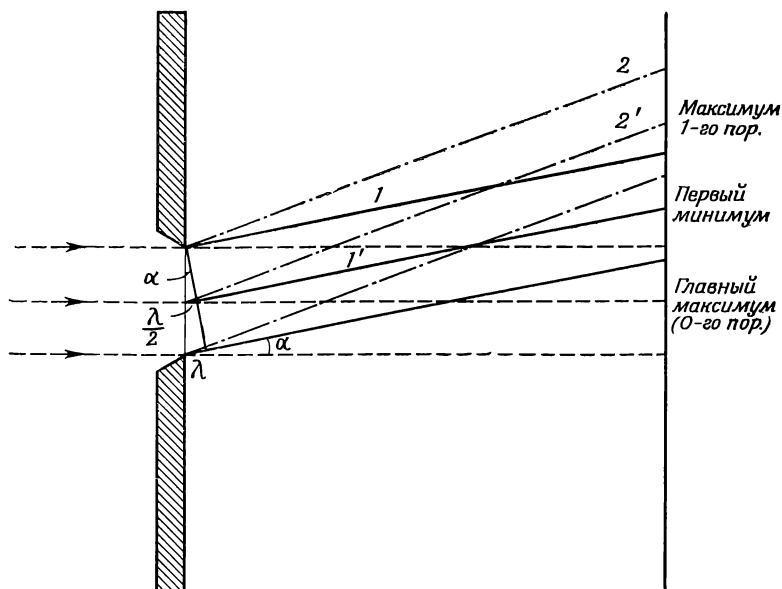
Отсюда видно, как создается сильное увеличение. Фокусное расстояние объектива должно быть по возмож-

ности большим, а окуляра — возможно меньшим. Казалось бы, ничто не мешает сделать увеличение  $\nu$  сколь угодно большим. Для этого надо изготовить трубу такой, чтобы отношение  $f_1/f_2$  имело ту величину, какую нам хочется иметь. К сожалению, после достижения определенного значения это теряет всякий смысл, потому что дело идет не об удовольствии от возможно большего угла зрения, но о том, чтобы различить как можно больше отдельных деталей рассматриваемого объекта. Но последнее не следует неизбежно из первого. Чтобы понять это, лучше всего представить себе, что все линзы из зрительной трубы вынуты и осталось не что иное, как пустая труба, так сказать, отверстие, окруженное металлом. А как мы сейчас увидим, дело заключается именно в диаметре отверстия.

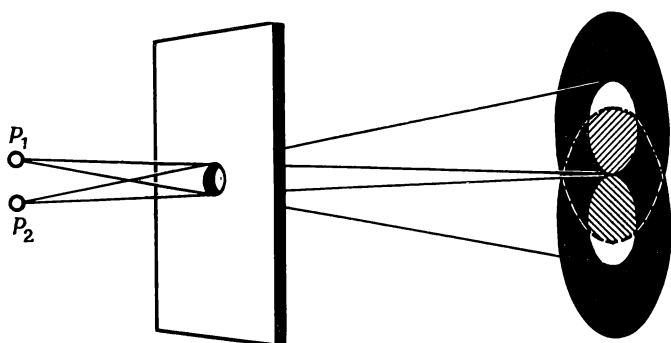
### Разрешающая способность телескопа

Если пучок параллельных лучей света проходит мимо непрозрачного края экрана, то на противоположной стене должна появиться тень. Приглядевшись внимательнее, мы увидим, что тень не имеет резкой границы, а немного размыта. В этом случае луч света отклоняется от своего прямолинейного направления, или, как говорят, *диффрагирует*.

Если свет проходит через щель между двумя такими экранами (рис. 55), то все отдельные лучи светового пучка претерпевают одно и то же отклонение. Для простоты мы принимаем, что речь идет о пучке параллельных лучей. По большей части после прохождения через щель они распространяются дальше также прямолинейно. На стене появляется светлое изображение щели — так называемый *главный максимум* или максимум 0-го порядка. Из многих отклоняющихся в сторону лучей мы рассмотрим два. Один из них ( $I$ ) лежит в верхней, другой ( $I'$ ) в нижней половине пучка, и оба должны отклониться от прямой линии на одинаковый угол  $\alpha$ . Этот угол выберем так, чтобы нижний луч  $I'$  как бы отставал от верхнего луча  $I$  точно на половину длины волны. Тогда окажется, что в одном из лучей гребень, а в другом впадина волны всегда бегут рядом. Эти лучи накладываются друг на друга (*интерферируют*), и в данном случае их взаимодействие приводит к тому, что они гасят друг друга. То же самое происходит для всех других подобных пар лучей,



Р и с. 55. Дифракция света в случае простой щели.  
Пояснения см. в тексте.



Р и с. 56. Различимость изображений двух точек  $P_1$  и  $P_2$ .

которые распространяются от отверстия под тем же самым углом. Поэтому на соответствующем месте экрана получается темная полоса. Это так называемый *первый минимум*.

Теперь рассмотрим больший угол отклонения, который выберем так, чтобы взаимное смещение лучей 2 и 2' составляло как раз целую длину волны. Тогда интерференция приведет к взаимному усилению, так как теперь два гребня или соответственно две впадины волны в этих лучах всякий раз совпадают. На экране снова будет светлая полоса, правда, не такая светлая, как главный максимум, так как интенсивность лучей света с увеличением угла отклонения все более падает. Это — *максимум 1-го порядка* и т. д.

В результате получим следующую картину: по обе стороны от главного максимума возникает система темных и светлых интерференционных полос. При ширине щели  $d$  мы можем записать формулу, характеризующую

*положение первого минимума при дифракции от простой щели*

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} . \quad (56)$$

Эту формулу несложно вывести из геометрических соотношений, данных на рис. 55. Аналогичная картина получается, если отверстие круглое, как в пустой гильзе от зрительной трубы. Тогда возникает система концентрических интерференционных колец, которую не может устранить даже самая лучшая линза (рис. 56).

В интересах наглядности на рис. 55 и 56 действительные соотношения линейных размеров и углов сильно искажены. Чтобы интерференционные полосы (или кольца) возникали на достаточной площади, используемая щель (или круговая диафрагма) должны иметь очень малые размеры.

Расчет <sup>1)</sup> приводит нас к следующей формуле:

*Угловое расстояние первого минимума после прохождения луча через круглое отверстие*

$$\alpha = \frac{140''}{d} , \quad (57)$$

где  $d$  — диаметр отверстия в миллиметрах.

<sup>1)</sup> В случае круглого отверстия правая часть равенства (56) содержит еще коэффициент 1,22. Примем среднее значение длины

Итак, если свет приходит от двух различных точек, то на экране вместо изображения двух точек возникают две системы темных и светлых колец. Если точки лежат очень близко друг к другу, то эти кольцевые системы перекроют друг друга и превратятся в одну. Чтобы можно было различить изображения, они должны быть сдвинуты одно относительно другого настолько, чтобы вместо одного светлого пятна в главном максимуме образовалось два отдельных пятна. Минимальный сдвиг, при котором получается такая картина, будет тогда, когда первый минимум одной кольцевой системы попадет примерно на середину главного максимума другой, так как в этом случае образуются два светлых пятна, разделенных темной зоной.

Поэтому формула (57) дает в то же время минимальный угол, который должен быть заключен между лучами, исходящими из двух точек, чтобы эти точки можно было видеть раздельно. Чем больше диаметр отверстия  $d$ , через которое свет попадает в оптический прибор, тем ближе друг к другу могут лежать рассматриваемые точки. В этом и заключается сущность рассматриваемой проблемы:

*Разрешающая способность оптического прибора тем выше, чем больше диаметр его отверстия.*

В настоящее время диаметр отверстия более 1 м имеют только зеркальные телескопы. Самый большой современный телескоп обсерватории Маунт Паломар (Калифорния, США) имеет зеркало диаметром 5,1 м и с фокусным расстоянием 16,8 м. По формуле (57) его разрешающая способность  $\alpha = \frac{140''}{5100} = 0'',028$ .

волны видимого света  $\lambda = 550 \cdot 10^{-6}$  мм и предположим, что для весьма малых углов, о которых здесь идет речь,  $\sin \alpha$  равен углу  $\alpha$  в радианной мере. Тогда

$$\alpha \text{ (радианная мера)} = \frac{1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-6} \text{ мм}}{d}$$

или

$$\begin{aligned} \alpha \text{ (градусная мера)} &= \frac{1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-6} \text{ мм} \cdot 180^\circ}{d \cdot \pi} = \\ &= \frac{0^\circ,03845}{d} = \frac{140''}{d} . \end{aligned}$$

Нетрудно рассчитать, что этот телескоп позволяет различить на Луне две точки, наименьшее линейное расстояние  $a$  между которыми составляет  $52 \text{ м}^1$ ).

Человеческий глаз, как оптический прибор, тоже имеет ограниченную разрешающую способность. Ее можно оценить величиной  $\alpha = 120''$  или иногда  $140''$ . Задача телескопа состоит в том, чтобы увеличить угол, определяемый формулой (57), до данного значения угла  $\alpha$ . Следовательно, согласно формуле (55), должно быть

$$v = \frac{140''}{140''/d}. \text{ Отсюда получаем так называемое}$$

*полезное увеличение телескопа:*

$$v = d, \quad (58)$$

где  $d$  — диаметр объектива (мм).

Полезное увеличение телескопа на Маунт Паломар с диаметром зеркала  $d = 5,1 \text{ м}$  составляет, следовательно,  $v = 5100$ . Получаемые посредством этого телескопа изображения можно увеличить до любого формата. Но от этого число деталей в них не прибавится, снимки будут только выглядеть все более крупными и размытыми.

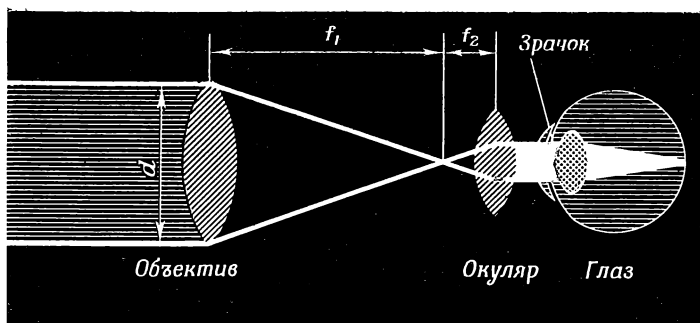
Невелика польза от дальнейшего увеличения растянутых объектов, составленных из многих видимых точек (как, скажем, поверхность планет, Луны или Солнца). Применяя соответствующий окуляр, можно делать изображение сколь угодно большим. Но число различных точек на каждой единице поверхности от этого больше не становится. Выигрывая в размерах, мы теряем в резкости изображения, и все дополнительные расходы практически затрачиваются впустую.

Когда рассматривают точечные объекты, как, например, звезды, выявляется другая сторона проблемы. Из-за своего ничтожного видимого диаметра звезды даже после самого сильного увеличения остаются только точками, которые предстают в виде дифракционных колец. В этом случае телескоп выполняет уже другую задачу. Он должен

---

<sup>1)</sup> Линейное расстояние между двумя точками при данном угле  $\alpha$ , согласно зависимости (51), равно  $a = r \cdot \alpha$ ; в данном случае  $r$  — расстояние до Луны, равное  $384\,400 \text{ км}$ , и  $\alpha = 0'', 028$ ; отсюда

$$a = \frac{3,844 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot 0,028 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} = 52 \text{ м}.$$



Р и с. 57. Нормальное увеличение: пучок лучей света, попадающий в объектив диаметра  $d$ , суживается до диаметра зрачка.

собрать возможно большее количество доходящего до нас света, а также сделать видимыми звезды, не различимые невооруженным глазом. Свет, собранный объективом, попадает через окуляр в зрачок нашего глаза.

На рис. 57 изображен поток параллельных лучей света, идущий от одной звезды. Он падает на объектив диаметром  $d$ . Телескоп собирает эти лучи и направляет их в зрачок глаза. Чтобы все лучи могли попасть в глаз, диаметр сконцентрированного пучка не должен быть больше диаметра зрачка. Ночью последний составляет около 8 мм. Из рис. 57 можно заключить, что диаметр объектива и зрачка должны находиться в том же отношении, что и фокусные расстояния  $f_1$  к  $f_2$ . Но это отношение, согласно формуле (55), равно увеличению  $v$  телескопа. Отсюда имеем формулу

$$v = \frac{\text{Диаметр объектива}}{\text{Диаметр зрачка}}.$$

Если подставить сюда диаметр зрачка 8 мм, то получим

*нормальное увеличение телескопа*

$$v = \frac{d}{8}, \quad (59)$$

где  $d$  — диаметр объектива в миллиметрах.

Это выглядит так, как если бы сильное увеличение и здесь не имело смысла; в самом деле, количество света,



попадающее в глаз, не станет больше, если световой пучок, созданный окуляром, делается еще тоньше. Однако здесь для нас важно то обстоятельство, что чем больше увеличение, тем темнее становится фон неба, а кроме того, появляются звезды, которые прежде нельзя было заметить.

При фотографировании неба условия проще, так как светочувствительная пластинка располагается непосредственно в фокальной плоскости объектива. Тогда, при прочих равных условиях, сила света зависит только от диаметра объектива. Так как свет падает на принимающую поверхность, сила света растет пропорционально квадрату диаметра объектива.

Кроме того, разрешающая сила телескопа сильно зависит от различных побочных обстоятельств, таких, как потери света в его оптической системе, неизбежные искажения получаемых изображений, помутнение атмосферы и колебания слоев воздуха, через которые проходят лучи от светил <sup>1)</sup>).

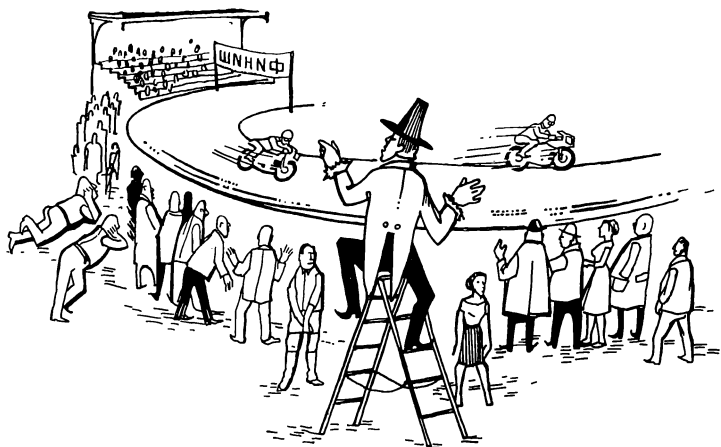
## Эффект Доплера

Мотоциклетные гонки привлекают всегда десятки тысяч зрителей из ближних и дальних мест. Плотной толпой окружают они асфальтированную дорогу, жадно вдыхая воздух, насыщенный запахом бензина и... сенсацией. Далекий шум моторов звучит музыкой для их ушей. А затем мимо зрителей в одиночку и группами проносятся сверкающие машины. На них, наклонившись вперед, сидят причудливые фигуры водителей. Мотоциклы видишь только считанные секунды, когда они проносятся мимо с такой скоростью, что едва успеваешь различить большие номера на них. Соперничество гонщиков и одновременно борьба человека с машиной — все это ослепляет толпу.

Хотя там присутствуют десятки тысяч зрителей, которые ясно слышат звук работающих моторов, найдется только несколько сотен человек, которые обратят внимание

---

<sup>1)</sup> Насколько беспокойство земной атмосферы мешает наблюдениям, видно хотя бы из того, что Паломарский телескоп теоретически (для острого глаза с  $\alpha < 60''$ ) может давать увеличение в 20 000 раз, но из-за влияния атмосферы увеличение больше чем в 3000 раз использовать не удастся. — *Прим. ред.*

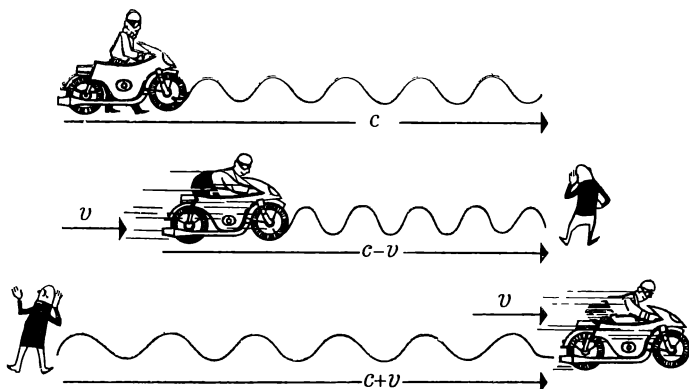


Р и с. 58. Речь Допплера на мотоциклетных гонках.

на одну особенность. И вряд ли отыщется хотя бы один, который задумается о том, что в этом оглушительном реве моторов можно обнаружить своеобразнейшее физическое явление. Машины приближаются к нам, издавая пронзительный звук, но в момент, когда они проносятся мимо, высокий тон внезапно переходит в низкий. Этот скачок по высоте тона составляет терцию или даже кварту. Мотор, равномерно поющий при своем неистовом вращении, имеет два голоса. С высоким звуком он несется на нас, с низким — уносится вдаль (рис. 58).

Если бы покойный пражский профессор математики Христиан Допплер (1803—1853) мог присутствовать при гонках, он определенно получил бы от этого огромную радость. Возможно, во время одного из перерывов, он, полный воодушевления, забрался бы на одну из стоящих кругом лестниц-стремянков и обратился к ошеломленным зрителям со следующей речью:

«Глубокоуважаемые дамы и господа! Шум, идущий от этих новомодных машин, есть не что иное, как частая последовательность уплотнений воздуха, образующихся в результате периодического выброса продуктов сгорания интенсивно работающими моторами. Число таких колебаний, происходящих в 1 сек, настолько велико, что мы слышим звук. Итак, закройте глаза и соблаговолите как



Р и с. 59. Эффект Доплера.

следует прислушаться! Этот звук имеет определенную частоту  $f$  соответственно числу оборотов двигателя. Колебания распространяются в воздухе и проходят в 1 сек определенное расстояние  $c$ , соответствующее скорости звука. Упомянутые уплотнения бегут в воздухе одно за другим, поэтому на отрезке  $c$  располагается  $f$  колебаний. Расстояние от одного уплотнения до следующего называется длиной волны. Из всего сказанного следует, что

*длина волны*

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (60)$$

Если эта огненная машина приближается к вам, глубокоуважаемые зрители, со скоростью  $v$ , то вы должны разместить  $f$  колебаний на более коротком отрезке  $c - v$ , так как скорость звука  $c$  не может изменяться (рис. 59). Тем самым звуковые волны становятся короче, и в ваши драгоценнейшие уши попадает больше колебаний, чем в том случае, когда машина стоит. Вместо звука с частотой  $f$  вы слышите более высокий звук. Пожалуйста, будьте добры, еще раз обратите на это внимание. То, что вы при этом слышите, ценнее, чем вся входная плата!

Итак, каждая волна становится короче на величину  $\Delta\lambda$ . Общее укорочение всех  $f$  волн составляет тогда

$f \cdot \Delta\lambda$  и равно отрезку  $v$ , на который сокращается весь проходимый звуковыми волнами путь. Это дает нам уравнение  $f \cdot \Delta\lambda = v$ . Теперь будьте любезны разделить обе его части на  $f$ . Если вы вспомните, что  $f = c/\lambda$ , то получите  $\Delta\lambda = \frac{v \cdot \lambda}{c}$  и отсюда

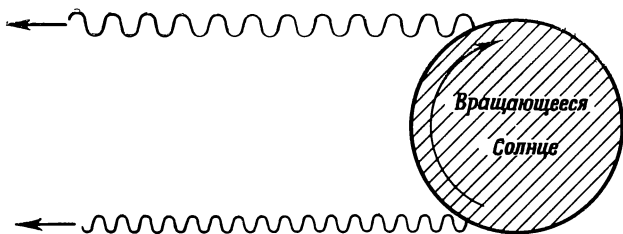
*относительное изменение длины волны*

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}. \quad (61)$$

Если машины удаляются от нас, все получается аналогично, только теперь волны соответственно растягиваются и величина  $\Delta\lambda$  в последнем уравнении означает в этом случае соответствующее увеличение длины волны. Как вы сами изволите совершенно отчетливо заметить, получается низкий звук. Подробнее вы можете прочесть об этом в моем сочинении «О цветном свете двойных звезд», вышедшем в Праге в 1842 г.»

Сам Допплер так и не узнал, какие замечательные последствия имело его открытие. Оно создало абсолютно новые возможности определения «лучевой» скорости небесных тел, т. е. скорости, с которой они удаляются или приближаются к Земле. Уравнение (61) годится также и для светового излучения, которое, подобно звуку, представляет собой волновое явление. Нахождение скорости  $v$  сводится к измерению величины  $\Delta\lambda$  — изменения длины волны определенной линии спектра. Какого эффекта можно достичь этим способом, полностью зависит от того, в состоянии ли применяемый спектроскоп измерить эту весьма малую величину. Разрешающая способность очень хорошего призмного спектрографа достигает  $\lambda/\Delta\lambda = 50000$ . С дифракционной решеткой, для развития и совершенствования которой так много сделал Фраунгофер, можно достичь значения 200 000, а в интерференционных спектрографах — даже 4 000 000.

В качестве примера возьмем вращение Солнца, о существовании которого можно заключить по движению солнечных пятен. Очень мощная линия Фраунгофера H, которая принадлежит кальцию, имеет длину волны  $\lambda = 396,8475$  нм (нм — сокращенное обозначение нанометра, т. е. одной стомиллионной части метра. — *Перев.*). Измерения на одном крае солнечного диска дают  $\lambda$  несколько больше, а именно, 396,8500 нм, а на противоположном,



Р и с. 60. Эффект Доплера на краях вращающегося Солнца.

наоборот, только  $396,8450 \text{ нм}$  (рис. 60). Поэтому  $\Delta\lambda = 0,0025 \text{ нм}$ . Отсюда по уравнению (61) получаем линейную скорость вращения на поверхности Солнца

$$v = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda} = \frac{0,0025 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}}{396,8475} = 1890 \text{ м/сек.}$$

Простой расчет <sup>1)</sup> дает нам период вращения 26,8 суток.

Таким же методом определяют орбитальные скорости двойных звезд, о которых мы уже упоминали на стр. 102. Если смотреть на плоскость их орбиты с ребра, то одна из звезд приближается к наблюдателю, в то время как другая удаляется. Сдвиг линий, одинаковый для обеих звезд, имеет максимальное значение тогда, когда их расхождение максимально. Очень часто расстояние между членами системы настолько мало, что в телескоп они видны, как одна звезда. В этом случае получают также и единый спектр. Оба сдвига линии  $\Delta\lambda$ , которые должны происходить в противоположных направлениях, в этом спектре проявляются одновременно, спектральные линии периодически удваиваются, и по этому признаку можно обнаружить, что речь идет о **д в у х** звездах, которые обращаются вокруг общего центра масс.

Такие системы, которые могут быть обнаружены только благодаря эффекту Доплера, уловимому при помощи спектрографа, носят название *спектрально-двойных звезд*.

---

<sup>1)</sup> Период вращения  $T = \frac{2\pi r}{v}$ . Для радиуса Солнца  $r = 6,96 \cdot 10^8 \text{ м}$  и только что рассчитанной скорости вращения  $v$  получаем

$$T = \frac{2\pi \cdot 6,96 \cdot 10^8 \text{ м}}{1890 \text{ м/сек}} = 2,314 \cdot 10^6 \text{ сек} = 26,8 \text{ суток.}$$

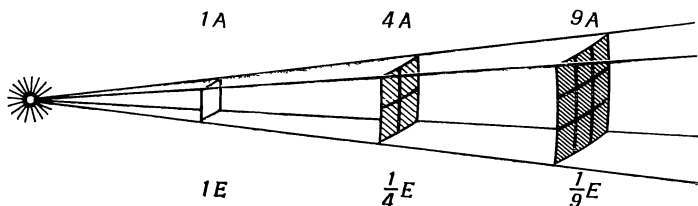
# ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД

## Солнечное излучение

Звезды — довольно неблагоприятные объекты для глаза и телескопа. Они всегда остаются только точками: любая из них так же мала, как и остальные. Однако эти точки таят в себе много тайн. Мы были бы к ним очень несправедливы, если бы захотели сравнить их с точками в геометрии. Нет, звезды мигают и светят так, что смотреть на них — истинное наслаждение. Они группируются в причудливые фигуры, которым люди когда-то дали фантастические имена. И светят они по-разному: одни ярко, другие почти совсем незаметно.

Но если отбросить лирику и посмотреть на вещи просто, то каждая звезда является источником света, так сказать, лампой, которая светит во все стороны равномерно. К сожалению, нельзя так же просто, как для обычной электрической лампочки, установить, насколько сильно излучает данная звезда. На лампочке написана величина ее мощности, т. е. сколько ватт она потребляет. Правда, обычная лампочка дает ничтожное количество видимого света по сравнению с потребляемой электроэнергией, но это нас в общем мало беспокоит, так как, во-первых, мы к этому привыкли, а, во-вторых, электрическая энергия недорого. Лампочка накаливания излучает потребляемую ею энергию преимущественно в виде тепла.

Под *мощностью излучения*  $P$  звезды мы понимаем всю энергию, которую она излучает в единицу времени. Этот суммарный поток энергии складывается из электромагнитного излучения различных длин волн, т. е. из инфракрасных, видимых и ультрафиолетовых лучей. При точечном источнике излучения энергия распространяется равномерно по всем направлениям. Если вырезать узкий сектор, то он будет представлять собой конус лучей, который все больше расширяется с увеличением расстоя-

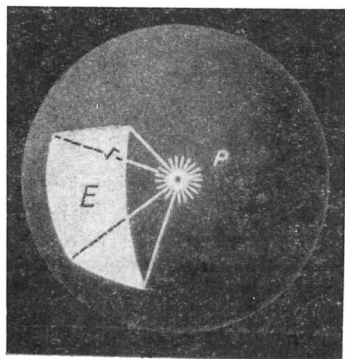


Р и с. 61. Уменьшение освещенности с ростом расстояния.

ния  $r$  (рис. 61). Площадь освещаемой лучами поверхности в этом конусе увеличивается пропорционально квадрату расстояния и поток лучистой энергии, распространяющийся внутри конуса, распределяется поэтому по все большей площади. Световой поток, падающий на единицу площади, т. е. освещенность  $E$ , становится все меньше.

*Освещенность поверхности, создаваемая точечным источником, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния поверхности от источника.*

Чтобы эту зависимость между мощностью излучения и освещенностью выразить в виде формулы, опишем мысленно вокруг источника излучения сферическую поверхность радиуса  $r$  (рис. 62). Пусть она имеет площадь  $A = 4\pi r^2$  и воспринимает всю мощность излучения  $P$ . Лучистая энергия, получаемая единицей этой поверх-



Р и с. 62. Мощность излучения  $P$  и освещенность  $E$ .

ности в единицу времени, т. е. освещенность

$$E = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}.$$

Эта формула сразу дает нам возможность рассчитать мощность излучения звезды, если известна освещенность.

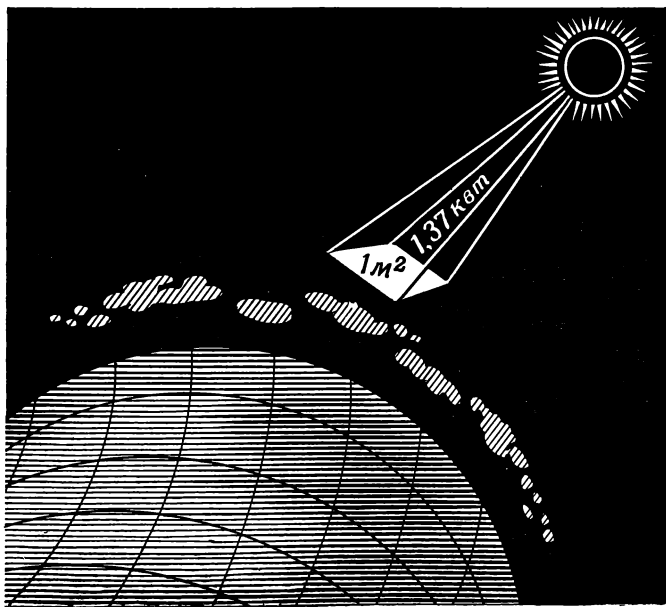
*Мощность излучения*

$$P = E \cdot A = 4\pi r^2 \cdot E. \quad (62)$$

Проще всего можно определить мощность излучения Солнца. Поверхность Земли освещена Солнцем довольно хорошо. В летний день эта освещенность бывает особенно сильной. Чтобы ее измерить, в принципе достаточен термометр, который ставят в сосуд с водой, нагреваемый Солнцем. После введения поправки на долю тепла, поглощаемую атмосферой, получается

*солнечная постоянная* (на границе земной атмосферы)

$$E = 1,37 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2. \quad (63)$$



Р и с. 63. Солнечная постоянная.



Вот какое количество энергии поступает в единицу времени на  $1 \text{ м}^2$  при отвесном падении солнечных лучей. Надо радоваться тому, как щедро относится к нам Солнце, посылая почти полтора киловатта на один квадратный метр (рис. 63). В случае облаков и плохой погоды оно в конце концов ни при чем. По отношению ко всему земному шару эта мощность соответственно суммируется. Если бы вся поверхность Земли была покрыта слоем льда толщиной 30 м, то получаемой мощности светового потока было бы достаточно, чтобы растопить весь этот лед в течение года!

Однако это количество энергии ничтожно мало по сравнению с тем, которое Солнце излучает в мировое пространство. Полную мощность излучения нашего дневного светила можно рассчитать, если снова вообразить окружающую Солнце сферическую поверхность, радиус которой  $r$  равен расстоянию до Земли. Площадь этой поверхности, умноженная на солнечную постоянную, дает нам полную мощность излучения

$$P = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ вт!}^1)$$

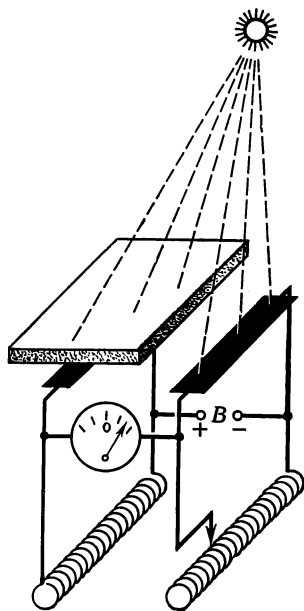
### Приборы для измерения излучения

Если обычного термометра достаточно, чтобы оценить излучение Солнца, то для измерения ничтожной интенсивности излучения звезд нужны гораздо более чувствительные приборы. Для более точного исследования солнечного спектра простой термометр тоже слишком груб, и его надо заменить приемником излучения, в котором самое незначительное изменение температуры чувствительного элемента приводит к появлению электрического тока.

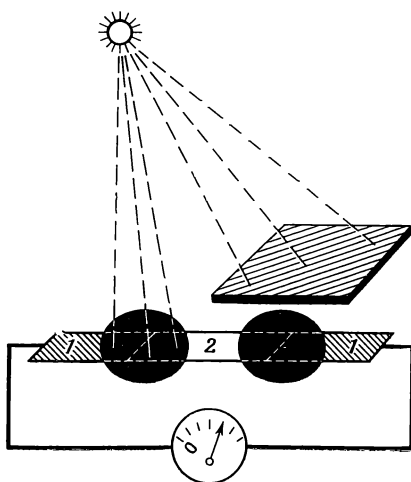
Одним из таких приборов является *болометр*. Его основной элемент состоит из двух чрезвычайно тонких зачерненных платиновых пластинок (рис. 64). Они образуют два плеча мостика Уитстона. Одна пластинка защищена от излучения, а на другую падает собранный телескопом свет звезды. Поглощенное излучение вызывает небольшое повышение температуры освещенной пластинки и как

---

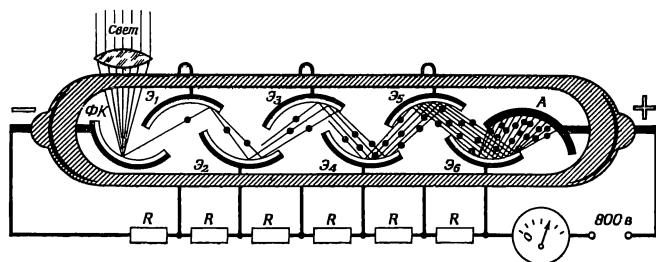
<sup>1)</sup> Зная расстояние от Земли до Солнца, равное  $149,6 \cdot 10^6 \text{ км}$ , можно рассчитать  $P = E \cdot 4\pi r^2 = 1,37 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 1,496^2 \times 10^{22} \text{ м}^2 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ вт}$ .



Р и с. 64. Принцип работы болометра.



Р и с. 65. Принцип работы термопары.



Р и с. 66. Принцип работы фотоэлектронного умножителя.

следствие этого увеличение электрического сопротивления этого плеча, включенного в схему моста. Прибор, изображенный на рис. 64, при отсутствии падающего на него излучения обесточен, так как мост при обоих равных сопротивлениях уравновешен. Схема питается от источника тока, подсоединенного в точке *В*. Для определения освещенности *E* пластинки болометра точно измеряется ток, идущий через пластинку в том случае, когда стрелка прибора показывает такое же отклонение, как и под влиянием излучения звезд. Сила этого тока позволяет рассчитать освещенность.

По другому принципу работают *термопары*. Здесь спаяны, сварены или еще как-нибудь соединены друг с другом две проволоочки из различных металлов (например, из железа и константана). Они подключены к токоизмерительному прибору. Если место спайки нагревается, то в цепи течет электрический ток, сила которого является непосредственной мерой температуры. Укрепленная на месте спайки зачерненная пластинка воспринимает излучение, собранное телескопом (рис. 65). Чтобы на измерения не влияли случайные колебания температуры окружающей среды, два таких элемента включают последовательно (как и показано на рис. 65), а излучение небесного светила направляют только на один. Такие термоэлементы, помещенные в вакуум, способны фиксировать мощность излучения, равную  $0,3 \cdot 10^{-9}$  вт.

Но самым чувствительным прибором является фотоэлемент с подключенным к нему усилителем. Существует прибор, который представляет собой как бы объединение фотоэлемента с усилителем — *фотоэлектронный умножитель*. По схеме на рис. 66 свет попадает из

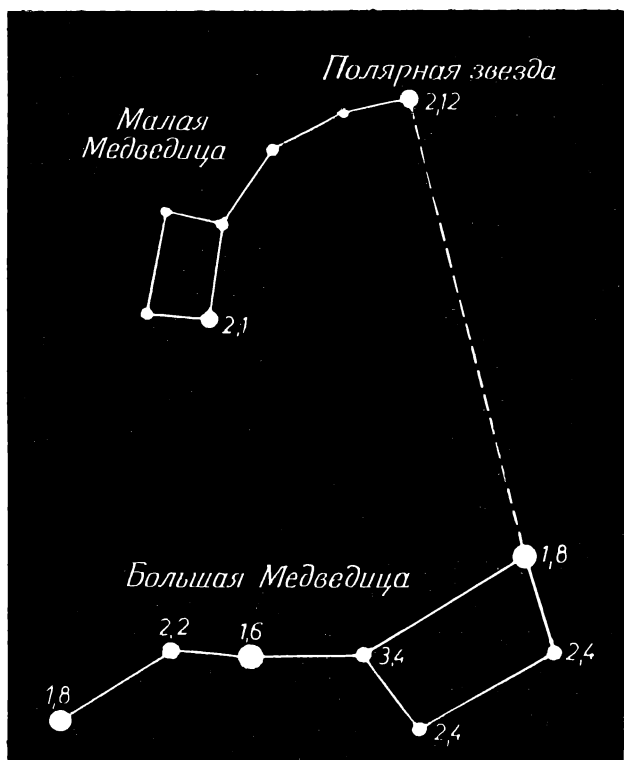
телескопа на фотокатод  $\Phi K$ . Он покрыт специально приготовленным слоем (для видимой части спектра этот слой состоит в основном из щелочных металлов), из которого свет выбивает электроны. Они ускоряются в электрическом поле, попадают на анод  $A$  и дают ток, который пропорционален интенсивности облучения. Так как этот ток в обычном случае был бы слишком слаб, электроны, вылетающие из катода один за другим, направляются на целый ряд вторичных электродов  $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_6$ . При попадании на такой электрод каждый электрон выбивает из его поверхности примерно пять новых электронов. Поэтому число электронов повышается при использовании двух вторичных электродов в  $5^2$  раз. В случае девяти электродов число выбитых электронов возрастает в  $5^9$  раз, благодаря чему достигается усиление более чем в миллион раз.

### Видимый блеск звезд

В древние времена излучение звезд оценивали иначе и гораздо проще, чем теперь. О блеске звезды судили по тому, как ее воспринимает невооруженный человеческий глаз. При этом возник обычай распределять все необозримое море звезд по *звездным величинам*.

«Звездная величина», разумеется, не имеет ничего общего с фактическими размерами звезды, так как все звезды представляются нам в виде светящихся точек. Здесь имеют в виду то зрительное впечатление блеска, которое получает глаз при сравнении звезд. С очень давних времен было установлено шесть классов звезд. Самые яркие звезды, видимые невооруженным глазом, называются звездами 1-й величины, самые слабые, которые только можно различить, отнесены к звездам 6-й величины. Звезд, непосредственно доступных глазу, на небе не так уж много. Если у вас есть время, вы можете их пересчитать. На всем небосводе наберется тогда не более 3000 звезд.

Чтобы получить первое представление о шкале звездных величин, рассмотрим знакомое всем созвездие Большой Медведицы (рис. 67). На рисунке рядом со звездами написаны их звездные величины, причем более точные, с дробными значениями. Разумеется, большие или меньшие точки на этом рисунке соответствуют блеску звезд чисто символически. В астрономии обычно применяется



Р и с. 67. Видимые величины звезд Большой Медведицы и Малой Медведицы.

запись  $2^m,4$  и т. п., которая означает звезду, *видимая величина* которой равна 2,4.

Так как упразднение этой старой классификации звезд наделало бы много путаницы, ее сохранили до настоящего времени, несколько усовершенствовав. Видимую звездную величину обозначают буквой *m* от первой буквы латинского слова «*magnitudo*», т. е. величина. Впрочем, при сравнении по блеску эта величина сильно зависит от применяемого способа измерения. Если основываться на чувствительности человеческого глаза, то получается *визуальная звездная величина*. Если же применяется приемник излучения, который воспринимает в с е излучение звезды, то получают *болометрическую звездную*

величину. Во многих случаях оба способа дают заметное различие. В последующем мы будем оперировать только болометрической звездной величиной.

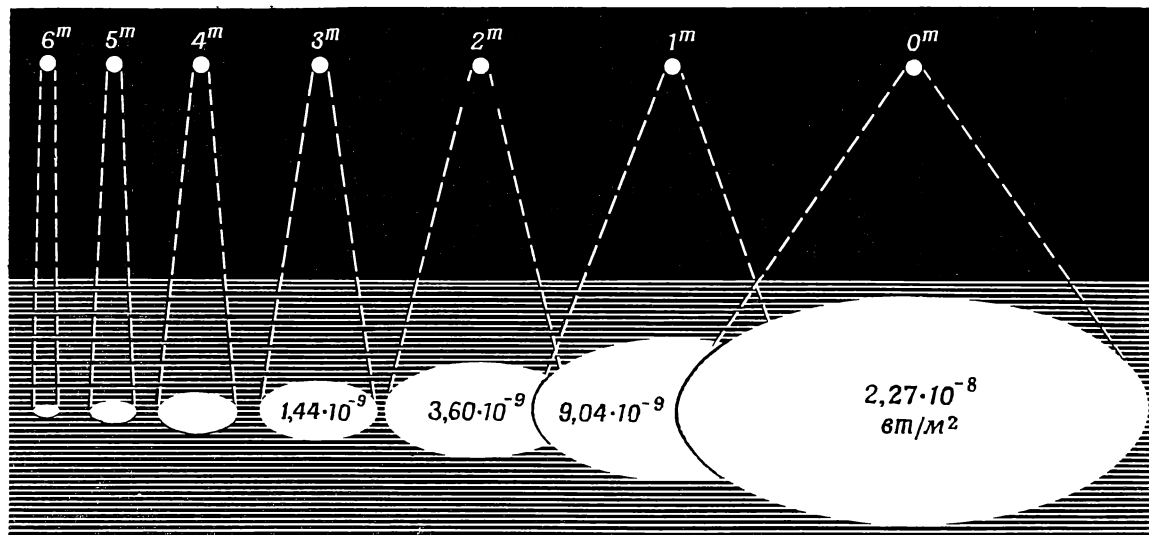
Подобный приемник излучения измеряет совсем другую величину, не всегда соответствующую нашему ощущению света. Он полностью объективно и независимо от нашего личного впечатления регистрирует освещенность  $E$ , которая, как мы помним, выражается в  $вт/м^2$ . Наш глаз работает совсем по другому принципу, чем используемые в лаборатории приемники излучения. Зрительное восприятие отнюдь не пропорционально суммарному физическому воздействию излучения. Итак, 1) освещенность  $E$ , замеренная при помощи физических приборов, и 2) видимая величина  $m$  звезды (понятие, известное науке с давних времен) — это две совершенно самостоятельные характеристики.

Однако они связаны между собой зависимостью, которая, впрочем, годится и для ощущений другого рода:

*когда интенсивности меняются в геометрической прогрессии, восприятия их меняются в арифметической прогрессии.*

Исследование традиционной шкалы блеска показывает, что при переходе от одного класса звездных величин к следующему, низшему (соответствующему более яркой звезде) освещенность  $E$  возрастает в  $10^{0,4} \approx 2,512$  раз. Наоборот, если величина становится на один класс выше, освещенность уменьшается примерно в 2,5 раза (рис. 68). Представим эту зависимость в виде таблицы относительных освещенностей, приняв за 1 освещенность, соответствующую звездам 6-й величины:

Видимая звездная величина $m$	6	5	4	3	2	1
Относительная освещенность $E$	1	2,512	2,512 <sup>2</sup>	2,512 <sup>3</sup>	2,512 <sup>4</sup>	2,512 <sup>5</sup>



Р и с. 68. Освещенность  $E$ , соответствующая видимой звездной величине от 6 до 0.  
Площадь каждого круга в 2,5 раза больше площади предыдущего.

Из этого двойного числового ряда можно без труда вывести

*отношение освещенностей от двух звезд*

$$\frac{E_2}{E_1} = 2,512^{(m_1 - m_2)} = 10^{0,4(m_1 - m_2)}. \quad (64)$$

Отсюда после логарифмирования <sup>1)</sup> получается

*разность видимых величин двух звезд*

$$m_1 - m_2 = 2,5 \lg \frac{E_2}{E_1}. \quad (65)$$

Это соотношение позволяет нам свободно и неограниченно расширить традиционную шкалу звездных величин в обе стороны. Звездам, блеск которых слабее, чем звезд класса  $6^m$ , в 2,512 раза и т. д., мы припишем звездную величину 7,  $8^m$  и далее. При помощи самых мощных телескопов сегодня можно обнаружить звезды до  $23^m$ . И наоборот, звезды, блеск которых в 2,5 раза сильнее, чем у звезд величины  $1^m$ , относятся к классу  $0^m$ . Еще более яркие звезды получают отрицательные звездные величины. Нуль-пунктом для всей шкалы является Полярная звезда, величина которой была принята равной  $2^m,12$  <sup>2)</sup>.

Освещенность, создаваемая любой рядовой звездой, как и следовало ожидать, чрезвычайно низка. Звезда величины  $0^m$  дает на верхней границе атмосферы весьма малую освещенность  $E = 2,27 \cdot 10^{-8}$  вт/м<sup>2</sup>. Сравните ее с уже упомянутой на стр. 119 солнечной постоянной. Видимая звездная величина светящего Солнца, конечно, должна иметь очень большое отрицательное значение. По формуле (65) находим это значение:  $-26^m,95$  <sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> В равенстве (64) логарифмируем левую и правую части

$$\lg \frac{E_2}{E_1} = 0,4(m_1 - m_2) = \frac{m_1 - m_2}{2,5}.$$

<sup>2)</sup> Недавно выяснилось, что блеск Полярной звезды испытывает небольшие колебания, и потому за эталон звездных величин ее брать нельзя. Сейчас в качестве стандарта звездных величин используют так называемый «Северный Полярный Ряд» — несколько десятков звезд близ северного полюса неба с очень точно определенными звездными величинами. — *Прим. ред.*

<sup>3)</sup> Сравнивая освещенности, получаемые от Солнца (солечную постоянную) и от звезды величины  $0^m$ , пишем:  $0 - m_C = 2,5 \lg \frac{1,37 \cdot 10^3}{2,27 \cdot 10^{-8}} = 2,5 \cdot \lg 6,04 \cdot 10^{10}$ , откуда  $m_C = -26,95$ .



## Абсолютный блеск звезд

Если задуматься о причине различия блеска звезд, то прежде всего можно предположить, что оно объясняется их неодинаковой удаленностью от Земли. Чем дальше звезда от нас, тем слабее она светит. Но если бы мы согласились со средневековыми представлениями о космосе и считали, что звезды — это блестящие гвоздики на твердом небесном своде, тогда расстояния до всех звезд были бы одинаковыми, и причина была бы только в различии их действительного блеска. Итак, если мы хотим знать действительный блеск звезд, в первую очередь надо как-то исключить влияние их удаленности. Для этого мысленно относят все звезды на одно и то же расстояние в 10 *пс* (32,6 св. лет).

Освещенность, которую мы получаем от объекта, расположенного на расстоянии 10 *пс* от Земли, повысится в 100 раз (стр. 119) при уменьшении расстояния до 1 *пс*. Если расстояние, выраженное в парсеках, составляет не 1, а *r пс*, то освещенность уменьшится в  $r^2$  раз. Отношение освещенностей будет равно  $\frac{E_2}{E_1} = \frac{100}{r^2}$ . Подставив это выражение в формулу (65), мы вместо  $m_1$  получим абсолютную величину  $M$  звезды, которая в нашем случае на расстоянии *r* (расстояние звезды от Земли) дает освещенность  $E_1$ . Следовательно, мы можем записать:

$$M - m = 2,5 \lg \frac{10^2}{r^2} = 2,5 (2 - 2 \lg r) = 5 - 5 \lg r.$$

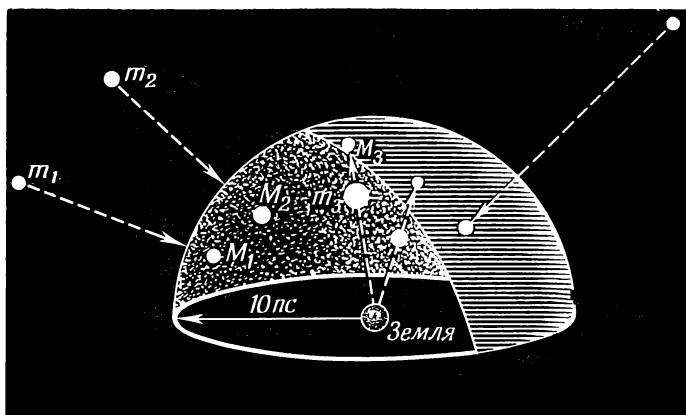
Отсюда получается

*абсолютная звездная величина звезды, удаленной от нас на расстояние r (в парсеках)*

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (66)$$

Только при помощи этого числа  $M$  можно действительно сравнивать блеск различных звезд. Оно позволяет как бы поместить звезды одну возле другой на полушарие радиуса 10 *пс* (рис. 69).

При такой постановке вопроса Солнце оказывается лишь одной из звезд среди себе подобных. Вся красота и величие нашего центрального светила сокращается



Р и с. 69. Видимая и абсолютная звездные величины.

до звездочки величины  $+4^m,62$ <sup>1)</sup>). Наше глубокое уважение к нему уменьшается точно в такой же степени.

Сириус, о котором мы уже упоминали на стр. 63, самая яркая звезда ночного неба, тоже много теряет в своем блеске, если его рассматривать с взятого за норму расстояния 10 *пс*. Видимая величина Сириуса составляет  $-1^m,43$ , а расстояние до него 2,7 *пс*. По формуле (66) находим его абсолютную величину

$$M = -1,43 + 5 - \lg 2,7 = +1,41.$$

Итак, если мы хотим определить абсолютную величину  $M$  звезды, нам обязательно надо знать расстояние  $r$  до нее. Это требование можно было бы обойти, если бы был найден *независимый* способ определения истинного блеска звезд. Располагая независимо определенной абсолютной величиной, мы могли бы посредством зависимости между  $M$  и  $r$  вычислять куда более далекие расстояния, чем это позволяет делать тригонометрический метод, который ограничен пределом в 100 св. лет.

### Пульсирующие звезды

Такая возможность отыскилась самым неожиданным образом, когда американка мисс Ливитт, сотрудница

<sup>1)</sup> Для Солнца  $r = 149,6 \cdot 10^6$  км  $= 4,85 \cdot 10^{-6}$  *пс*, и формула (66) дает  $M = -26,95 + 5 - 5 \lg 4,85 \cdot 10^{-6} = +4,62$ .

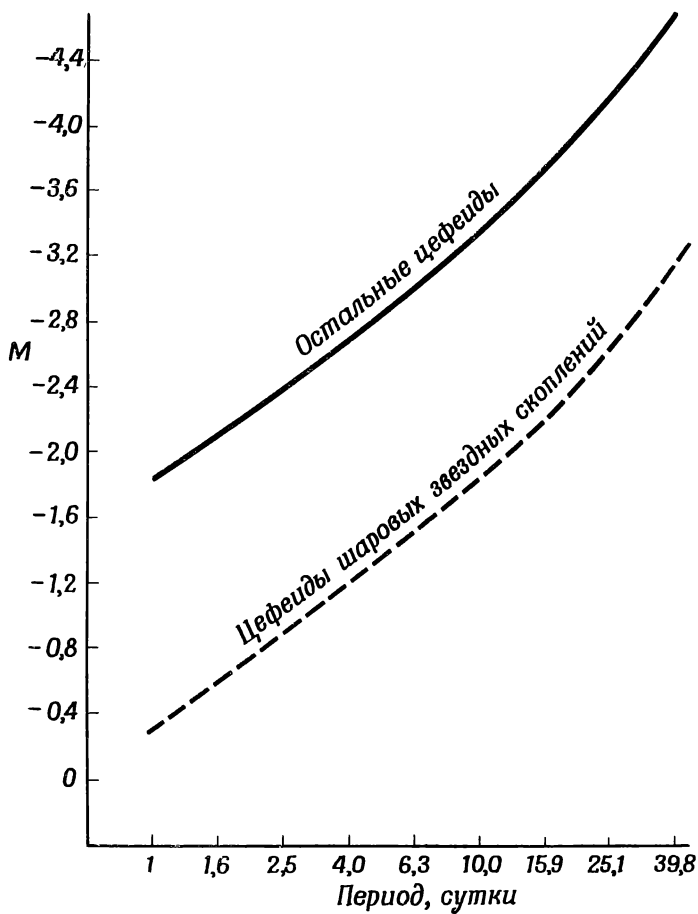
Гарвардской обсерватории, открыла в 1912 г. метод определения расстояния по *цефеидам*. Существует определенный тип звезд, разбросанных по всей Вселенной, блеск которых строго периодически то падает, то возрастает. Типичным представителем таких звезд является  $\delta$  Цефея, поэтому эти переменные звезды называют «цефеидами». Переменность блеска цефеид вызывается периодическими пульсациями звезды, но причины, вызывающие эти пульсации, пока неясны. Видимо, дело заключается в периодически возникающей неустойчивости в выделении энергии в недрах этих звезд (стр. 173).

Изучая звезды Магеллановых Облаков <sup>1)</sup>, расположенные практически на одинаковом удалении от Земли, Ливитт обнаружила, что продолжительность периода изменения блеска звезды находится в определенной зависимости от абсолютной звездной величины  $M$  <sup>2)</sup>. Эту зависимость можно представить графически (рис. 70). При равных периодах две цефеиды имеют одинаковые значения  $M$ . Если для какой-нибудь из таких звезд можно измерить действительное расстояние при помощи тригонометрического метода, то, пользуясь соотношением периодов, найдем расстояние до всех остальных цефеид, как бы далеко они ни находились. Здесь открывается замечательная возможность составить шкалу расстояний, годную для всех областей космоса. Все сказанное можно проиллюстрировать на простом примере. Пусть расстояние до одной из звезд такого рода определено тригонометрическим способом и составляет 35 св. лет, а период изменения блеска равен 4 суткам. Допустим, что другая звезда имеет точно такой же период, но кажется слабее

---

<sup>1)</sup> Здесь речь идет о двух гигантских звездных системах, находящихся вне Галактики; вместе с последней они образуют тройную систему.

<sup>2)</sup> На самом деле Ливитт обнаружила связь видимого блеска цефеид Магеллановых Облаков с их периодами: чем ярче цефеида, тем реже она «мигает». Но, поскольку звезды Магеллановых Облаков удалены от Земли практически на одно и то же расстояние (размеры облаков — несколько тысяч световых лет, а удалены они от Галактики примерно на 100 тыс. св. лет), различия в их видимом блеске точно соответствуют разнице их действительного блеска. Правда, Магеллановы Облака так далеки от нас, что задача определения абсолютной величины хотя бы одной цефеиды столь трудна, что решить ее удалось далеко не сразу; это привело к необходимости пересмотра шкалы внегалактических расстояний, о чем автор рассказывает немного дальше. — *Прим. ред.*



Р и с. 70. Продолжительность периода и абсолютная величина  $M$  цефеид (шкала исправлена по Бааде, 1956 г.).

на 10 звездных величин. Так как продолжительность периодов одинакова, значения  $M$  у обеих звезд должны быть тоже одинаковыми, и различие в видимом блеске может объясняться только различием расстояний. Так как видимый блеск отличается на  $m_1 - m_2 = 10$ , отношение соответствующих освещенностей должно быть равно  $\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4 \cdot 10} = 10\,000 : 1$ . Поскольку причина этого различия заключается только в неодинаковых расстояниях, а освещенность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния, вторая звезда должна находиться в 100 раз дальше, чем первая. Следовательно, она удалена на  $35 \cdot 100 = 3500$  св. лет.

Согласно графику на рис. 70, обе звезды в соответствии с одинаковой продолжительностью их периодов в 4 суток имеют одну и ту же абсолютную звездную величину  $-2^m,7$ . Если любая другая звезда имеет период 10 суток и видимую звездную величину  $+1^m,6$ , то ее абсолютная звездная величина должна быть равна  $-3^m,4$ . Тогда мы можем по формуле (66) рассчитать удаление этой звезды от нас:

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5} = 2,$$

откуда  $r = 100$  пс.

Этот метод можно применять до расстояний в 50 млн. св. лет; он непригоден только для таких расстояний, на которых уже нельзя различить отдельные звезды этого типа.

В 1952 г. вступил в строй 5-метровый телескоп обсерватории Маунт Паломар. Наблюдения на нем показали, что определение расстояний по методу цефеид приводит к систематическим погрешностям. Стало необходимо еще раз проверить связь между абсолютной величиной и периодом цефеид. В результате выяснилось, что все сделанные до сих пор расчеты расстояний до объектов, расположенных вне Галактики, необходимо исправить: на самом деле эти объекты находятся от нас вдвое дальше, чем мы предполагали раньше. Теперь вы видите, как кропотлива и сложна работа по определению расстояний до космических объектов, находящихся вне Галактики.

### Светимость и масса

Физическая причина отличия звезд друг от друга по абсолютному блеску состоит в неодинаковой мощности

их излучения (стр. 128). Закон, связывающий эти две величины, должен по виду совпадать с формулой (65). Она содержит отношение  $\frac{E_2}{E_1}$ , вместо которого теперь надо подставить другое отношение,  $\frac{P_2}{P_1}$ . Однако мощность излучения  $P$  звезд выражается очень громоздкими числами. Поэтому для упрощения расчетов мощность излучения Солнца принимают за 1, а для всех остальных звезд берут их светимость  $L$ . Светимость звезды  $L$  — это мощность ее излучения  $P$ , взятая по отношению к Солнцу. Поэтому из формулы (65) получается аналогичное соотношение, представляющее

*разность абсолютных величин двух звезд*

$$M_1 - M_2 = 2,5 \lg \frac{L_2}{L_1}. \quad (67)$$

Если подставить сюда светимость Солнца  $L_1 = 1$  и его абсолютную величину, рассчитанную на стр. 129,  $M_1 = +4^m,62$ , то сразу же получается

*абсолютная величина звезды*

$$M = M_1 - 2,5 \lg L = 4,62 - 2,5 \lg L. \quad (68)$$

Отсюда можно легко рассчитать светимость звезды, если известна ее абсолютная величина. Например, мы установили, что у Сириуса  $M = +1^m,41$  (стр. 129). Отсюда получаем

$$\lg L = \frac{4,62 - 1,41}{2,5} = 1,284 \text{ и } L = 19.$$

Это означает, что мощность излучения  $P$  у Сириуса в 19 раз больше, чем у Солнца. Тем самым предположение, что существуют звезды с более мощным излучением, чем Солнце, можно считать доказанным. Есть даже такие звезды, светимость которых превышает светимость Солнца в 100 000 раз.

Разумеется, различная светимость звезд может объясняться разными причинами. Если допустить, что звезды имеют одинаковый химический состав и равную темпера-

туру, то можно предположить, что мощность излучения должна зависеть от массы звезды. При таких условиях теория дает нам

*соотношение масса — светимость*

$$L = M^{3,5}, \quad (69)$$

причем  $M$  означает здесь массу звезды, если за единицу принята масса Солнца <sup>1)</sup>. Если мы применим это соотношение для Сириуса, светимость которого  $L = 19$  мы только что рассчитали, то получим

$$M = \sqrt[3,5]{19} = 2,33 \text{ массы Солнца (рис. 71).}$$

### Температура звезд

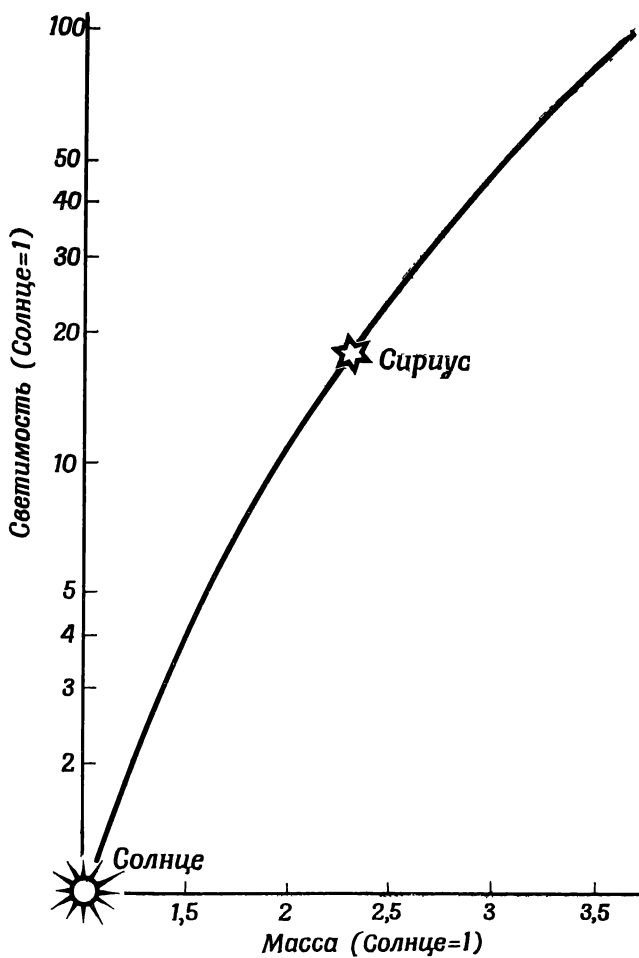
Во Вселенной разбросано бесчисленное множество солнц, подобных нашему. Светимость одних намного больше светимости Солнца, других — намного меньше. Из всех них лишь одно находится достаточно близко, чтобы мы могли воспользоваться его теплом. Остальные — по крайней мере с нашей точки зрения — расточают свою энергию в окружающее пространство, абсолютно не заботясь о том, приносит она кому-нибудь пользу или нет. Однако в нашем мире существуют еще меньшие по размерам солнца, которые тем не менее очень полезны. Они изготавливаются на фабрике, и их можно по недорогой цене купить в любом универмаге. А дома достаточно вставить штепсель в розетку и миниатюрное солнышко приятно согреет замерзшие ноги или опухшую щеку. Такая электрическая лампа-грелка хотя и не так горяча, как ее старший родственник — Солнце, но имеет с ним кое-что общее, а именно мощность ее излучения удовлетворяет одному и тому же закону.

*Закон Стефана — Больцмана:*

$$\text{Мощность излучения } P = \sigma \cdot AT^4. \quad (70)$$

---

<sup>1)</sup> Соотношение масса — светимость является не абсолютно точным, а приблизительным. Наиболее сильные отклонения получаются для белых карликов (стр. 139), фактическая светимость которых отличается от полученной по формуле (69) примерно в 100 раз.



Р и с. 71. Соотношение масса — светимость.



Если подставить постоянную  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ вт/м}^2 \times \times \text{град}^4$ , площадь поверхности  $A$  излучаемого тела в  $\text{м}^2$  и абсолютную температуру  $T$  в градусах Кельвина, то получим мощность излучения в ваттах (рис. 72).

Этот закон и особенно постоянная  $\sigma$  соответствуют только *абсолютно черному телу*. Такое тело имеет свойство поглощать *все* лучи, падающие на его поверхность. В холодном состоянии оно кажется очень черным, как сажа или как мышиная нора.

По сравнению со всеми остальными телами оно также и излучает максимальное количество энергии.

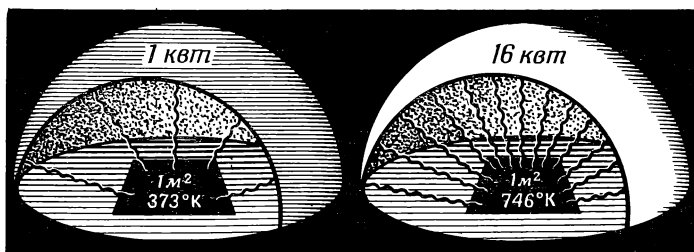
Закон Стефана — Больцмана говорит о суммарном количестве энергии излучения, но умалчивает о том, из чего это излучение состоит. А оно представляет собой непрерывный спектр электромагнитных волн. Если при помощи чувствительного приемника излучения исследовать отдельные участки длин волн, то можно определить, что энергия излучения имеет характерное распределение на различных участках. Получается кривая (рис. 73) с ярко выраженным максимумом, соответствующим определенной длине волны. Чем выше температура излучающего тела, тем выше и острее будет максимум кривой. Площадь под этой кривой становится все больше, так как излучаемая мощность быстро растет с повышением температуры.

Если сделать временное допущение, что звезды подчиняются этому закону, то можно легко рассчитать их температуру, когда известна площадь их поверхности  $A$  и мощность излучения  $P$ . Мощность излучения Солнца мы уже определили (стр. 120), она равна  $P = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ вт}$ . Его диаметр составляет  $d = 1,392 \cdot 10^9 \text{ м}$ . Тогда формула (70) дает нам так называемую *эффективную температуру* Солнца  $5785^\circ \text{ К}$  <sup>1)</sup>.

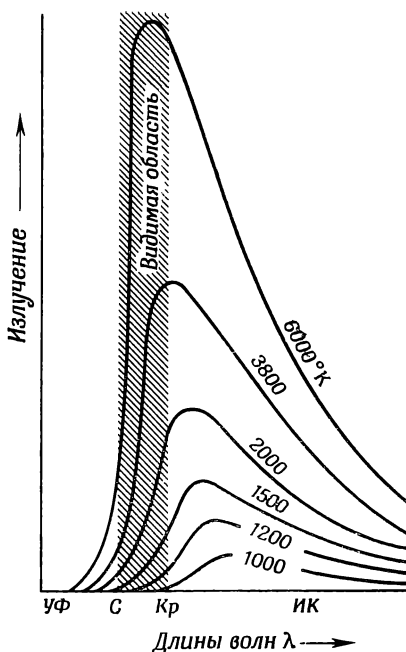
Так как пользование законом Стефана — Больцмана предусматривает знание площади поверхности звезды и тем самым ее радиуса  $r$ , то этот способ применим только для немногих близких звезд, для которых мы можем

<sup>1)</sup> После подстановки соответствующих числовых значений в (70) получаем

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma \pi d^2}} = \sqrt[4]{\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}^4 \cdot \pi \cdot 1,392^2 \cdot 10^{18} \text{ м}^2}} = 5785^\circ \text{ К}.$$



Р и с. 72. Закон Стефана — Больцмана: при увеличении абсолютной температуры вдвое мощность излучения абсолютно черного тела повышается в  $2^4 = 16$  раз.



Р и с. 73. Кривые излучения абсолютно черного тела.

определить требуемые величины. Кроме того, не надо забывать еще и о том, что этот закон полностью применим только к абсолютно черному телу и, следовательно, не вполне точен для звезд. Тем не менее эффективная температура — важная характеристика звезды. Для многих звезд она лежит между 3000 и 50 000° К. Абсолютная величина звезды  $M$ , как и мощность излучения, должна зависеть от ее температуры и диаметра. Закон Стефана — Больцмана можно легко скомбинировать с формулой (68). После соответствующих преобразований <sup>1)</sup> получается

*абсолютная болометрическая величина звезды*

$$M = 4,62 - 10 \lg T - 5 \lg d. \quad (71)$$

Здесь температура Солнца  $T_c = 1$  и диаметр Солнца  $d_c = 1$ .

Чтобы проверить, какой результат нам дает это новое соотношение, вернемся еще раз к спутнику Сириуса (стр. 63 и 133). Так как мы уже оценили общую массу системы Сириуса в 3,35 и массу главной звезды в 2,35 масс Солнца, масса спутника получается равной  $3,35 - 2,35 = 1$  массе Солнца. Вызывает удивление тот факт, что этот все же очень массивный спутник Сириуса имеет видимую величину только  $+8^m,6$  и едва различим в телескоп. Поэтому он должен иметь очень малые размеры. Чтобы рассчитать его диаметр, нам надо знать только его абсолютную величину. По формуле (66) она оказывается равной  $M = +11,4$  <sup>2)</sup>. Если принять далее температуру Сириуса  $T$  равной температуре Солнца, то член  $10 \cdot \lg T$  в равенстве (71) будет равен 0, так как  $T = 1$  и  $\lg 1 = 0$ . Для диаметра  $d$  получаем

$$\lg d = \frac{4,62 - 11,4}{5} = 0,64 - 2$$

и  $d = 0,044$  диаметра Солнца.

<sup>1)</sup> Так как светимости звезд относятся так же, как и их мощности излучения, подставим в (67) вместо  $L_2$  мощность излучения звезды  $P_2 = T_2^4 \sigma \pi d_2^2$  и вместо  $L_1$  — мощность излучения Солнца  $P_1 = 14 \cdot \sigma \pi \cdot 1^2$  (его температура и диаметр равны 1). Отсюда отношение в (67) равно  $L_2/L_1 = T_2^4 \cdot d_2^2$ . Из (68) тогда получаем

$$M = 4,62 - 2,5 \lg T^4 d^2 = 4,62 - 10 \lg T - 5 \lg d.$$

<sup>2)</sup> Для расстояния 2,7 *пс* (стр. 129) получаем  $M = 8,6 + 5 - 5 \lg 2,7 = 8,6 + 5 - 2,2 = 11,4$ .

Отсюда легко найти плотность Сириуса В. Плотность Солнца равна  $1,41 \text{ г/см}^3$ , и для Сириуса В мы получаем  $\frac{1,41}{0,0448} = 16\,500 \text{ г/см}^3$ . Это в 2000 раз больше плотности железа!

Поэтому Сириус В представляет собой исключительно интересный объект для изучения. Это так называемый *белый карлик*. Замечательно, что существуют и такие белые карлики, плотность которых составляет несколько сотен килограммов на  $\text{см}^3$ !

### Цвет звезд

Если мы еще раз внимательно посмотрим на рис. 73, то нам бросится в глаза, что максимум излучения с ростом температуры все более смещается в сторону коротких длин волн. При  $6000^\circ \text{К}$  максимум излучения находится в видимой части спектра. Это как раз соответствует нашему Солнцу, которое заливает светом нашу Землю. Вы можете предположить, что здесь счастливое совпадение. Однако дело обстоит как раз наоборот: человеческий глаз наилучшим образом приспособился к максимуму солнечного излучения. Гете выразил эту мысль следующими прекрасными словами:

Когда б не солнечным был глаз,  
Как Солнце мог бы он увидеть?

Для абсолютно черного тела длина волны, излучаемая наиболее интенсивно, зависит только от его температуры. *Максимум излучения абсолютно черного тела* определяется простым законом. Это

*закон смещения Вина:*

$$\lambda_{\max} = \frac{0,289}{T} \text{ см.} \quad (72)$$

Для Солнца  $\lambda_{\max} = 500 \cdot 10^{-7} \text{ см}^1$ ), и светочувствительные палочки, находящиеся в сетчатке глаза, особенно восприимчивы именно к этой длине волны.

---

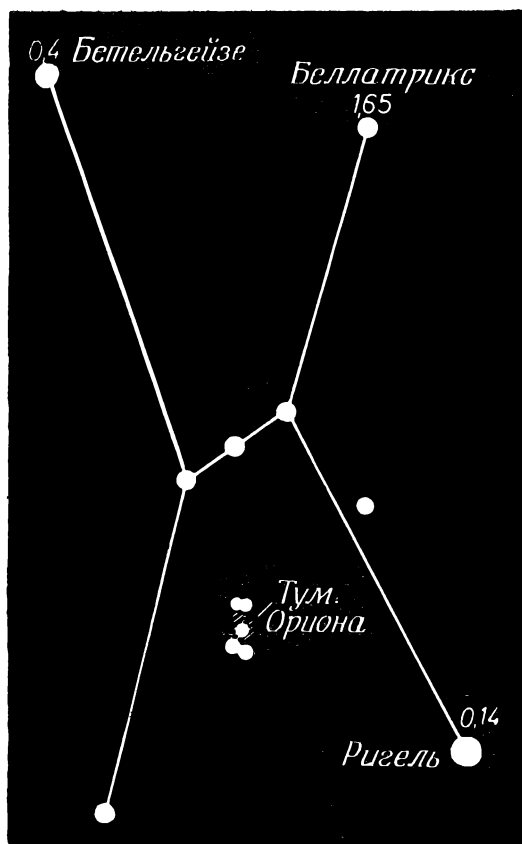
<sup>1)</sup> Зная эффективную температуру Солнца (стр. 136)  $5785^\circ \text{К}$ , получаем  $\lambda_{\max} = \frac{0,289 \text{ см}}{5785} = 500 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$

Отсюда открывается второй путь определения температуры звезд. Получают спектр излучения этой звезды, при помощи высокочувствительного приемника излучения исследуют этот спектр и отыскивают в нем участок, на котором мощность излучения наибольшая. Такой анализ приносит ощутимые результаты только при изучении очень ярких звезд. Поэтому нашли еще один, уже третий, метод определения температур, который основывается на цвете звезды.

В зависимости от положения максимума излучения каждая звезда имеет свой цвет. Цвет звезд плохо различим человеческим глазом, так как чувствительные к цвету колбочки в сетчатке глаза начинают «работать» только при достаточно большой освещенности. Но если сфотографировать ночное небо на цветную пленку, то снимок поражает богатством красок: от густо-красного и светло-желтого до ярко-голубого. Невооруженным же глазом различие в цвете можно обнаружить только у немногих объектов, как, например, у некоторых звезд в прекрасном созвездии Ориона (рис. 74). Приглядевшись, можно заметить, что звезда Бетельгейзе, расположенная слева сверху, окрашена в красноватый цвет, а лежащая справа внизу звезда Ригель — в голубой. Солнце кажется нам чисто белым. В сравнении с ним абсолютно черное тело более низкой температуры светится желтоватым светом. С дальнейшим понижением температуры его окраска станет оранжевой, затем красной, так как максимум излучения переместится в область более длинных волн.

Метод оценки температуры по этой шкале был бы, очевидно, слишком грубым. Кроме того, сравнение с соответствующим цветом раскаленного абсолютно черного тела приводило бы к неправильным результатам, так как излучение звезд может довольно сильно отличаться от излучения абсолютно черного тела. Поэтому во многих случаях можно определить только так называемую цветовую температуру.

Объясним это при помощи рис. 75. На нем показан ряд кривых излучения для абсолютно черного тела и такая же кривая для нечерного тела — некоторой звезды. Площадь под последней кривой заштрихована. Мы видим, что эта кривая приблизительно совпадает на участке между двумя длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с кривой, соответст-



Р и с. 74. Созвездие Ориона.

вующей излучению абсолютно черного тела при температуре  $3000^{\circ}\text{K}$ . Тогда говорят, что звезда имеет в этой области цветовую температуру  $3000^{\circ}\text{K}$ . Отсюда видно, что цветовая температура нечерного тела — это такая температура, при которой абсолютно черное тело на участке между двумя длинами волн имеет ту же мощность излучения, что и исследуемое тело.

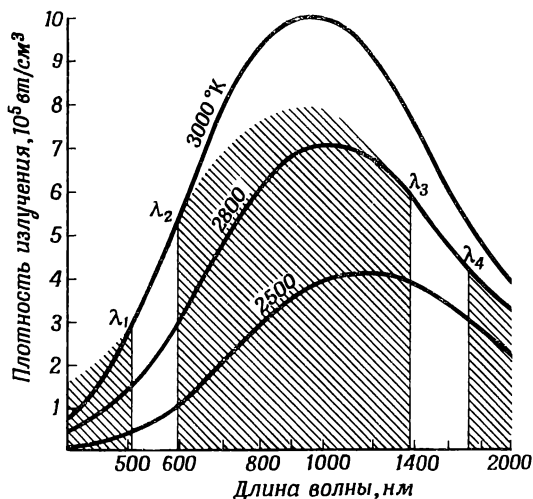
Рассматривая кривую для нашей звезды в ее правой части, видим, что между длинами волн  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  цветовая температура составляет только  $2800^{\circ}\text{K}$ . Итак, величина

цветовой температуры зависит от того, какой участок длин волн взят для сравнения. Например, для Солнца получаем следующие значения:

цветовая температура в области  $300\text{--}400\text{ нм} = 4850^\circ\text{ К}$   
 цветовая температура в области  $410\text{--}950\text{ нм} = 7140^\circ\text{ К}$   
 эффективная температура (стр. 136)  $= 5785^\circ\text{ К}$ .

Приведенные цифры наглядно показывают, что излучение Солнца заметно отличается от излучения абсолютно черного тела. Мы еще раз убедились, с какими трудностями связано определение температуры звезд.

Вместо того чтобы измерять две точные длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для звезд, поступают несколько по-иному. Выбирают два диапазона спектра, которые лежат возможно ближе друг к другу. Затем фотографируют звезду на обычную пластинку, т. е. чувствительную к голубому цвету, а затем, во второй раз, на такую пластинку, которая в сочетании с желтым фильтром по возможности точно соответствует цветовой чувствительности человеческого глаза. В первом случае получается выраженная в звездных величинах *фотографическая величина*  $m_{\text{фот}}$  и во



Р и с. 75. Кривая излучения не абсолютно черного тела. Цветовая температура тела между длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равна  $3000^\circ\text{ К}$ , а в диапазоне между  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  составляет  $2800^\circ\text{ К}$ .

втором — *фотовизуальная величина*  $m_{\text{фвиз}}$ . Разность между двумя этими величинами называют *показателем цвета* соответствующей звезды.

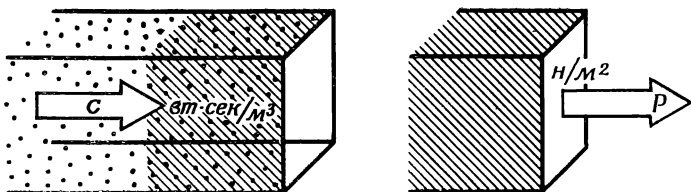
Таким же образом получают показатель цвета для абсолютно черного тела, измеряя распределение его яркости в этих двух диапазонах длин волн и представляя графически логарифм этого красно-голубого соотношения для ряда температур. Получается почти линейная зависимость. На этой эталонной кривой находят ту точку, которая соответствует показателю цвета звезды и получают, таким образом, цветовую температуру.

### Давление света

Человек испытывает уважение к силам природы только тогда, когда они ему неприятны. Пока ветер дует не очень сильно, он в самом худшем случае мешает кататься на велосипеде или вызывает простуду. Надо подняться урагану, чтобы люди подумали о том, какая энергия скрыта в движении воздуха. При этом молекулы, из которых состоит воздух, настолько малы и легки, что ни одни весы не почувствуют их веса. А кванты света несравненно быстрее, чем самый грозный ураган. Излучаемые Солнцем, они устремляются на нас со скоростью 300 000 км/сек. Но они не валят нас с ног. Масса световых квантов настолько мала, что только искусно поставленный эксперимент позволил измерить давление, которое они оказывают. Измерить *давление света* при помощи хитроумной аппаратуры впервые удалось П. Н. Лебедеву в 1900 г.

Рассмотрим некоторые понятия и зависимости. Представим себе поверхность площадью в  $1 \text{ м}^2$ , на которую в  $1 \text{ сек}$  попадает определенное количество лучистой энергии. Это уже известная нам освещенность  $E$ , которую можно измерить в  $\text{вт}/\text{м}^2$ . Предположим теперь, что эта поверхность совершенно черная, так что она поглощает без остатка все падающие на нее лучи (рис. 76). Так как излучение пробегает свой путь со скоростью света  $c$ , кубик объемом в  $1 \text{ м}^3$ , находящийся перед этой поверхностью, получает в каждый момент количество энергии  $E/c$ . В выбранных нами единицах измерения это дает *плотность энергии* в  $\frac{\text{вт}/\text{м}^2}{\text{м}/\text{сек}}$ , т. е.  $\frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{м}^3}$ . Известно, что





Р и с. 76. К расчету давления света.

$1 \text{ вт} \cdot \text{сек} = 1 \text{ н} \cdot \text{м}$  (ньютон-метру), так что можно записать эту плотность в  $\text{н} \cdot \text{м} / \text{м}^3$ . Но это не что иное, как  $\text{н} / \text{м}^2$ , т. е. сила, отнесенная к единице площади, иными словами, давление. Оно равно плотности энергии, и отсюда получаем

*давление излучения на черную поверхность*

$$p = \frac{E}{c}. \quad (73)$$

Чтобы рассчитать величину давления солнечного света надо только подставить значение солнечной постоянной, и получим величину около  $0,45 \text{ мГ} / \text{м}^2$ <sup>1)</sup>. Если пересчитать это давление на целый гектар, то получим силу  $4,5 \text{ Г}$ . Действительно, трудноато изобрести производственный процесс, где давление света могло бы играть практическую роль.

А теперь мы пойдем по обратному пути и рассмотрим действие давления света на очень маленький шарик, имеющий массу  $m$ , который находится в поле тяготения какой-нибудь звезды, например Солнца. Сила, с которой давление света действует на шарик, равна произведению  $p \cdot A$ , т. е. она пропорциональна поперечному сечению  $A = \pi r^2$ . Сила тяготения равна  $mg$ , а масса  $m$  в свою очередь пропорциональна объему шарика  $\frac{4\pi r^3}{3}$ . Если мы теперь разделим радиус пополам, то сила светового давления умень-

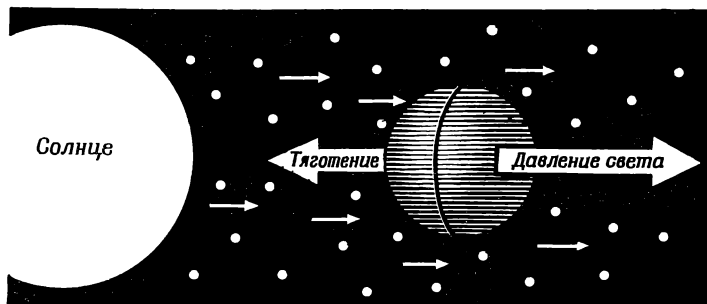
<sup>1)</sup> Для солнечной постоянной (стр. 119)  $E = 1,37 \cdot 10^3 \text{ вт} / \text{м}^2$  по формуле (73) получаем

$$p = \frac{1,37 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{м} / \text{сек} \cdot \text{м}^2}{3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{сек}} = 0,44 \cdot 10^{-5} \text{ н} / \text{м}^2 = 0,45 \text{ мГ} / \text{м}^2.$$

шится до  $1/4$ , а сила тяготения — до  $1/8$  своих первоначальных значений. В случае уменьшения радиуса до  $\frac{r}{10}$  получаются соответственно доли:  $\frac{1}{100}$  и  $\frac{1}{1000}$ . Нетрудно понять, что при делении на все меньшие по размеру частицы должен существовать шарик, для которого действие излучения сильнее действия тяготения. Такая частичка будет не притягиваться к светилу, а отталкиваться от него (рис. 77).

Английский астроном Эддингтон развил эти рассуждения в широкую теорию и пришел к поразительному результату. Звезды, подобные Солнцу, но масса которых больше  $10^{32}$  кг, не могут существовать из-за светового давления, которое становится слишком большим. Тяготение не сможет удерживать вещество, разбегающееся во все стороны. Солнце, имеющее массу  $2 \cdot 10^{30}$  кг, еще сохраняет себя, как целое светило. Давление света на его поверхности около  $20 \text{ Г/м}^2$ . Самые большие звезды, которые до сих пор обнаружены, имеют массу, в 60 раз превышающую массу Солнца. Это, видимо, крайняя граница, которую может достичь масса небесного светила. Подобно деревьям, звезды тоже не могут расти до бесконечности.

Световое давление обнаруживается также и в других явлениях. Отчетливей всего это можно наблюдать у комет, хвост которых всегда направлен в сторону от Солнца. Как предполагал еще Кеплер, причиной этого является давление солнечных лучей, которое отрывает



Р и с. 77. Тяготение и давление света.



Р и с. 78. Комета Аренда — Роланда 1956 г.

частички от ядра кометы и отбрасывает в виде газа в космическое пространство (рис. 78).

Таким образом, замкнулась цепь наших рассуждений — от видимой величины звезд до определения их расстояний, температур, масс и диаметров. Все эти вопросы больше касаются внешней физической картины звездного мира. Мы еще совсем не говорили о том, из чего же состоят звезды. Если бы звездное вещество находилось в том же состоянии, в каком мы встречаем его на Земле, то этот вопрос относился бы к химии. Но физические предпосылки для существования материи в космическом пространстве совсем иные. Вещество космических объектов по большей части пребывает в таком состоянии, которое недоступно ни одному химику.

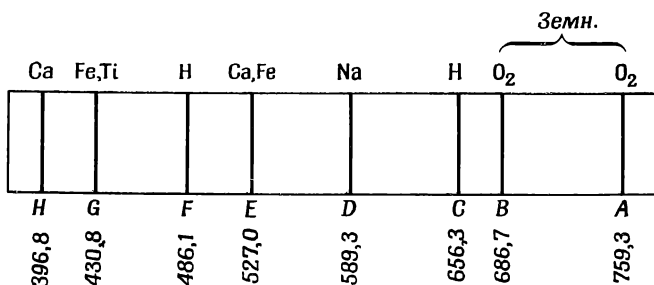
# ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВЕЗД

## Спектры звезд

В 1801 г. в Мюнхене обвалился дом, принадлежавший владельцу зеркальной и стекольной мастерской. Под обломками дома был погребен четырнадцатилетний ученик мастера Йозеф Фраунгофер. Только чудом он остался невредим. Один богач, тронутый судьбой бедного сироты, подарил ему книги и убедил короля дать мальчику некоторую сумму денег. Фраунгофер, который должен был своему хозяину за обучение, употребил одну часть подаренных денег на то, чтобы внести плату, а другую — на приобретение машины для шлифовки стекла. Но его надежды работать самостоятельно не сбылись, и ему не оставалось ничего другого, как вернуться на старую работу. Только через несколько лет он устроился работать подмастерьем в большую оптическую мастерскую, а позже основал здесь же ставшее знаменитым производство оптических приборов. На его могиле высечена надпись: «*Aproximavit sidera*» («Он приблизил к нам звезды»).

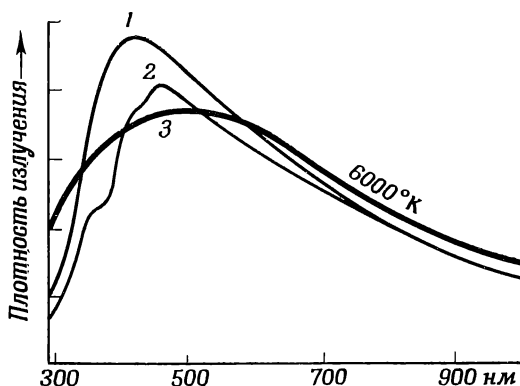
Фраунгофер выплавлял оптическое стекло исключительно высокого качества, изготавливал непревзойденные ахроматические линзы и телескопы, по размерам превосходившие все существовавшие ранее. Именно эти телескопы впервые дали возможность определить параллакс звезд.

Но в науке имя Фраунгофера прежде всего связано с открытием большого числа темных линий в спектре Солнца, которые были исследованы им при помощи превосходных линз, отшлифованных им собственноручно. Наиболее резкие из этих линий он обозначил буквами от А до К. Эти обозначения сохранились до наших дней (рис. 79). Позже он обнаружил эти же самые линии посредством изготовленных им дифракционных решеток. Его лучшая решетка имела 300 штрихов на 1 мм. Эти штрихи были нанесены на стекло при помощи тонкого алмазного острья.



Р и с. 79. Положение наиболее резких фFraунгофeровых линий в видимом участке спектра Солнца.

Под линиями указаны соответствующие длины волн в нм.



Р и с. 80. Распределение энергии по участкам спектра Солнца.

1 — кривая излучения Солнца без учета поглощения в линиях Фраунгофера; 2 — та же кривая с учетом этого поглощения; 3 — кривая излучения абсолютного черного тела при 6000° К.

В настоящее время установлено, что каждой из открытых Фраунгофером линий соответствует определенная длина волны. Непрерывный спектр излучения поверхности Солнца как бы просеивается, проходя через солнечную атмосферу. Каждая такая линия поглощения (или серия линий) однозначно свидетельствует о наличии в атмосфере той или иной звезды определенных химических элементов. К настоящему времени в спектре Солнца обнаружено 20 000 линий, и принадлежность большей их части различным элементам уже установлена. Они так многочисленны, что значительно изменяют распределение энергии в спектре солнечного излучения (рис. 80). На Солнце «опознаны» свыше 60 элементов.

Чтобы лучше понять появление в спектре фраунгоферовых линий, полезно немного подробнее рассмотреть теорию их возникновения. Механизм этого процесса легче всего изучить на примере атома водорода.

Согласно модели атома Бора, электрон, обращающийся вокруг ядра, как правило, находится в устойчивом состоянии, т. е. на ближайшей к ядру орбите. Если электрон получит извне энергию, он «перепрыгивает» на орбиту, более удаленную от ядра, поглощая при этом соответствующее количество энергии. Продолжительность такого «возмущенного» состояния чрезвычайно коротка, ибо электрон почти тотчас же возвращается в исходное состояние, отдавая при этом то количество энергии, которое он до того поглотил. Эта отдача происходит путем излучения кванта света.

При этом электрон перемещается скачками с орбиты на орбиту, как будто спускается по лестнице. Иногда он может перепрыгивать сразу через несколько ступенек. Каждому такому «скачку» соответствует излучение одного кванта света.

Количество возможностей для подобных скачков очень велико, но их можно сгруппировать по отдельным *сериям* (группам спектральных линий.— *Ред.*). Так, все «прыжки», которые заканчиваются на второй от электрона орбите, дают линии, принадлежащие к так называемой *серии Бальмера*. Линии этой серии лежат в видимой области спектра. Именно они дают ту картину, которую можно наблюдать, глядя через простой спектроскоп на светящуюся трубку, наполненную водородом. Все эти приборы имеются в любом школьном физическом кабинете.

В горячей атмосфере звезд бóльшая часть атомов водорода с самого начала находится в возбужденном состоянии из-за поглощения тепловой энергии. В зависимости от температуры имеются атомы, у которых электроны находятся на втором или даже на еще более высоких уровнях. Такой электрон может поглощать только то количество энергии, которое поднимает его с этой орбиты на еще более высокую. Именно поэтому из непрерывного излучения с поверхности звезды постоянно изымаются кванты точно таких же энергий, и в спектре появляются темные линии в тех местах, где уменьшается число квантов соответствующих длин волн.

В конце концов при поглощении достаточно большой порции энергии атом становится ионизованным. Такой атом уже не может поглощать энергию в определенных длинах волн (в линиях). Отсюда следует первое правило: чем выше эффективная температура звезды, тем сильнее возбуждены атомы ее атмосферы и тем беднее линиями ее спектр. И наоборот, при низкой температуре отдельные атомы, соединяясь, могут даже образовывать молекулы. Поэтому в спектрах более холодных звезд, кроме обычных линий поглощения, принадлежащих элементам, появляются линии поглощения, соответствующие окислам титана, углерода, циану и другим простейшим химическим соединениям.

Еще одно обстоятельство затрудняет истолкование линий спектра. Это — влияние ускорения силы тяжести. Оно меняет давление в атмосфере звезды, а это в свою очередь меняет степень возбуждения и ионизации атомов. Классифицировать все многообразие звездных спектров, понять их «язык» и извлечь из них возможно больше сведений — это само по себе целая наука. О том, какое количество кропотливой работы здесь еще надо затратить, могут свидетельствовать две цифры. Первый список линий, составленный Фраунгофером, включал 567 линий солнечного спектра, а современный каталог Генри Дрепера содержит спектры 225 300 звезд.

## Химические элементы во Вселенной

Спектральному анализу мы обязаны тем, что знаем о химическом составе Вселенной больше, чем о нашей собственной Земле. Мы изучили только очень тонкий слой

земного шара, химический состав которого отнюдь не является типичным для всего космического пространства. Скорее наоборот. Насыщенность земной коры и недр Земли тяжелыми элементами обусловлена особыми, специфическими условиями в процессе образования планет. Если же поставить вопрос, из чего состоит мир в целом, то ответ оказывается очень простым.

Мир в целом состоит из таких же точно элементов, с которыми мы уже знакомы по Земле. Сколько ни ищи, нигде в мире нет других элементов, кроме тех, которые вписаны в знаменитую периодическую систему Менделеева. Нигде во Вселенной нет какого-либо таинственного чужеродного элемента — этот вывод не только отрезвляет, но и успокаивает. Спектральный анализ доказывает нам, что мир, вплоть до отдаленнейших уголков, состоит из единой материи. Но это не все. Количественные соотношения отдельных элементов также примерно одни и те же во всем космическом пространстве!

Исследование звезд различных типов дало следующие результаты:

**Относительное содержание элементов  
во Вселенной**  
(относительное число атомов и процентная доля  
в общей массе)

Порядковый номер	Элемент	Число ато- мов	%
1	H	100 000	56,2
2	He	18 000	40,4
6	C	25	0,17
7	N	54	0,43
8	O	98	0,88
10	Ne	115	1,30
11	Na	0,23	0,003
12	Mg	6,2	0,85
13	Al	0,38	0,006
14	Si	5,6	0,088
20	Ca	0,30	0,007
26	Fe	9,3	0,29
16	S	1,5	0,027



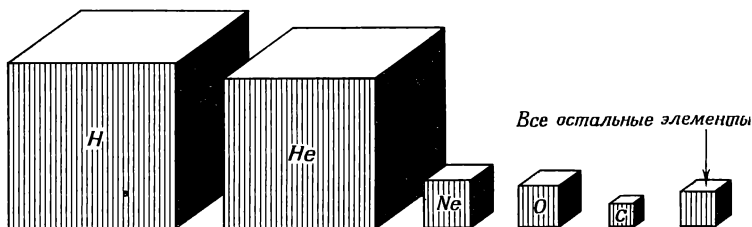
Как видно из таблицы, свыше 80% всех атомов Вселенной составляют атомы водорода (рис. 81). Среди атомов всех прочих элементов они самые легкие и самые простые. При обычных условиях, т. е. при низких температурах, привычных для нас, эти атомы не существуют поодиночке. Они объединяются по два и образуют молекулу, которую мы обозначаем химическим символом  $H_2$ . Соединяясь с атомами кислорода, они могут образовать молекулы воды  $H_2O$  — великого эликсира всей органической жизни.

Но на звездах водород никогда не соединяется с кислородом, так как химическое соединение  $H_2O$  вообще не может существовать при тех температурах, которые там господствуют. В атмосфере звезд и тем более внутри звезд все вещества находятся в гораздо более простом состоянии.

Как мы уже видели, благодаря поглощению тепловой энергии все атомы в таких условиях более или менее возбуждены и частично ионизованы. Возникает смесь нейтральных атомов газа, положительных ионов и электронов. Хотя электрические заряды при этом разобщены в пространстве, они должны полностью компенсировать друг друга, так что в целом вся масса электрически нейтральна.

Такой квазинейтральный газ имеет настолько необычные свойства, что даже начали говорить о «четвертом состоянии» вещества — *плазме*.

На Земле мы встречаемся с плазмой не так уж часто, например в электрической дуге или в лампах дневного света. Но в космических масштабах плазма не какое-нибудь особое исключение, а обычное состояние вещества.



Р и с. 81. Относительное содержание химических элементов во Вселенной по массам.

## Масса и энергия

Еще до начала этого столетия как энергии, так и массе тела приписывали полностью самостоятельное существование. Тело может поглощать энергию и снова отдавать ее. Энергия может миллионы лет покоиться в земле, скрытая в пластах каменного угля или нефти, и может в виде излучения пролетать пустое пространство со скоростью света. Форму энергии можно изменить: из калорий делают киловатт-часы, из киловатт-часов — килограмм-метры. С энергией обращаются как с товаром. Одно лишь невозможно: создать энергию из ничего или полностью уничтожить ее.

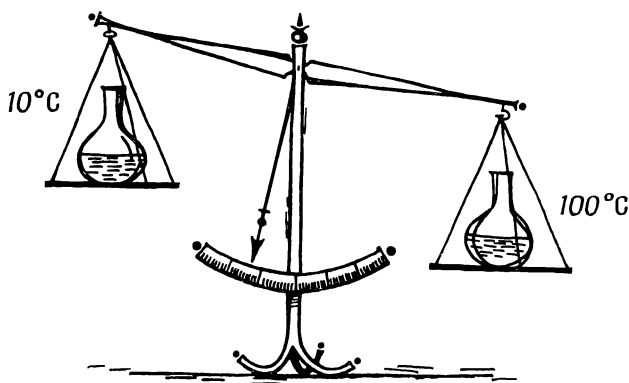
Но если этот закон *сохранения энергии* понимать поверхностно, то мы оказались бы перед очень трудной проблемой. Попробуйте объяснить, откуда берется та энергия, которую излучают звезды! Уже по меньшей мере миллиард лет Солнце светит с неослабевающей силой. Об этом свидетельствуют находимые в древних осадочных горных породах остатки живых существ, которые могли существовать только при постоянном излучении Солнца. Исследуя процесс распада радиоактивных элементов и судя по количеству продуктов распада, которые накапливаются в содержащих их породах, можно рассчитать, что с момента возникновения твердой земной коры должно было пройти 3—5 млрд. лет. Так как Земля не могла существовать раньше Солнца, оно должно иметь по меньшей мере тот же возраст.

Но если, зная температуру и теплоемкость Солнца, рассчитать скорость его остывания, то, судя по колоссальной интенсивности его излучения, оно уже давно должно было погаснуть. Для объяснения большой продолжительности его существования пытались привлечь потоки падающих на Солнце метеорных тел или энергию тяготения, освобождающуюся при сжатии Солнца, но все это оказалось напрасным.

Правильное объяснение можно получить только на основе теории относительности Эйнштейна. Согласно этой теории, энергия и масса не существуют отдельно, а связаны друг с другом фундаментальным законом:

$$W = mc^2. \quad (74)$$

Отсюда видно, что любому количеству энергии  $W$  соответствует определенная масса  $m$ . Ее величину получают



Р и с. 82. Равные количества воды имеют при различных температурах различные массы.

Угол отклонения указателя весов сильно преувеличен.

из формулы (74). Достаточно точные весы показали бы нам, что при нагревании тела, т. е. при подводе к нему тепловой энергии, его масса увеличивается (рис. 82). Они показали бы также, что быстро движущееся тело тяжелее, чем покоящееся, так как приросту кинетической энергии также соответствует определенная масса. К сожалению, нет таких весов, которые могли бы зарегистрировать это увеличение массы, так как при обычных обстоятельствах оно крайне незначительно (вспомните, что это увеличение равно избытку энергии, деленному на квадрат скорости света!). Соответственно масса тела должна уменьшаться, если тело отдает энергию. При этом, согласно закону сохранения энергии, тело как будто не может отдать больше тепла или механической энергии, чем оно перед этим получило. Но закон Эйнштейна (74) открывает возможность взять у тела значительно больше энергии, чем ему было придано первоначально. Эта энергия получается за счет массы, из которой тело состоит. Сказанное можно проиллюстрировать очень простым расчетом: 1 г массы соответствует количеству энергии

$$\begin{aligned}
 W &= mc^2 = 0,001 \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 = \\
 &= 9 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{м} \text{ (вт} \cdot \text{сек)} = 25 \text{ млн. квт} \cdot \text{ч.}
 \end{aligned}$$

Этот грамм исчез бы тогда без остатка и превратился бы в одну из известных нам форм энергии. Но эта энергия



Р и с. 83. Принцип работы атомной электростанции.

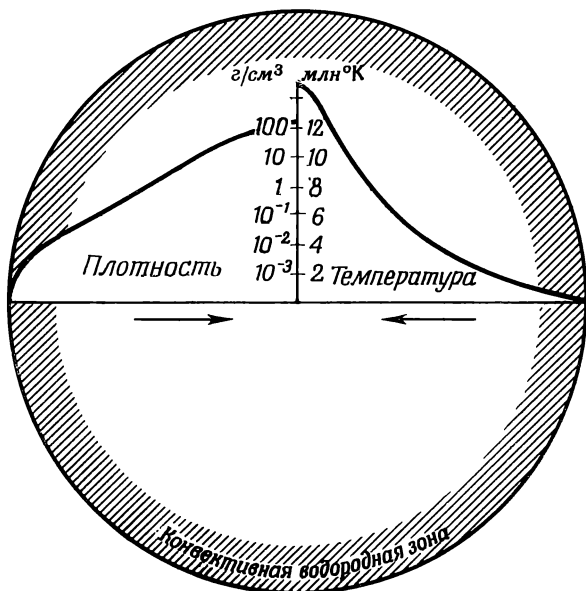
опять-таки имела бы массу в 1 г, так что, строго говоря, ничто бы не исчезло совсем. Материя только изменила свою внешнюю форму. Это уже перестало быть простой фантазией или гипотезой, а превратилось в осязаемую реальность. На советской атомной электростанции, действующей с 1957 г., и на многих других, которые были построены впоследствии, основной процесс состоит в непрерывном превращении небольшого количества химического элемента урана с выделением огромного количества энергии (рис. 83). Но об этом процессе мы не будем много говорить и упомянули о нем только потому, что процесс генерирования энергии в Солнце и звездах тоже удовлетворяет закону Эйнштейна. Правда, «технология» здесь несколько иная и в качестве горючего используется не дорогой уран, а дешевый водород.

### Происхождение энергии звезд

Сжатая в тесном объеме звезды плазма имеет только очень отдаленное сходство с газом, наполняющим газосветную трубку и излучающим мягкий свет. Если в трубке газ весьма разрежен, то, наоборот, плотность газа звезд, сжатого невообразимо высоким давлением, далеко превышает плотность воды. Например, средняя плотность вещества Солнца составляет  $1,41 \text{ г/см}^3$ , а вблизи центра плотность может достигать даже  $100 \text{ г/см}^3$ . В огромной степени там повышается также и температура газа. Эти необычные значения плотности и температуры соз-

дают условия, которые больше всего интересуют ученых, занимающихся физикой плазмы. Как мы увидим дальше, при этом имеют место такие процессы, осуществление которых в техническом масштабе даст нам неиссякаемый источник энергии. Овладение этим источником открыло бы новую эру в истории человечества.

Физические условия внутри звезды в зависимости от ее типа могут быть довольно различными. Условия в недрах Солнца показаны на рис. 84. Вблизи центра все атомы полностью ионизованы вследствие высокой температуры. Так как любая звезда состоит в основном из водорода, а при полной ионизации водородных атомов остаются только атомные ядра, внутренние слои Солнца наряду с отколовшимися электронами содержат главным образом свободные протоны. Энергия, выделяемая в этой области, излучается наружу. Ближе к поверхности, где температура падает, передача тепла происходит благодаря конвекции. В самом верхнем слое, температура которого  $T \approx 6000^\circ \text{K}$  уже определена нами на стр. 136, водород является преимущественно нейтральным или только немно- го ионизованным.

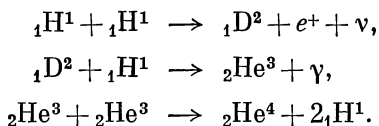


Р и с. 84. Плотность и температура внутри Солнца.

Протоны в недрах Солнца, разумеется, должны отталкиваться друг от друга, так как все они имеют положительный заряд. Но из-за высокой температуры их скорость настолько велика, что они все же преодолевают электрические силы отталкивания и тесно сближаются друг с другом. При этом вступают в игру мощные ядерные силы, протоны реагируют друг с другом и, соединяясь, образуют ядра «тяжелого водорода» — *дейтроны*. Этот процесс называют *термоядерной реакцией*. В результате возникают не химические соединения, а новые ядра, новые химические элементы. И первая ступенька этого процесса — образование ядра тяжелого водорода. Этот элемент называется *дейтерием* и обозначается символом D. Ядро дейтерия состоит из протона и еще одной, незаряженной частицы — нейтрона. При этом испускается частица, во всем аналогичная электрону, но несущая положительный заряд. Это так называемый *позитрон*.

При последующем столкновении этого ядра с одним из протонов образуется ядро изотопа гелия  ${}_2\text{He}^3$ . Затем два таких ядра объединяются в одно ядро  ${}_2\text{He}^4$ , и при этом снова излучаются два протона.

Итак, получается цепочка из трех уравнений:



Мы не будем рассматривать появляющиеся здесь «побочные продукты» реакции, которые нас не интересуют (позитрон  $e^+$ , нейтрино  $\nu$  и квант гамма-излучения  $\gamma$ ). Их масса слишком незначительна и нет нужды ее учитывать. Таким образом, четыре протона как бы переплавляются в одно ядро гелия.

Описанный процесс термоядерных реакций и есть искомый источник энергии. Ключ к пониманию этого дается точным учетом масс участвующих в процессах атомов, которые можно взять из периодической системы элементов. Четыре атома водорода имеют массу  $4 \cdot 1,008 = 4,032$  атомных единиц массы. А атомная масса гелия составляет только 4,0026 единиц! Таким образом, при образовании атома гелия теряется  $4,032 - 4,0026 = 0,0294$  атомных единиц массы. Возникает *дефект массы*, при

котором, согласно закону Эйнштейна, должно выделяться определенное количество энергии.

Если мы отнесем дефект массы к 1 кг водорода, который превратился в гелий, то это будет соответствовать энергии около 180 млн. *квт.ч*<sup>1)</sup>; она должна выделяться в виде излучения Солнца.

Этот процесс идет непрерывно уже несколько миллиардов лет. Может возникнуть вопрос, а достаточно ли велик запас водорода на Солнце, чтобы покрыть такой огромный расход? Ответ на него легко получить, произведя несложный расчет<sup>2)</sup>: оказывается при нынешней мощности излучения Солнца за 1 *сек* в гелий должно превращаться 586 млн. *т* водорода. Это громадная масса, если рассматривать ее с точки зрения земных масштабов, но по отношению ко всей массе Солнца, равной  $2 \cdot 10^{30}$  кг, она все же очень мала.

Дальнейший расчет<sup>3)</sup> приводит нас к выводу, что современный запас горючего материала на Солнце достаточен, чтобы обеспечить потребность в энергии еще в течение 60 млрд. лет.

Точно так же, зная теперешнее количество гелия на Солнце, можно оценить возраст нашего дневного светила. Он лежит в пределах от 5 до 10 млрд. лет. Солнце можно причислить к достаточно старым объектам Галактики. Разумеется, цифры и предположения, лежащие в основе подобных расчетов, могут быть не совсем точными. Но все

1) Для 1 кг водорода дефект массы составляет  $\frac{0,0294}{4,032} = 0,0073$  кг.

По формуле (74) соответствующее количество энергии  $W = 0,0073 \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2 = 6,57 \cdot 10^{14} \text{ вт} \cdot \text{сек} = 182,5 \cdot 10^6 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ .

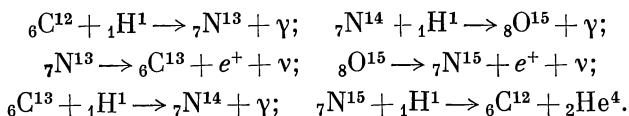
2) На стр. 120 указана мощность излучения Солнца  $3,85 \cdot 10^{26} \text{ вт}$ . При распаде 1 кг водорода освобождается  $6,57 \cdot 10^{14} \text{ вт} \cdot \text{сек}$  энергии, поэтому в 1 *сек* должно расходоваться  $\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{6,57 \cdot 10^{14}} = 586 \cdot 10^9$  кг водорода.

3) Если принять, что относительное содержание элементов во Вселенной такое же, как и во внутренних слоях Солнца (стр. 151), то на 100 атомов водорода приходится 18 атомов гелия, или, переходя на язык атомных весов, на 172 части общей массы — 100 частей водорода. Поэтому запас водорода на Солнце составляет  $\frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 100}{172} = 1,11 \cdot 10^{30}$  кг. При секундном расходе в  $5,86 \cdot 10^{11}$  кг

водород на Солнце будет выгорать еще в течение  $\frac{1,11 \cdot 10^{30}}{5,86 \cdot 10^{11}} = 1,89 \times 10^{18} \text{ сек} = 60 \text{ млрд. лет}$ .

же расчеты убедительно объясняют причину мощного устойчивого и исключительно продолжительного излучения звезд. Истощение энергетических запасов Солнца нам не грозит, по крайней мере в обозримом будущем.

Описанная термоядерная реакция наиболее эффективна только при температурах 10—15 млн. градусов. При температурах порядка 20 млн. градусов более вероятен другой, более сложный процесс, так называемый *цикл Бете* (*углеродный цикл*. — *Перев.*). Кто хоть немного знаком с символикой, принятой в ядерной физике, без специальных пояснений поймет следующие строчки:



Итак, для такой реакции необходимо присутствие атомов углерода, которые постепенно взаимодействуют с ядрами атомов водорода. В конце этой цепочки реакций снова получается углерод. Поэтому он не расходуется, а играет лишь роль посредника-катализатора. В результате всех перечисленных реакций водород в конечном счете превращается в гелий.

### Облака в космическом пространстве

Если взглянуть на звездное небо, усеянное бесчисленными сверкающими точками, то создается впечатление, что вся существующая в мире материя сосредоточена в более или менее крупных телах, а остальное пространство — это прозрачная пустота. Конечно, многочисленные звезды, звездные системы, планеты и другие небесные тела — наиболее бросающиеся в глаза и интересные космические объекты, но это далеко не все из существующего в космосе. Большая часть вещества во Вселенной распылена на мельчайшие, почти незаметные частички или даже атомы. В виде пыли или газа вещество заполняет все пространство. Только в нашей Галактике на долю газа и пыли приходится несколько миллиардов солнечных масс.

Поэтому пространство между звездами совсем не такое пустое, как это может показаться. Абсолютный вакуум, понятие, охотно употребляемое в физике, и в космосе оказывается абстракцией. Инженер по вакуумной техни-



ке может написать целую поэму о том, как получить в телевизионной трубке необходимый вакуум. И он должен быть доволен, если на  $1 \text{ см}^3$  там будет не больше нескольких миллионов молекул газа! Правда, по сравнению с телевизионной трубкой космическое пространство гораздо ближе к пустоте.

### 1. Межпланетная среда

Говоря о межпланетной среде внутри солнечной системы, имеют в виду частички пыли, диаметр которых составляет около  $10^{-4} \text{ мм}$ . Раньше ученые сильно переоценивали долю газа. Сейчас установлено, что в окрестностях земной орбиты в  $1 \text{ см}^3$  может содержаться не более 500 атомов газа и электронов.

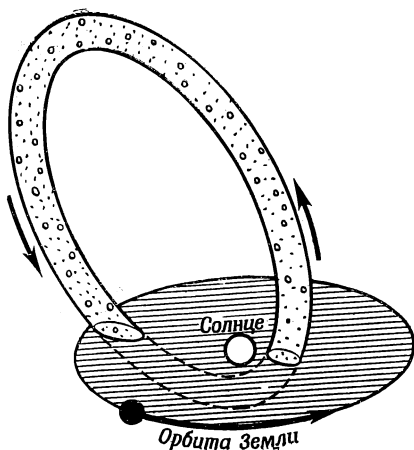
Частички пыли и вызывают то слабое свечение — *зодиакальный свет*, — которое можно видеть на небе, особенно в тропиках, перед восходом или после захода Солнца. Эта же пыль непрерывным потоком выпадает на Землю. Согласно подсчетам, масса выпадающих частиц составляет около 100 *т* в сутки.

Можно наблюдать, как некоторые частички побольше, величиной в 1 мм или 1 см, в атмосфере Земли на высотах порядка 100 км раскаляются, образуя светящиеся *метеоры* и испаряются. Как эти, так и более крупные частицы и тела, время от времени попадающие в атмосферу, носят название *метеорных тел*. При помощи радиолокационных методов удастся проследить их путь и скорость не только ночью, но и днем. По этим данным можно легко определить, из какой области неба они летят. Вы помните, что скорость тела, стартующего с Земли и улетающего за пределы солнечной системы, должна составлять 42 км/сек (стр. 80). Если тело летит медленнее, то его полет происходит по эллиптической орбите вокруг Солнца. Если метеорное тело принадлежит к солнечной системе, то его скорость при встрече с Землей не должна превышать этого значения. Но так как Земля сама движется вокруг Солнца со скоростью 30 км/сек, то максимальная скорость может получиться  $(30 + 42) \text{ км/сек} = 72 \text{ км/сек}$ . Только у очень небольшого числа метеорных тел можно наблюдать скорость больше этой.

Таким образом, почти все метеорные тела являются членами солнечной системы. Вероятнее всего, они пред-

Р и с. 85. Положение метеорного потока по отношению к орбите Земли.

Если эллиптическая траектория потока и орбита Земли пересекаются дважды, то ежегодно происходит две встречи Земли с потоком.



ставляют собой обломки астероидов и комет. В 1846 г. наблюдатели отметили, что комета Биэлы (ее орбита показана на рис. 2, стр. 11) внезапно распалась на две части, а затем совсем исчезла. Затем был отмечен метеорный поток, орбита которого совпадала с орбитой кометы. Подобные метеорные потоки движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца, и каждый раз, когда Земля во время своего годичного движения пересекает такой рой метеорных тел (рис. 85), можно заметить, что на небе появляется множество «падающих звезд». Особой известностью пользуется поток Персеид<sup>1)</sup>, наблюдаемый в первой половине августа. Из остатков кометы Биэлы — метеорного потока Биэлид или, как их иногда называют, Андромедид<sup>1)</sup>, сохранилось немного. В прошлом столетии падающие звезды этого потока были многочисленными и яркими, а теперь поток стал значительно беднее.

## 2. Межзвездная среда

Межзвездная среда, наоборот, только на 1% состоит из пыли, а остальное — газ. В основном это опять-таки атомы водорода; кроме них присутствуют незначительные количества гелия и еще меньше других легких элементов.

<sup>1)</sup> Это название происходит от названия созвездия, в котором находится *радиант* потока — точка на небе, где пересекаются следы всех метеоров данного потока. — *Прим. ред.*



**Р и с. 86.** Светящиеся и темные облака с глобулами. (Часть галактической туманности в созвездии Единорога.)  
О глобулах см. на стр. 173.

Хотя в среднем в каждом кубическом сантиметре содержится 0,6 атома, однако существуют гигантские межзвездные облака с плотностью 10 атомов в  $1 \text{ см}^3$ , а иногда и еще больше.

Могут спросить, а стоит ли вообще интересоваться этим чудовищно разреженным газом? Не лучше ли считать межзвездное пространство практически полным вакуумом?

Однако если мы вспомним о пространстве невообразимых размеров, которое наполняет этот газ, то увидим, что в сумме получится огромная масса. Особенно заметны темные облака, состоящие преимущественно из пыли (рис. 86). Некоторые из них мы видим в плоскости Млечного Пути, где эта мягко светящаяся лента разделяется ими на отдельные ветви. Складывается такое впечатле-

ние, как если бы здесь были большие дыры. На самом же деле это огромные непрозрачные занавесы, которые загораживают вид на интереснейшее место неба — центр Галактики.

Если не говорить о таких скоплениях пыли, то основная масса межзвездного водорода почти прозрачна. В отдельных местах этот водород тоже собирается в облака. Вблизи горячих звезд такие облака выдают себя слабым свечением и поэтому называются *эмиссионными туманностями*. Одну из них — большую туманность Ориона — можно легко наблюдать зимой невооруженным глазом. Она расположена ниже «пояса» Ориона в области «ножен» (см. рис. 74, стр. 141) и светит рассеянным светом. Глазу туманность Ориона кажется еле заметной, однако в действительности она имеет огромные размеры. Ее диаметр составляет около 15 св. лет, а масса — около 10 масс Солнца, хотя даже в самых плотных ее частях в  $1 \text{ см}^3$  содержится не более 10 000 атомов.

В этих так называемых *областях* III межзвездной материи водород ионизован сильным ультрафиолетовым излучением звезд.

### Радиоизлучение на волне 21 см

В более удаленных от звезд областях эмиссионной туманности атомы водорода уже не ионизованы. Поэтому эти *области* II состоят из нейтральных атомов и ничем не выдают своего присутствия, хотя и составляют 90% всех межзвездных облаков.

Однако, как выяснилось два десятка лет назад, холодный межзвездный водород имеет замечательное свойство: он излучает радиоволны строго определенной длины — 21,105 см. В земной лаборатории это удивительное излучение наблюдать невозможно. Оно возникает только в условиях межзвездного пространства.

В земных условиях можно установить, что электрон атома водорода в обычном состоянии движется по наиболее близкой к ядру орбите и одновременно «вращается» вокруг собственной оси. Атомное ядро также «вращается» <sup>1)</sup>. При

---

<sup>1)</sup> Слово «вращение» здесь применяется не вполне законно. Точнее надо было бы сказать «спин» и говорить о параллельности и антипараллельности спинов ядра и электрона. — *Прим. ред.*

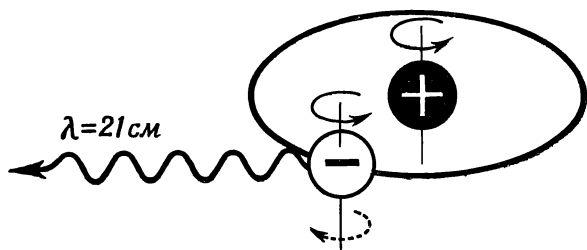
этом существуют две возможные ориентации «оси вращения» электрона по отношению к ядру: параллельная и антипараллельная (рис. 87). Вращение при параллельной ориентации соответствует несколько большей энергии системы. При переходе в противоположное состояние разница в энергиях выделяется в виде кванта излучения. Но вероятность таких переходов с уровня большей энергии на уровень меньшей энергии чрезвычайно мала. Время пребывания электрона на более удаленной от ядра орбите модели Бора, которое предшествует эмиссии одного обычного кванта света, составляет около  $10^{-8}$  сек. Прежде чем электрон сменит ориентацию «оси вращения», проходит в среднем 10 млн. лет! Только благодаря необычайно сильному разрежению газа в облаках холодного водорода и их огромным размерам мы вообще можем обнаружить излучение на волне 21 см.

Наблюдая это радиоизлучение, мы определяем не только положение, распространение и плотность облаков, но и их движение. Другие методы наблюдения уже позволили установить, что Галактика вращается не как жесткая система, скажем колесо, и скорость обращения  $v$  в ней падает с увеличением расстояния от центра  $Z$ .

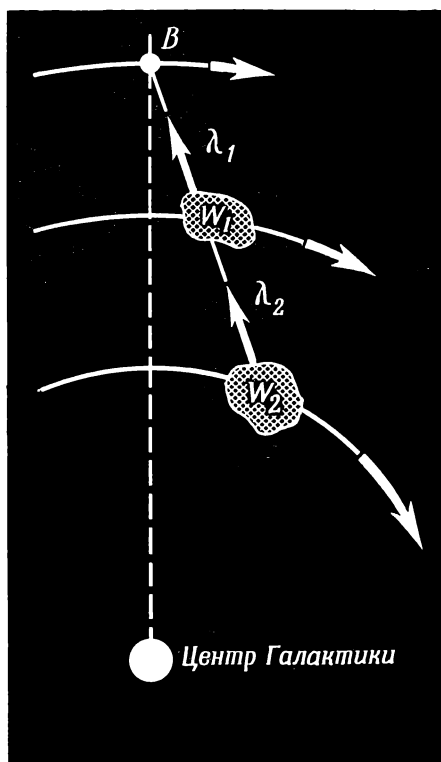
На рис. 88 схематически показаны два таких газовых облака  $W_1$  и  $W_2$ , которые удалены от точки наблюдения  $B$  на различные расстояния. Так как облако  $W_2$  движется быстрее, чем  $W_1$ , оно удаляется от точки  $B$  с большей скоростью. Чтобы измерить эту скорость вдоль луча  $BW_1W_2$ , используют уже известный нам эффект Доплера. Вследствие этого эффекта длина волны  $\lambda_2$ , воспринимаемая от  $W_2$ , должна быть больше  $\lambda_1$ , излучаемой  $W_1$ , а эта в свою очередь больше истинной длины волны  $\lambda$ . Как можно легко рассчитать <sup>1)</sup>, разность частот составляет 4,74 кгц при радиальной скорости 1 км/сек. Так как соотношение между орбитальной скоростью и расстоянием до центра Галактики известно, то по измеренной разности частот можно рассчитать расстояние до газового облака.

---

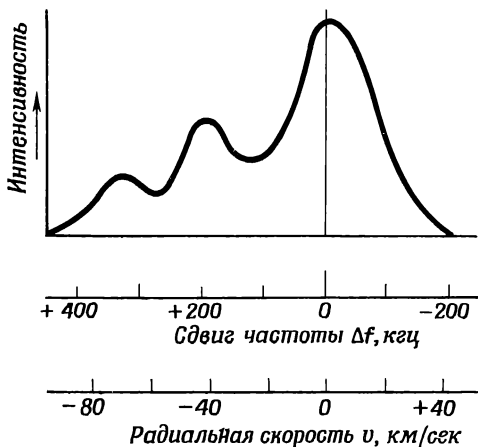
<sup>1)</sup> Так как относительное изменение длины волны  $\Delta\lambda/\lambda$  приблизительно равно относительному изменению частот, можно переписать формулу (61) (стр. 115) так:  $\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}$ . Подставив из формулы (60)  $f = c/\lambda$ , получим  $\Delta f = v/\lambda$ ; для  $v = 1000$  м/сек и  $\lambda = 0,211$  м будем иметь  $\Delta f = \frac{1000 \text{ м/сек}}{0,211 \text{ м}} = 4,74 \text{ кгц}$ .



Р и с. 87. Возникновение излучения межзвездного водорода на волне 21 см.



Р и с. 88. К определению расстояний до облаков межзвездного водорода.



Р и с. 89. Профиль линии, образуемой тремя облаками межзвездного водорода, лежащими одно позади другого.

На рис. 89 показан типичный «профиль линии» (распределение интенсивности в полосе частот.— *Перев.*), который воспринимает направленная на небо и жестко закрепленная антенна. Так как каждому максимуму значения соответствует определенная скорость, график указывает на существование трех облаков межзвездного водорода, расположенных на различных расстояниях. Таким способом можно выяснить пространственное распределение всего межзвездного вещества в системе Млечного Пути.

При этом речь идет отнюдь не только о водороде.

Астрономы установили, что расположение облаков водорода тесно связано с группировками звезд в скопления. Это можно сформулировать в виде правила: где много водорода, там и много звезд. И где эти облака загораживают от наблюдателя звезды, немедленно приходят на помощь радиоволны длины 21 см, которые позволяют косвенно судить о существовании объектов, неразличимых оптически. Таким образом удалось настолько точно узнать пространственное распределение межзвездного вещества в Галактике, что его стало возможным представить в виде карты. То, что раньше только подозревали, теперь надежно доказано. Наша Галактика — это спиральная туманность, подобная крутящемуся фейерверчному колесу, при вращении которого образуются отдельные рукава.

## Космическое радиоизлучение

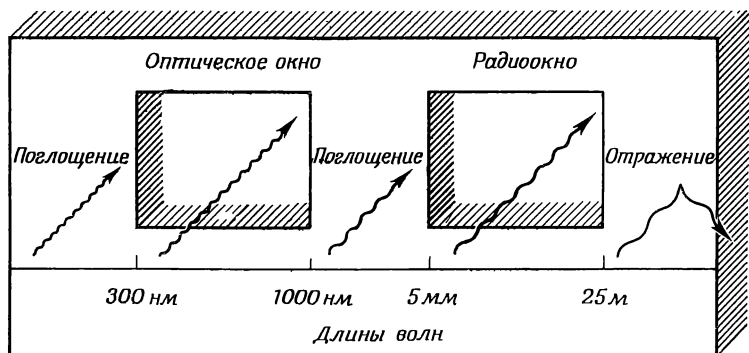
Еще греки в глубокой древности предполагали, что небесные тела при своем обращении вокруг «центрального огня» (под которым не обязательно понимали Солнце) издают гармонично звучащую «музыку сфер». Отдельные тона в соответствии с расстояниями небесных тел должны были совпадать с тонами дорической гаммы, и одному лишь Пифагору дано было слышать эту музыку.

С большим трудом можно понять этот образ мыслей — смесь из математики, простейших астрономических представлений и мистики. Даже Иоганн Кеплер еще заблуждался и искал таинственную связь между учением о гармонии и движением планет. Так как сегодня перед наукой стоят значительно более интересные вопросы, мы не будем прилагать усилия, чтобы как-то разобраться в этом учении древних. Сами законы природы в своем построении и взаимной связи полны внутренней гармонии и эстетического очарования, поэтому просто излишне искусственно создавать подобные соотношения между разнородными явлениями.

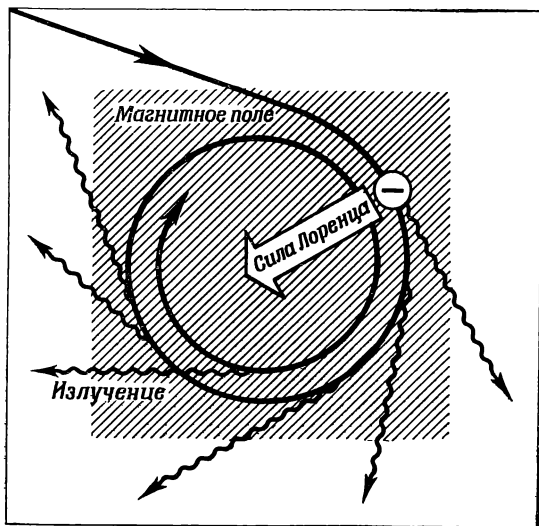
И все же одна разновидность «музыки сфер» существует, хотя звучит она далеко не так приятно, как это себе представляли пифагорейцы. В первый раз ее звуки услышал один американский радиоинженер в 1932 г. Он занимался отыскиванием помех приему радиопередач и обнаружил, что сильный шум в эфире исходит от Млечного Пути. Теперь подобные шумы называют *космическим радиоизлучением*. Оно состоит из непрерывного спектра высокочастотных электромагнитных волн, которые поступают на Землю из самых различных уголков космоса. Эти сигналы принимают в области длин волн от нескольких миллиметров до 25 м — именно такие волны способны проникать через земную атмосферу; более длинные волны отражаются от ионосферы и не могут достичь земной поверхности.

Кроме этой области прозрачности, называемой «радиокном», существует еще «оптическое окно» (рис. 90). Еще более короткие ультрафиолетовые волны поглощаются кислородом и озоном, содержащимися в воздухе. Только тому обстоятельству, что наша атмосфера имеет эти два окна, мы обязаны возможностью изучать космическое пространство и получать сведения о событиях в отдаленных уголках Вселенной. Наряду с уже известным излу-





Р и с. 90. Прозрачность земной атмосферы для различных длин волн.



Р и с. 91. Возникновение синхротронного излучения.  
Линии магнитного поля проходят перпендикулярно плоскости рисунка

чением в линии 21 см радиоизлучение из космоса является в наши дни важнейшим каналом информации, который успешно дополняет исследования, проводимые при помощи телескопов. Так появилась новая отрасль науки о небе — *радиоастрономия*.

Радиоизлучение может возникать самыми различными способами. Давайте рассмотрим еще раз кривые излучения абсолютно черного тела (рис. 73, стр. 137). С первого взгляда можно подумать, что такое излучение состоит только из очень коротких волн. Но это впечатление складывается лишь из-за масштаба графика. Кривые непрерывно и неограниченно продолжаются вправо, в область больших длин волн. Это означает, что каждое тело, поскольку оно вообще имеет какую-то температуру, отличную от абсолютного нуля, испускает *тепловое радиоизлучение*, интенсивность которого при низких температурах, конечно, весьма мала. Этот вид радиоизлучения может быть принят, например, от Солнца, Луны и планет.

Однако важнейшую часть радиоизлучения составляет нетепловое излучение. В принципе каждый периодически колеблющийся электрический заряд излучает электромагнитные волны. В больших плазменных облаках межзвездной среды, где электрические заряды ионизованных атомов отделены друг от друга в пространстве, это приводит, вероятно, к *колебаниям плазмы* и тем самым к непрерывному излучению.

Второй эффект еще очевиднее. Если быстрый электрон попадает в однородное магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно к движению электрона, то его первоначально прямолинейная траектория превратится в окружность (рис. 91). Это следствие действия «силы Лоренца», которая в каждый момент отклоняет электрон в направлении, перпендикулярном направлению его пути. Но круговое движение есть не что иное, как периодические колебания. Если посмотреть на круговую орбиту электрона с ребра, то будет казаться, что электрон колеблется взад и вперед вдоль диаметра своей орбиты. Поэтому он излучает электромагнитные волны, частота которых соответствует частоте колебания. При этом электрон теряет энергию, и радиус его орбиты постепенно уменьшается.

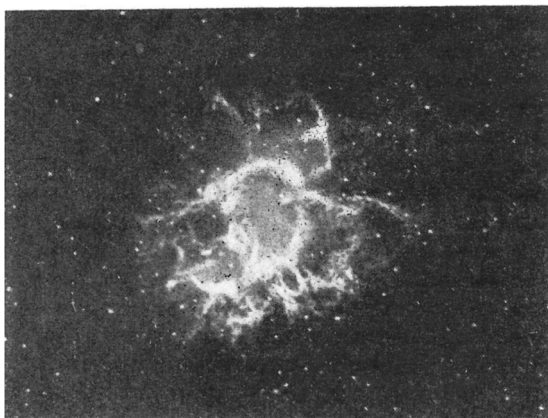
Этот принцип использован в некоторых типах приборов, предназначенных для разгона электронов до большей

скорости. Здесь также сталкиваются с проблемой компенсации потери энергии, связанной с излучением. Таким путем пришли к конструкции *электронного синхротрона*, используемого в ядерной технике. Так как здесь электроны разгоняются от очень маленьких начальных до огромных конечных скоростей, возникает широкий непрерывный спектр электромагнитных волн. При очень больших энергиях видно, как кольцообразный пучок электронов, движущихся в магнитном поле, светится различными цветами в зависимости от его энергии.

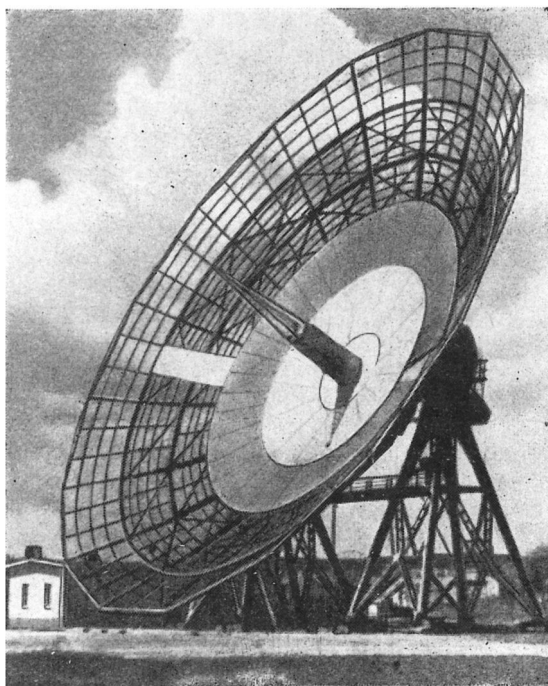
В принципе такой процесс может происходить в любом месте, где существуют протяженные магнитные поля и быстро движущиеся частицы, имеющие электрический заряд, т. е. во многих областях космического пространства. Если даже напряженность магнитного поля межзвездной среды в среднем составляет только  $1/10000$  напряженности земного поля, то не надо забывать о его колоссальных размерах. С другой стороны, существуют звезды с чрезвычайно сильными магнитными полями, так что везде имеется возможность возникновения синхротронного излучения.

По сравнению с оптическими наблюдениями, радиоастрономические исследования имеют то преимущество, что им, также как и распространению волн длиной 21 см, не мешают темные облака. Области НII, излучающие также и волны света, дают преимущественно «тепловое» излучение в дециметровой области. В области длин волн около 10 м эти эмиссионные туманности кажутся, наоборот, «темными» на «светлом» фоне синхротронного излучения, идущего со всех сторон. Особенно заметно выделяются на небе многочисленные *дискретные источники* космического радиоизлучения большой интенсивности. Одним из самых известных является Крабовидная туманность (рис. 92) — облако газа, немного похожее на краба. Мы еще вернемся к ней на стр. 184.

Чтобы точнее определить координаты таких радиоисточников, их пеленгуют при помощи мощных антенн, имеющих вид вогнутого зеркала, — *радиотелескопов* (рис. 93). Точность, с которой это может быть сделано, зависит от разрешающей способности, которую мы уже изучали при рассмотрении оптических инструментов. Так как здесь речь идет о подобных же проблемах, снова можно воспользоваться формулой (56):  $\sin \alpha = \lambda/d$ . По ней нетрудно



Р и с. 92. Крабовидная туманность.



Р и с. 93. Радиотелескоп института Генриха Герца  
в предместье Берлина Адлерсхофе.

рассчитать, что при использовании волн длиной 1 м необходим рефлектор диаметром 70 м, чтобы можно было определить положение радиоисточника с точностью в  $1^\circ$ <sup>1)</sup>.

Этот пример объясняет, почему радиотелескопы имеют такие большие размеры. Имеются и другие устройства, которые работают с применением двух отдельных приемных систем и в которых используется принцип интерференции; посредством их достигают точности в несколько угловых минут, однако они обычно имеют значительно меньшую чувствительность. Как бы то ни было, но когда были построены эти «радиоглаза», астрономия получила новые органы чувств, при помощи которых она все лучше разгадывает строение и свойства Вселенной.

### Рождение звезд

В самой «гуще» облаков межзвездного водорода существует определенный тип очень горячих звезд. О них можно с уверенностью сказать, что они образовались из межзвездного газа путем конденсации и непрерывно образуются вновь и вновь. Эти молодые объекты дают нам самую близкую отправную точку в наших поисках ответа на трудный вопрос: как вообще возникают звезды?

Для расчета продолжительности жизни Солнца (стр.158) решающими были два основных фактора: его излучение, т. е. светимость, и масса. Но выведенное тогда соотношение между отдачей энергии и ее запасами пригодно не для всех звезд.

В спиральных рукавах Галактики находится особенно много крайне горячих голубых звезд, светимость которых может быть в десять и даже в сто тысяч раз больше светимости Солнца. По сравнению с ним эти звезды обходятся со своими запасами топлива столь расточительно, что великолепие их сияния не может продолжаться слишком долго. Запас водорода у таких звезд должен быть исчерпан уже через несколько миллионов лет. Но мы имеем возможность наблюдать такие звезды еще и сегодня; следовательно, они могли возникнуть только очень недавно. Этот

---

<sup>1)</sup> Так как  $\sin 1^\circ = 0,01745$  и при круглом отверстии в уравнение нужно ввести коэффициент 1,22, для  $\lambda = 1$  м получим

$$d = \frac{1,22 \cdot \lambda}{\sin \alpha} = \frac{1,22 \cdot 1 \text{ м}}{0,01745} = 70 \text{ м.}$$

факт убедительно доказывает, что подобные звезды рождаются и в настоящее время, буквально у нас на глазах.

Прежде всего бросается в глаза, что большинство этих звезд находится в середине или в непосредственной близости от плотной массы туманности. Часто они образуют тесные группы, так называемые *ассоциации*. Особенно интересную картину представляет уже упомянутая туманность Ориона (стр. 163). Здесь, как и в других подобных случаях, можно показать, что находящиеся в туманности звезды стремятся удалиться друг от друга в радиальном направлении. Отсюда напрашивается вывод, что эти очень молодые звезды образовались из межзвездного вещества.

Весьма вероятно, что о начале зарождения звезды свидетельствуют темные шаровидные образования — *глобулы*, которые выделяются на светлом фоне туманности (см. рис. 86 на стр. 162). Глобулы состоят из уплотненной, но холодной массы пыли и газа, плотность которых во много тысяч раз больше плотности обычных темных облаков. Возможно, что первым шагом к их возникновению было давление света (стр. 144), которое «спрессовывает» холодные и потому неспособные излучать пылевые облака. Затем начинают действовать силы тяготения, которые все сильнее *сжимают* эти глобулы, причем освобождающаяся энергия тяготения превращается в тепло. Температура и плотность постепенно повышаются и достигают в конце концов того высокого значения, которое необходимо для возникновения термоядерных реакций (стр. 157). Быть может, первоначально образуются более крупные комплексы, которые затем распадаются на отдельные звезды.

Это сжатие и связанный с ним нагрев идут тем быстрее, чем больше масса образующейся звезды. Последующие процессы также протекают во много раз быстрее у звезд, масса которых очень велика, чем и объясняется, что эти звезды проходят весь процесс развития как бы в замедленной киносъемке. Превращение водорода в гелий продолжается до тех пор, пока весь водород не будет израсходован. По мере того как начинают уменьшаться температура и давление, тяготение вновь одерживает верх и ведет к дальнейшему сжатию материи в недрах звезды. Температура и давление поднимаются до еще большего значения, чем прежде, возможно, до 100 млн. градусов. При этих новых условиях мыслимо начало второй фазы выделения

энергии в недрах звезд. Она состоит в слиянии ядер гелия в ядра углерода и затем еще более тяжелых элементов вплоть до железа и никеля. Так как с точки зрения ядерной физики ядра никеля и железа обладают минимальной энергией, процесс синтеза новых ядер на этом заканчивается.

Последние фазы развития звезд можно наметить только с большим трудом. Здесь начинается царство умозрительных предположений, которые происходят от желания объяснить все многообразие отдельных типов звезд и представить их как звенья одной или нескольких цепочек развития. Имеют ли смысл такие попытки, будет выясняться в процессе дальнейшего развития астрофизики. Как конечное состояние в развитии звезд рассматривают состояние «белых карликов» (стр. 139). Оно достигается тогда, когда все резервы ядерной энергии исчерпаны, и температура поддерживается только благодаря сжатию. Этим можно было бы также объяснить чудовищно высокую плотность таких звезд, которая может достигать до нескольких тонн на  $1 \text{ см}^3$ .

Очень интересно рассматривать различные гипотезы о процессах, происходящих на звездах. Но при этом надо быть очень осторожным. Никогда не следует забывать о том, что новые наблюдения и открытия могут дать в будущем совершенно другие отправные точки для построения новых гипотез, а многие воззрения, которые сегодня считаются правильными, могут оказаться ошибочными.

# КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

## Состав космических лучей

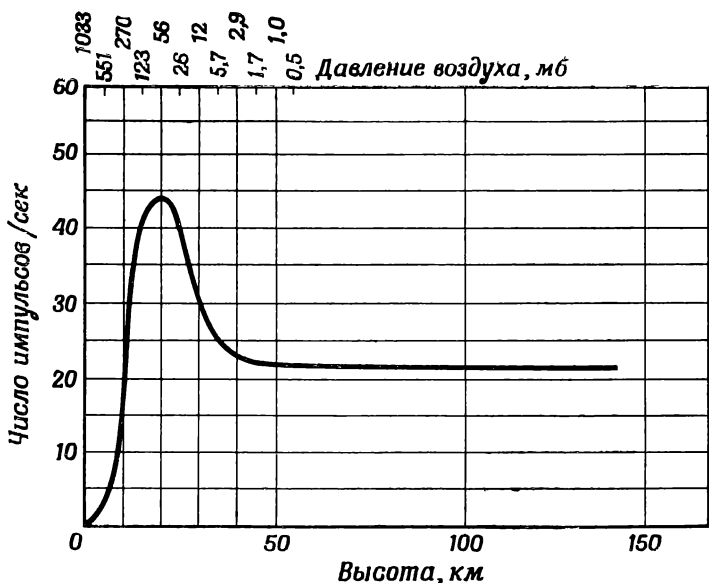
Как мы выяснили, на нашу землю из космического пространства проникают свет, инфракрасное излучение и радиоволны. Все это электромагнитные волны, и место испускания их можно с высокой степенью точности запеленговать при помощи телескопов, радиотелескопов и радиоинтерферометров. Ученые знают, где и как возникают эти излучения; но ими не исчерпываются все виды излучений, приходящих к нам из космоса.

Из космоса на землю идут также лучи, имеющие иную природу. Они представляют собой не волны, а поток частиц, явно отличающихся от квантов света. О световых квантах, или фотонах, мы знаем, что их масса покоя равна нулю. Она существует тогда и только тогда, когда фотоны летят со скоростью света. Этим они коренным образом отличаются от корпускул, которые и в состоянии покоя имеют определенную массу. Но зато корпускулы лишены того свойства, которое присуще самой природе световых квантов: они никогда не могут достичь скорости света.

Итак, эта вторая разновидность космического излучения состоит из частиц, имеющих определенную массу и перемещающихся с очень высокой скоростью. Обладая громадной кинетической энергией, они безжалостно пронизывают наше беззащитное тело и без труда пробивают крыши и стены домов, как если бы эти последние состояли из воздуха. Их можно обнаружить даже на дне глубоких морей.

Когда в 1911 г. это излучение было обнаружено, никто и не подозревал, какое колоссальное количество проблем породит это открытие. Вначале установили только одно: интенсивность нового излучения, которое проявляется прежде всего в увеличении электропроводности воздуха, все больше возрастает с ростом расстояния от земной поверхности. Скоро обнаружили также, что источник это-





Р и с. 94. Зависимость интенсивности космического излучения от высоты

го излучения должен лежать где-то вне Земли. Поэтому оно было названо *космическим излучением*.

Трудность выяснения истинной природы этих лучей заключается в сложном составе земной атмосферы и многообразном взаимодействии излучения с атомными ядрами. Надо различать *первичные космические лучи*, приходящие прямо из космического пространства, и *вторичное излучение*, которое возникает в атмосфере Земли как следствие первичного излучения.

Число первичных и вторичных частиц различно, и его можно приблизительно определить при помощи графика на рис. 94. Частицы первичного излучения вызывают в счетчике радиоактивных излучений относительно меньший импульс. По мере их проникновения в атмосферу сильно увеличивается число вторичных частиц; оно достигает максимума примерно на высоте 20 км. Затем, вследствие все возрастающего поглощения воздуха, интенсивность этого вторичного излучения быстро падает. Чтобы установить состав и энергию первичных компонентов,

первичное излучение надо исследовать по возможности на больших высотах при помощи стратостатов или лучше всего вне земной атмосферы — на ракетах и искусственных спутниках.

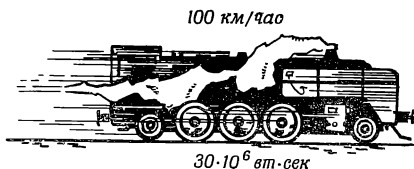
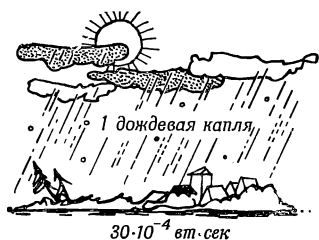
В качестве измерительных приборов для этой цели служат приборы, используемые в ядерной физике: счетчики Гейгера — Мюллера, ионизационные камеры, кассеты с фотографическими пластинками, имеющими особенно плотный светочувствительный слой, в котором частицы космических лучей оставляют тонкие следы.

В результате проведенных исследований установили, что первичное излучение состоит из атомных ядер, летящих почти со скоростью света. В потоке первичных лучей преобладают ядра водорода — протоны. Их энергия превышает энергии всех известных нам частиц, изученных в земных условиях.

Как и в ядерной физике энергию первичной частицы принято выражать в электрон-вольтах (*эв*). Представим себе в безвоздушном пространстве две металлические пластинки, между которыми приложено напряжение 1 *в*. Если вблизи отрицательно заряженной пластинки находится электрон, который, как известно, имеет отрицательный заряд, то он будет притягиваться к положительной пластинке. Подобно камню в поле тяготения, он будет двигаться ускоренно и с определенной скоростью упадет на положительно заряженную пластинку. Пройденный при этом путь не играет никакой роли, решающим является только напряжение между начальной и конечной точками его пути, которое составляло 1 *в*. Соответствующая конечная энергия электрона будет тогда равна 1 *эв*.

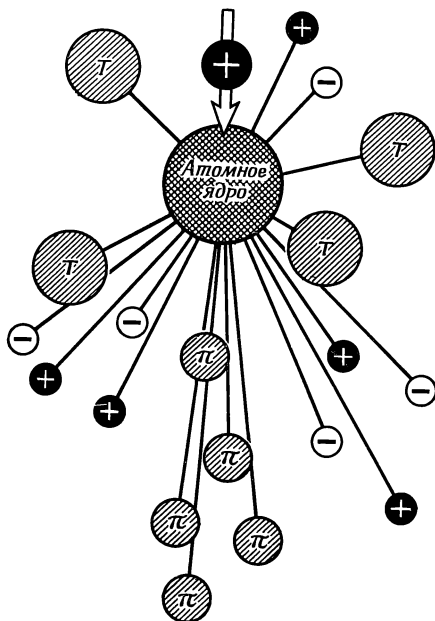
Если в электронной лампе существует анодное напряжение 100 *в*, то конечная энергия электрона, вылетевшего из катода, равна 100 *эв*. Для сравнения приведем следующие данные: частицы, излучаемые радиоактивными веществами, имеют энергию порядка  $10^6$  *эв*; величайшие в мире ускорители частиц сообщают протонам энергию  $30 \cdot 10^9$  *эв*. А частицы первичных космических лучей имеют среднюю энергию  $30 \cdot 10^9$  *эв*, причем отдельные частицы обладают энергией даже  $10^{19}$  *эв*.

Это превышает энергию радиоактивных излучений в  $10^{10}$  раз. Примерно в таком же соотношении друг к другу находятся кинетические энергии дождевой капли и огромного локомотива (рис. 95). Казалось бы, смертель-



Р и с. 95. Кинетическая энергия дождевой капли и мчащегося локомотива относятся друг к другу, как  $1 : 10^{10}$ .

ная опасность грозит всем видам жизни со стороны космического излучения и никакой живой организм не в состоянии от нее защититься. Мы ускользаем от этой опасности только потому, что число частиц, падающих на единицу поверхности, очень незначительно. На уровне моря на площади  $1 \text{ см}^2$  за  $1 \text{ сек}$  регистрируется только одна частица. Если она и разрушит кое-где одну оболочку



Р и с. 96. Распад (расщепление) атомного ядра при столкновении с протоном космического излучения.

ядра или изменит структуру одного единственного гена, несущего наследственную информацию, то организм без сколько-нибудь заметного вреда для себя перенесет этот маленький урон.

Как мы уже говорили, первичные космические лучи, попадая в атмосферу Земли, сталкиваются с ядрами атмосферы, в основном кислорода и азота. Каждое столкновение приводит к разрушению столкнувшихся ядер,носящему характер взрыва. Обломки, которые с огромной силой разлетаются во все стороны, со своей стороны снова при этом вызывают различные эффекты (рис. 96). Самое важное при этом — что во вторичном излучении возникает большое число элементарных частиц, которые полностью отсутствуют в первичном излучении: легкие частицы (электроны и позитроны), тяжелые (например, различные виды так называемых мезонов) и наконец сверхтяжелые частицы, иногда превышающие массу электронов в 2000 раз. Многие из них удалось получить в последние годы в громадных установках, используемых в ядерной физике, и, таким образом, они стали непосредственным объектом физического эксперимента. То, что регистрируется на поверхности Земли, это, конечно, по большей части не сами космические лучи, а результат их взаимодействия с атомами воздуха. Из тысячи протонов, которые вторгаются в атмосферу, только один может иногда достичь земной поверхности.

### Распад $\mu$ -мезона

Чтобы познакомиться с богатством и диковинками природы, отважные люди предпринимали полные приключений путешествия в самые далекие уголки земного шара. Эти люди видели на своем пути все разнообразие внешних форм и явлений природы, самых различных животных, растения и минералы. Во время этих исследовательских экспедиций путешественники собрали большой урожай открытий. Все, что существует на Земле и имеет размеры, доступные глазу, известно настолько хорошо и полно, что вряд ли можно ожидать появления в макром мире еще чего-нибудь принципиально нового.

Однако есть еще мир, определяемый размерами другого порядка. Дорога в него ведет в глубь материи, и путь этот не менее увлекателен и богат неожиданностями. Мир *микрокосмоса*, мир атомов и элементарных частиц, суще-

ствуует неотделимо от происходящего в *макрокосмосе*. Ядерная физика и астрофизика, как мы в этом уже убедились, самым тесным образом связаны друг с другом. Где речь идет о тончайшей структуре материи, там, хотим мы этого или не хотим, нам приходится во многих случаях затрагивать вопросы, имеющие прямое отношение к проблемам мира в целом.

Космическое излучение — одно из таких связующих звеньев между микрокосмосом и макрокосмосом. Оно обладает свойствами, которые необходимо знать для понимания законов, действующих в космическом масштабе.

Частицы, достигающие поверхности Земли, особенно интересны. На 80% они состоят из положительно или отрицательно заряженных  $\mu$ -мезонов. Одно время их называли «тяжелыми электронами», так как их масса составляет 206,7 массы одного электрона.  $\mu$ -мезоны появляются в результате распада еще более тяжелых  $\pi$ -мезонов, которые со своей стороны возникли при взаимодействии первичных частиц с атомными ядрами. С точки зрения техники,  $\mu$ -мезоны абсолютно ни на что не пригодны, так как они являются крайне короткоживущими образованиями и как радиоактивные атомные ядра распадаются на один положительный или отрицательный электрон, одно нейтрино и одно антинейтрино с периодом полураспада <sup>1)</sup> 1,5 мксек (микросекунды). Это записывается так

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}.$$

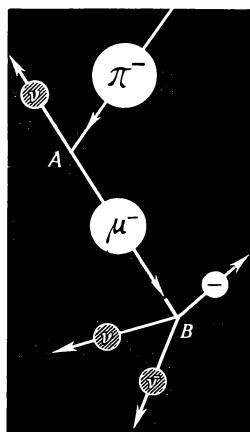
На рис. 97 показано, как из  $\pi$ -мезона возникает  $\mu$ -мезон, который затем самопроизвольно распадается. С продолжительностью жизни мезона связано одно замечательное обстоятельство (стр. 206); поэтому мы попробуем схематически изобразить, как измеряют эту величину (рис. 98). Для этой цели применяют две батареи А и В, состоящие из параллельно включенных счетчиков Гейгера — Мюллера, между которыми лежит слиток свинца. Как только мезон вторгается в этот слиток, он вызывает импульс в верхней группе счетчиков. Нижний ряд счетчиков сообщает об электроне, освобождающемся при распаде мезона. Способ измерения промежутка времени, прошедшего между попаданием частицы в прибор и ее распадом,

---

<sup>1)</sup> Об этом понятии автор говорит немного ниже. — *Прим. ред.*

Р и с. 97. Схема распада отрицательного  $\pi$ -мезона.

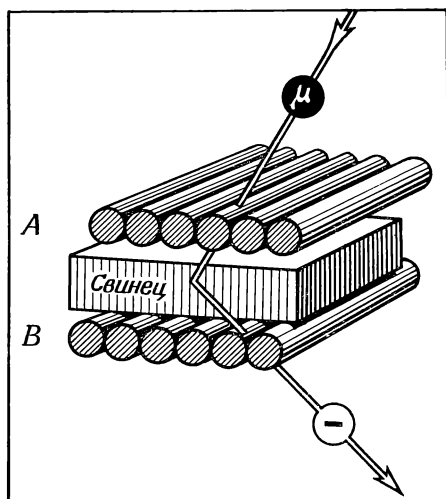
В точке  $A$  происходит образование  $\mu$ -мезона; в точке  $B$  — его распад.



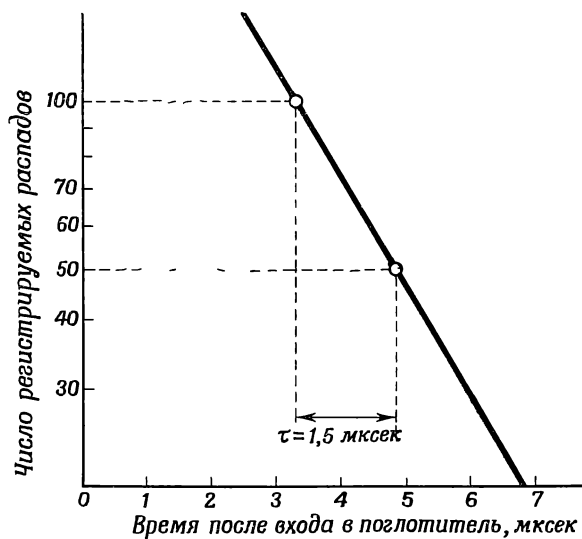
очень прост: первый импульс включает высокочастотный генератор, который совершает за 1 сек определенное число колебаний. Импульс, идущий от нижнего ряда счетчиков, снова останавливает генератор. Число колебаний, совершившихся за этот промежуток, регистрируют с высокой степенью точности и тем самым получают время, за которое распадается мезон.

Хотя время распада отдельных частиц, как и в случае любого радиоактивного процесса, неодинаково, процесс в целом подчиняется законам статистики. Поэтому после длительной серии опытов можно установить, сколько частичек распадается через 1  $\mu\text{сек}$ , сколько через 2  $\mu\text{сек}$  и т. д. Если мы рассмотрим несколько тысяч результатов таких опытов, то обнаружим, что все  $\mu$ -мезоны подчиняются известному закону радиоактивного распада: число частиц за каждый определенный промежуток времени уменьшается ровно вдвое. Такой промежуток времени называется *периодом полураспада*.

На рис. 99 показаны результаты многих измерений. Представленный на этом рисунке график свидетельствует о том, что от первоначальных 100 частичек по прошествии 1,5  $\mu\text{сек}$  осталось только 50. Тем самым период полураспада найден. Нетрудно заметить, что продолжительность жизни отдельных частиц различна. Одни распадаются почти мгновенно после входа в свинцовый поглотитель, в то время как другим для этого требуется несравненно больше времени. Поэтому для многих исследований удоб-



Р и с. 98. Измерение продолжительности жизни  $\mu$ -мезона.



Р и с. 99. К определению периода полураспада  $\mu$ -мезона.

нее принимать в расчет *среднее время жизни*  $\tau$  отдельной частички. Его получают по законам математической статистики, умножая период полураспада на 1,443. Для  $\mu$ -мезона  $\tau = 1,443 \cdot 1,5 \text{ мксек} = 2,16 \text{ мксек}$ .

Поскольку многие другие элементарные частицы и атомные ядра также имеют весьма короткое время жизни — некоторые из них живут значительно меньше, а другие гораздо более устойчивы, — этот результат не является сам по себе особенно примечательным. Однако несколько позже мы еще раз вернемся к нему совсем по другому поводу; дело в том, что как раз  $\mu$ -мезон способен сообщить нам нечто очень важное.

### Происхождение космических лучей

О происхождении космических лучей пока можно сказать мало определенного. Решение этого вопроса с самого начала очень затрудняется еще и тем обстоятельством, что магнитное поле Земли изменяет первоначальное направление космических лучей. Общая картина такова, как если бы частицы проникали в солнечную систему со всех сторон. Это в свою очередь может объясняться тем, что межзвездные магнитные поля рассеивают частицы по всем направлениям. Поэтому о местонахождении источника космических лучей и о причине их возникновения мы можем делать только предположения.

Например, пытаются найти отправную точку для дальнейших изысканий в с о с т а в е этих лучей. Процентное содержание атомных ядер в первичных космических лучах примерно соответствует относительному содержанию химических элементов в космосе (стр. 151). Однако в двух существенных пунктах он отклоняется от среднего химического состава звезд. Космические лучи содержат в сравнении со звездами раз в 10 больше никеля и железа, а также заметные количества лития, бериллия и бора, которые в звездах практически отсутствуют.

На основе этих, а также ряда других данных можно предположить (хотя и нельзя доказать точно), что источниками космических лучей являются грандиозные взрывы звезд, в результате которых на небе вспыхивают так называемые *Сверхновые*. Эти внезапно появляющиеся на небе звезды имеют колоссальный блеск и в большинстве случаев через несколько дней перестают быть видимы. Такое



необычное явление наблюдали, в частности, китайские астрономы в 1054 г. Остатки этой звезды существуют еще и сегодня в виде Крабовидной туманности в созвездии Тельца (см. рис. 92 на стр. 171). В районе туманности массы газа удаляются друг от друга со скоростью 1100 км/сек. Почему происходит вспышка Сверхновой, пока остается только гадать. Возможно, на определенной стадии эволюции звезды равновесие между тяготением и давлением в недрах звезды резко нарушается в пользу тяготения, что приводит к катастрофе. Огромные массы водорода и гелия из атмосферы звезды вторгаются в ее раскаленные недра.

Описанные нами ядерные реакции, которые в обычных условиях протекают спокойно, без нарушения равновесия, сейчас вызывают колоссальный взрыв. Светимость звезды повышается при этом в десятки миллионов раз и в первые дни звезда светит как миллионы солнц.

Таким образом, «Сверхновая» — это не новая звезда. Она развивается из уже существовавшего объекта. Если в составе вещества звезды было относительно много никеля и железа, то этим, возможно, и объясняется сравнительно большая насыщенность космических лучей ядрами этих элементов. А наличие лития, бериллия и бора можно объяснить процессами распада, которые претерпевают эти ядра на их долгом пути через космическое пространство при столкновении с находящимися там частицами.

Вторая серьезная проблема — это исключительно высокая энергия космических лучей. Не существует ни одного известного радиоактивного или ядерного процесса, при котором энергия частиц достигала бы  $10^{16}$  эв. Чтобы объяснить это, надо принять, что в данном случае частицы ускоряются в космических магнитных полях, имеющих огромную протяженность. Такие поля действительно существуют в космосе. В Галактике, например, магнитные силовые линии проходят параллельно спиральным рукавам. Многие звезды имеют собственные магнитные поля значительной напряженности, и магнитными полями пронизана вся межзвездная среда. А так как изменяющееся по времени магнитное поле индуцирует электрическое поле, то тем самым сразу же создается возможность приобретения электрически заряженными частицами космических лучей соответствующих ускорений.

## Солнечное излучение

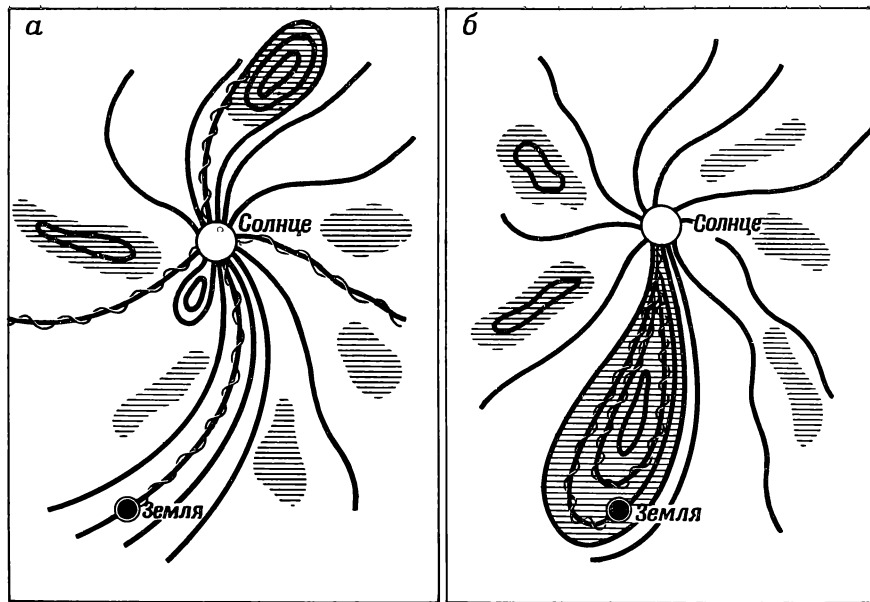
Уже давно среди ученых зародилась такая мысль: а не могут ли космические лучи хотя бы частично исходить от Солнца? Но за неимением веских доказательств от этой гипотезы одно время отказались. Только проведенные в последние годы наблюдения дали достаточно фактического материала, который помог внести ясность в этот вопрос. Оказалось, что, кроме попадающих к нам космических лучей постоянной интенсивности, существуют также *солнечные космические лучи*, состоящие преимущественно из протонов и электронов, интенсивность которых по временам резко усиливается.

Интенсивность солнечных космических лучей тесно связана с *солнечными пятнами*, причина возникновения которых до сегодняшнего дня еще не выяснена. В этих областях, напоминающих гигантские водовороты на поверхности Солнца, температура примерно на  $1000^{\circ}$  ниже, чем на остальной поверхности, так что пятна светят слабее и кажутся почти черными на окружающем их ослепительном фоне. Обращает на себя внимание тот факт, что с солнечными пятнами связаны сильные магнитные поля. Они простираются далеко в пространство вплоть до земной орбиты, а их напряженность близ поверхности Солнца достигает  $4000 \text{ гс}$  (гауссов)<sup>1)</sup>. Появление таких полей можно установить по связанному с этим расщеплению линий солнечного спектра.

Иногда вблизи солнечного пятна происходит нечто вроде сильного извержения, которое сопровождается яркой вспышкой света, сильным ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями. Это излучение проявляет себя в виде неприятных помех при радиосвязи на коротких волнах. Одновременно или непосредственно после этого в пространство выбрасываются огромные облака солнечного газа, которые достигают Земли через  $15\text{--}40 \text{ час}$ . Легко рассчитать, что частицы этого газа мчатся со скоростью от  $1000$  до  $3000 \text{ км/сек}$ . Если вам сказать о том, что плотность этого потока составляет от  $1000$  до  $100\,000 \text{ частиц/см}^3$ , то выражение «вторжение протонов» покажется уместным.

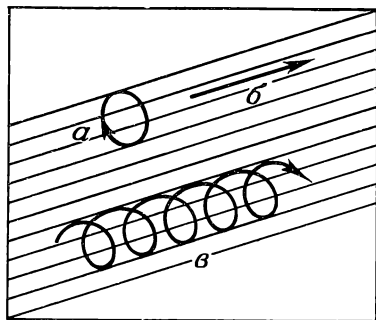
---

<sup>1)</sup> Это значение соответствует индукции мощного электромагнита;  $4000 \text{ гс} = 0,4 \text{ в.сек/м}^2$ .



Р и с. 100. *а* — солнечные магнитные поля и заключенные в них плазменные облака. Спиралевидные линии — траектории частиц солнечного корпускулярного излучения. *б* — плазменный «язык», заключенный в магнитную силовую трубку, достигает Земли.

Р и с. 101. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле: *а* — перпендикулярно, *б* — параллельно, *в* — наклонно к линиям поля.



Однако не все эти частицы достигают Земли. Долетит частица до нас или нет, зависит, так сказать, от «межпланетной погоды», которая в свою очередь определяется формой и расположением в пространстве магнитных полей, связанных с солнечными пятнами. Вследствие вращения Солнца эти магнитные поля приобретают спиральную структуру. Их силовые линии напоминают изогнутые водяные струи вращающегося автомата для полива газонов (рис. 100, *а*). На больших удалениях от Солнца поля искажены самым причудливым образом за счет воздействия на них плазмы, двигающейся толчками. Силовые линии деформированы, образуют «языки» и иногда могут совсем отделяться в виде гигантских «пузырей».

Как видно из рис. 91 на стр. 168, если направление полета заряда будет перпендикулярно к силовым линиям, он станет описывать круговую орбиту. До поры до времени мы не будем обращать внимания на тот факт, что радиус этой орбиты уменьшается вследствие потери энергии. А если заряженная частица движется в точности параллельно направлению силовых линий, она как бы скользит вдоль них (рис. 101).

Однако частица, приходящая из космоса, движется в общем случае не перпендикулярно и не параллельно силовым линиям, а всегда под более или менее острым углом к ним. Поэтому ее движение не бывает ни круговым, ни прямолинейным, а происходит по винтовой линии. По таким винтовым линиям частица и следует вдоль линии поля (рис. 101). При этом оказывается, что частицы, летящие от Солнца, в большинстве случаев остаются внутри шнуровидного участка поля. Такой участок называют *магнитной силовой трубкой*.

Если образованный таким способом плазменный «язык» проходит в непосредственной близости от Земли, это может привести к мощному вторжению протонов (рис. 100, б). Один американский спутник за 17 месяцев 21 раз регистрировал малые и большие «протонные атаки».

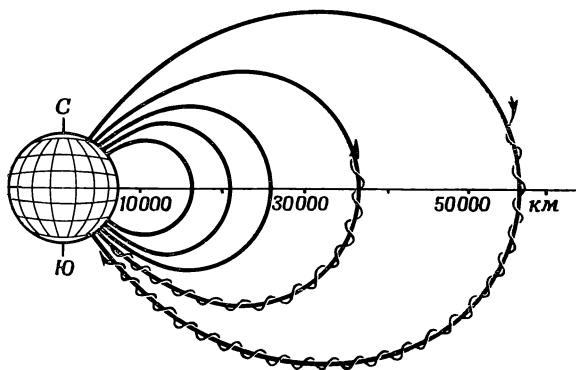
Энергия протонов солнечных космических лучей составляет около  $20 \cdot 10^6$  эв и только изредка превышает  $15 \cdot 10^9$  эв. Отсюда видно, что частицы солнечных корпускулярных потоков имеют куда меньшую энергию, чем первичные космические лучи. Зато потоки их гораздо значительнее. Чтобы узнать это, потребовалось огромное количество трудоемких наблюдений, особенно потому, что частицы солнечного излучения, вследствие их относительно малой энергии, не могут достигать земной поверхности.

Отсюда видно, что лучший путь для получения надежной информации — изучение этого излучения в самом космическом пространстве. Поэтому значительная часть советской программы научных исследований, связанной с запуском искусственных спутников и космических кораблей, посвящена солнечным и «галактическим» космическим лучам.

### Околоземные зоны радиации

Исследованиям, о которых мы говорили в конце предыдущего раздела, наука обязана одним совсем недавним и неожиданным открытием. Оказалось, что Земля окружена областью, в которой интенсивность корпускулярного излучения имеет необычайно высокие значения. Эти так называемые *радиационные зоны* связаны с магнитным полем Земли, и электрически заряженные частицы, которые в нем перемещаются, должны подчиняться определенным законам. Как мы только что видели, эти частицы должны двигаться по винтовым траекториям вокруг линий поля.

Но здесь возникает еще одно осложнение. Дело в том, что в магнитном поле Земли не существует параллельных силовых линий. Как известно, линии имеют форму дуг, заключенных между двумя магнитными полюсами Земли, вблизи которых они все больше и больше сближаются (рис. 102). Заряженная частица неизбежно проходит в той области, где напряженность магнитного поля становится все сильнее. Расстояние между витками спиральной траектории, т. е. их «шаг», становится все меньше. Частице грозит опасность застрять на месте. Однако этому препятству-

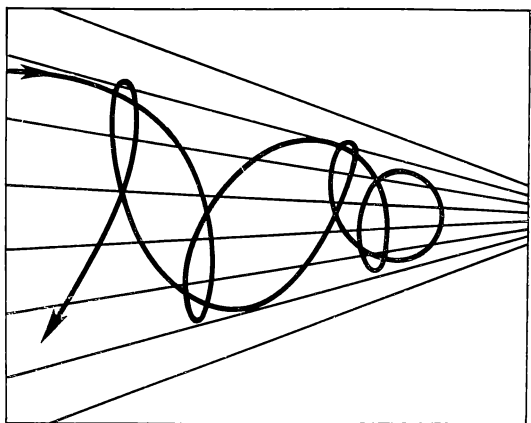


Р и с. 102. Улавливание заряженной частицы магнитным полем Земли.

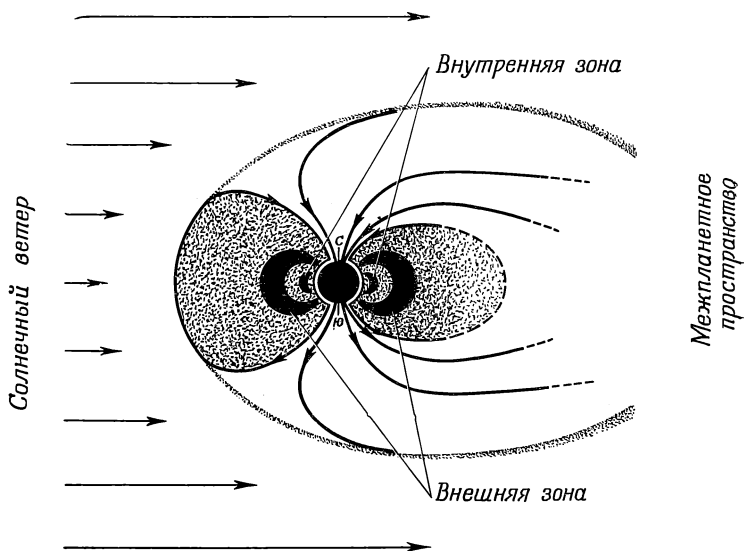
ют законы сохранения энергии и момента количества движения. В некоторой точке поля, где напряженность имеет определенную величину, угол «подъема» винтовой траектории меняет свой знак на обратный, и частица выбирается из ловушки (рис. 103). Она как бы отражается от сгущения силовых линий и начинает свое путешествие к противоположному магнитному полюсу. Там повторяется то же самое, и частица может таким образом длительное время пребывать в плену магнитного поля. Только частицы, обладающие весьма высокой энергией, в состоянии при благоприятном направлении полета дрейфовать перпендикулярно силовым линиям и вырваться из магнитной ловушки.

До проведения космических экспериментов с влиянием магнитного поля были знакомы только по эффекту *запад-восток*, вследствие которого космические лучи попадают на поверхность Земли преимущественно с западного направления. Многочисленные и тщательные исследования позволили установить, что космические лучи, а также и солнечное излучение на определенных расстояниях от Земли имеют такую высокую плотность, что это внушает опасение за жизнь космонавтов.

При этом надо различать *внутреннюю и внешнюю радиационные зоны* (рис. 104). Во внутренней зоне находятся протоны высокой энергии. Их энергия достигает величины  $10^9$  эв. Более бедные энергией частицы, например электроны с энергией порядка  $10^5$  эв, большей частью застревают во внешней зоне.



Р и с. 103. Отражение заряженной частицы в неоднородном магнитном поле.



Р и с. 104. Поперечное сечение околоземных зон радиации.

*Солнечный ветер* — потоки заряженных частиц, постоянно выбрасываемые Солнцем. В спокойном состоянии этот «ветер» состоит из потока частиц (от 5 до 50 *частиц/см<sup>3</sup>*), движущихся со скоростью от 30 до 160 *км/сек*. Обтекая «магнитосферу», этот поток придает ей овальную форму, изображенную на рисунке.

Если мы в свое время пришли к выводу, что космические лучи, достигающие поверхности Земли, не представляют никакой опасности для людей, то такой взгляд совершенно неприменим к радиационным зонам. Космические полеты в этих зонах, где встречается от 10 000 до 50 000 *частиц/см<sup>2</sup>·сек*, были бы крайне опасны. При дальних рейсах в космос безусловно надо стремиться миновать радиационные пояса настолько быстро, чтобы радиация не могла причинить серьезного вреда. Возможность защиты от излучения при помощи брони пока остается под сомнением из-за огромной массы этой брони. Чтобы путь не проходил через опасные радиационные зоны, быть может, придется стартовать через два воронкообразных коридора, которые находятся под полюсами Земли. Во всяком случае, надо очень тщательно с биологической точки зрения исследовать условия в зонах радиации при длительном пребывании человека в космическом пространстве, прежде чем можно будет отважиться на дальние космические полеты.

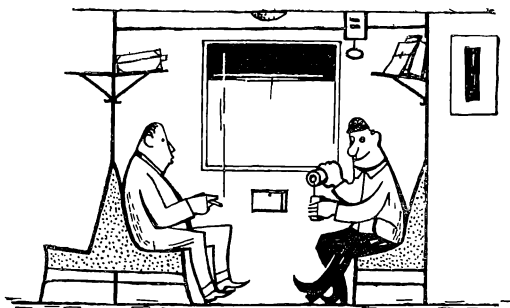


# В МИРЕ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## Системы отсчета

Понятие скорости играет большую роль в физике, и скорость же определенно является одной из излюбленных тем разговоров наших современников. Цифры, внушающие нам уважение, обычно остаются у нас в памяти. В то время как мы в полном покое сидим за письменным столом и предаемся размышлениям, нам и в голову не приходит, что в это же самое время весь дом стоит на карусели и пробегает  $300 \text{ м/сек}$  вследствие вращения Земли. Мы также совсем не чувствуем, что Земля, кроме того, с головокружительной скоростью  $30 \text{ км/сек}$  несется вокруг Солнца, а Солнце в свою очередь мчится вокруг центра Галактики... А есть ли вообще конец всему этому? Какая же скорость в этом случае является правильной?

Все сомнения на этот счет сразу же устраняются, если при этом задуматься, что же вообще означает понятие *скорости*? Тут нельзя говорить ни о чем другом, как о перемещении одного тела относительно другого, принятого за неподвижный фон, за *систему отсчета*, которую мы рассматриваем как неподвижную. Абсолютного движения не существует, оно всегда происходит только по отношению к какому-нибудь другому предмету. Так, Луна медленно перемещается по небосводу от точки своего восхода до точки заката в то время, как Землю мы принимаем за неподвижную систему отсчета. Но в некоторые ночи кажется, что Луна мчится сквозь облака, как будто гонимая бурей. Это бывает, если мы, задумавшись на минуту, потеряем из глаз горизонт. «Разумеется, это иллюзия, — говорим мы себе. — Это всего лишь облака, которые гонит ветер. Нам только потому показалось, что Луна движется так быстро, что мы в течение нескольких мгновений принимали за неподвижную систему отсчета движущиеся облака».



Р и с. 105. Равномерно движущаяся система отсчета.

Можно поворачивать и перемещать предметы как угодно, но все данные об их скорости будут иметь смысл только тогда, когда мы одновременно назовем систему, по отношению к которой движутся эти предметы. Чтобы не раздражать себя понапрасну, принимают, что эта система находится в покое, как стены нашей комнаты, переплет окна и дерево около дома. Однако действительно покоящейся, так называемой абсолютной системы отсчета не существует. Во всей Вселенной нельзя найти ни одной точки, о которой на разумном основании можно было бы утверждать, что по сравнению со всеми остальными она стоит совершенно неподвижно.

Самые простые соотношения существуют между системами, которые находятся в равномерном прямолинейном движении одна относительно другой. Физические процессы, протекающие в каждой из таких систем, *полностью эквивалентны*. В реактивном самолете, летящем по прямой линии, маятник качается с точно таким же периодом и по тому же самому закону, как и на неподвижной Земле. Все сложные приборы на борту самолета нисколько не изменили своей работы по сравнению с работой на заводе, где их в последний раз испытывали. Если пассажир мчащегося с постоянной скоростью экспресса на секунду забудет про стук колес, то он вполне может представить себя сидящим дома за завтраком (рис. 105). Равномерное и прямолинейное движение ни в малейшей степени не влияет на физические эксперименты и процессы, которые происходят в движущейся системе.

Во всех системах, которые движутся равномерно одна относительно другой, действуют одни и те же законы природы.

Как обстоит дело с системами, которые движутся не равномерно и не прямолинейно, а ускоренно или вращаясь, мы рассмотрим дальше, а пока этого вопроса касаться не будем.

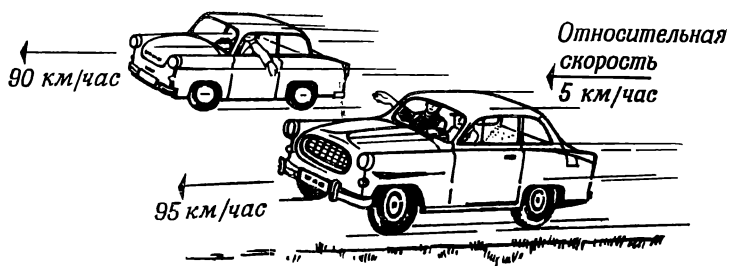
### Относительные скорости

Автомобиль «Трабант», несущийся по автострате, также является равномерно движущейся системой отсчета. Спидометр показывает  $90 \text{ км/час}$  — понятно, по отношению к покоящейся земле. А сзади с угрожающим гудением надвигается «Шкода», которая мчится со скоростью  $95 \text{ км/час}$ . Миганием огонька она предупреждает об обгоне, сворачивает в сторону и с подчеркнутым превосходством проезжает мимо «Трабанта». Когда машины поравнялись, пассажиры могли бы пожать друг другу руки, так медленно проезжает она мимо.  $95 \text{ км/час}$  перегоняющей машины за одно мгновение «сократилось» до  $5 \text{ км/час}$  (рис. 106). Иными словами, если надо определить скорость автомобиля «Шкода» относительно системы «Трабант», то следует взять разность скоростей. А вот если бы оба автомобиля мчались навстречу друг другу, тогда относительная скорость была бы равна сумме  $(95 + 90) \text{ км/час} = 185 \text{ км/час}$ , и оба водителя могли бы возомнить о себе.

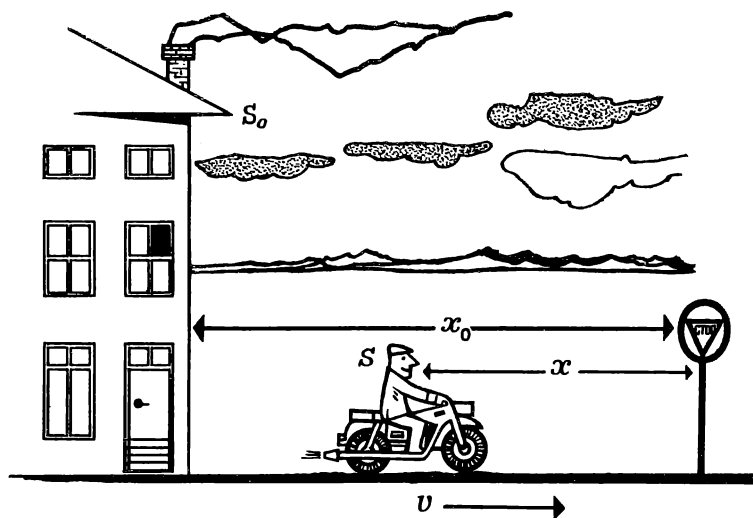
Давайте рассмотрим еще одно уравнение преобразования. Некоторая точка (на рис. 107 это дорожный знак) находится в покоящейся системе  $S_0$  и имеет в ней координату  $x_0$ . Вторая система  $S$  (скажем, мотоциклист) движется относительно  $S_0$  со скоростью  $v$  направо. Пусть в момент  $t = 0$  начала отсчета обеих систем совпадают (на углу дома). В то время как в системе  $S_0$  положение точки остается неизменным, в системе  $S$  в течение времени  $t$  она сдвигается. Ее координата  $x$  уменьшается как раз на путь  $v \cdot t$ , на который система  $S$  сдвигается направо за этот отрезок времени. Мы получаем уравнение преобразования

$$x = x_0 - vt. \quad (75)$$

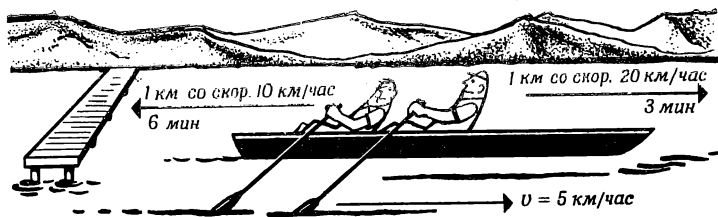
Такие уравнения, которые описывают переход от одной равномерно движущейся системы к другой, соответствуют всему опыту нашей повседневной жизни. Само собой разу-



Р и с. 106. Относительная скорость.



Р и с. 107. К объяснению преобразования Галилея.



Р и с. 108. Прогулка на лодке по течению и против течения.

меется, что мы считаем их правильными. Эти уравнения называют *преобразованиями Галилея*.

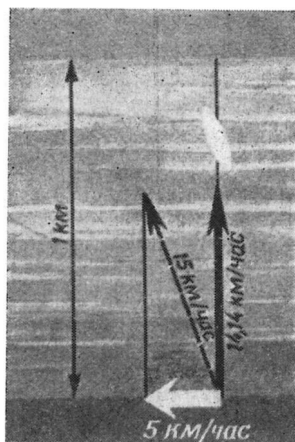
Подобные расчеты выглядят очень просто. Но если неправильно использовать уравнения преобразования, то можно легко ошибиться. К примеру, представим себе, что два молодых человека несут к воде гребную лодку, элегантную двойку, которая по спокойному озеру несется со скоростью  $s = 15 \text{ км/час}$ . Оба рассчитали, что путь длиной  $2 \text{ км}$  она пройдет ровно за  $8 \text{ мин}$ .

Но сегодня они тренируются на Эльбе. Скорость течения составляет  $v = 5 \text{ км/час}$ . Чтобы устранить влияние течения, наши гребцы решили грести один километр против него, а другой—в обратную сторону. Тогда потеря времени, возникающая при движении вверх по течению, как раз была бы скомпенсирована, так как *против* течения они шли бы со скоростью относительно берега  $s - v = (15 - 5) \text{ км/час} = 10 \text{ км/час}$ , а по течению — со скоростью  $s + v = (15 + 5) \text{ км/час} = 20 \text{ км/час}$ ; в результате, получилось бы нужное среднее значение скорости  $15 \text{ км/час}$  (рис. 108).

Итак, среднее значение скорости лодки на реке можно получить то же самое, что и на озере, чего, к сожалению, не скажешь о затраченном времени, которое как раз зависит от скорости: на путь против течения гребцы затратили  $\frac{s}{v_1} = \frac{1 \text{ км} \cdot 60 \text{ мин}}{10 \text{ км}} = 6 \text{ мин}$ , а на обратный путь по течению,  $\frac{s}{v_2} = \frac{1 \text{ км} \cdot 60 \text{ мин}}{20 \text{ км}} = 3 \text{ мин}$ . В сумме они затратили бы не  $8$ , а  $9 \text{ мин}$ . На целую минуту надо гребцам больше времени, чем они себе представляли. Путь по течению совершается недостаточно быстро, чтобы компенсировать потерю времени, возникшую при движении против течения.

Если бы Эльба была достаточно широка для этого, молодые люди получили бы возможность испытать также

Р и с. 109. Результирующая скорость при движении поперек реки



другой вариант движения. Они могли бы грести 1 км поперек от одного берега до другого, а затем обратно. Однако здесь также происходила бы потеря времени. Чтобы устранить боковое отклонение, они должны были бы направить лодку под углом к направлению течения, причем так, чтобы результирующая скорость была перпендикулярна обоим берегам. Тем самым скорость уменьшалась бы (см. рис. 109) до значения  $\sqrt{15^2 \text{ км}^2/\text{час}^2 - 5^2 \text{ км}^2/\text{час}^2} = 14,14 \text{ км/час}$ . Время, затраченное гребцами при движении в оба конца, было бы тогда  $\frac{2 \text{ км} \cdot 60 \text{ мин}}{14,14 \text{ км}} = 8,5 \text{ мин}$ ; это все же на полминуты выгоднее, чем при движении вдоль реки.

### Опыт Майкельсона

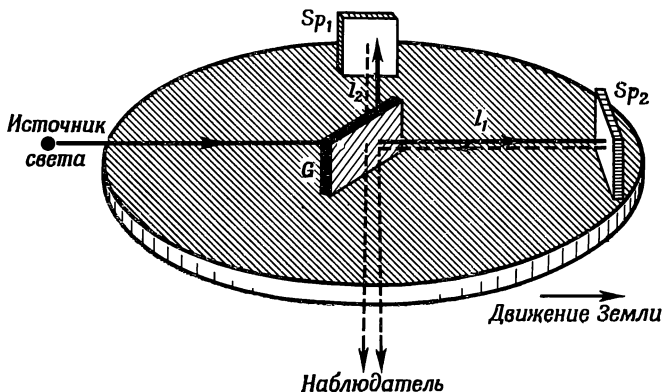
История с лодкой — это типичный пример того, как с давних пор в классической физике излагали вопрос об относительном движении. Точно так же надо принимать его в расчет и сегодня, если речь идет об обычных скоростях, существующих в повседневной жизни и технике.

Однако здесь перед нами возникает еще одна проблема, которую лучше всего было бы рассматривать и решать при помощи того же метода гребной лодки. Речь снова пойдет о старом предмете забот физики — о свете. Он распространяется в виде волн. Если эти волны действительно

существуют — а эта мысль так понятна и естественна, — то тогда должна существовать и среда, в которой распространяются эти волны, подобно тому как звук — это колебания воздуха, а волны, набегающие на берег, — это колебания воды. Но так как свет распространяется также и в вакууме, надо найти что-то такое, что в качестве несказанно тонкой и, разумеется, невесомой среды наполняет собой все пространство. Раньше предполагали, что это волшебное вещество заполняет все от промежутков между атомами до недр звезд; его называли *эфиром*. Тогда можно было легко объяснять природу света. Мельчайшие частицы эфира легко приходят в движение, и колебания эфира разносят свет повсюду, куда только пожелаешь. Кроме того, этот эфир заполнил бы еще один пробел в науке. В случае если бы он стоял в пространстве без движения, как воздух в закрытой комнате, тогда физики нашли бы, наконец, желанную неподвижную систему отсчета, по которой можно было бы определять абсолютные значения всех скоростей. Если только подумать, как быстро несется Земля вокруг Солнца, мы услышали бы, как эфирный ветер прямо-таки свистит вокруг Земли.

Но физики не имеют обыкновения хранить в неприкосновенности изобретенную гипотезу, а стремятся экспериментально проверить, правильна она или нет. Едва ли еще один эксперимент в истории физики привлекал такое внимание и вызвал такую цепь последствий, как опыт американца Майкельсона. В 1881 г. он предпринял попытку установить реальность эфирного ветра. Майкельсон заставил луч света падать на стоящую наклонно слегка посеребренную стеклянную пластинку  $G$  (рис. 110), которая расщепляла его на два луча. Один падал на зеркало  $Sp_1$  и, отразившись от него, снова падал на пластинку  $G$ . Второй луч шел перпендикулярно первому лучу, проходя сквозь стекло  $G$ . Он падал на зеркало  $Sp_2$  и затем возвращался к пластинке  $G$ . Здесь оба луча снова соединялись и направлялись в интерферометр высшей точности. Оба плеча  $l_1$  и  $l_2$  были строго равны по длине, а весь смонтированный на каменной плите аппарат плавал в ванне, наполненной ртутью, чтобы устранить малейшую вибрацию.

Если одно из плеч  $l_1$  прибора ориентировалось в направлении вращения Земли, то свет должен был перемещаться один раз «по течению», а второй раз «против течения»

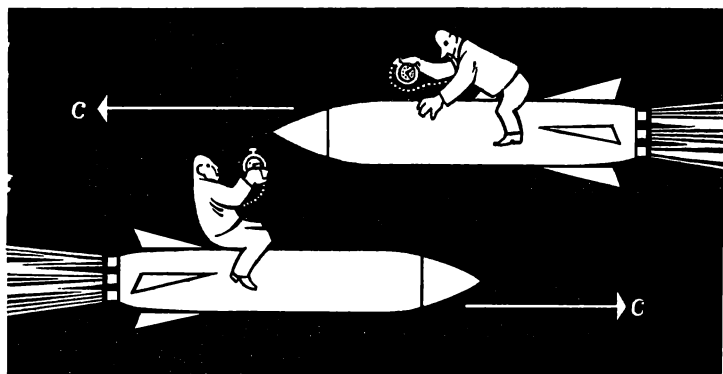


Р и с. 110. Принцип опыта Майкельсона.

гипотетического эфира. В плече  $l_2$ , расположенном перпендикулярно потоку, свет дважды пробегал поперек течения эфира. Итак, налицо были точно такие же условия, как и для нашей гребной лодки на Эльбе. Свет — это та лодка, которая плыла туда и обратно, а эфир — текущая вода. Различие во времени, поскольку оно здесь крайне мало, нельзя было измерить с помощью секундомера. Чувствительным элементом в данной установке была система интерференционных полос, образующихся при сложении обоих лучей. Интерференционная картина должна меняться при малейшем различии во времени пробега лучей. Если всю установку повернуть на  $45^\circ$ , оба плеча будут находиться под углом  $45^\circ$  к эфирному ветру, и при этом разница во времени пробега лучей должна исчезнуть. Если принять орбитальную скорость Земли  $v = 30 \text{ км/сек}$  и скорость света  $c = 300\,000 \text{ км/сек}$ , то смещение полос оказалось бы равным примерно половине длины волны. При повороте на  $90^\circ$  надо ожидать смещения на целую длину волны. При достаточной точности приборов этот эффект можно было бы легко заметить.

Но сколько ни вращали такую установку, интерференционные полосы и не думали менять свое положение; они лишь показывали ничтожные колебания, присущие самой аппаратуре. Был ли опыт неудачен? Наоборот! Он наглядно доказал, что свет имеет всегда одну и ту же скорость, совершенно независимо от того, как движется система отсчета, в которой эту скорость измеряют.





Р и с. 111. Два тела, летящие навстречу друг другу со скоростью света, имеют относительную скорость  $c$ .

Более поздние опыты, повторявшиеся вплоть до 1930 г. с многократными видоизменениями, привели к тем же самым результатам. Если двигаться навстречу световому лучу со скоростью  $v$ , то скорость света получается не в виде классической относительной скорости  $c + v$ , а по-прежнему равна  $c$ . Если перемещаться в том же направлении, что и свет, то получается не  $c - v$ , а опять-таки только  $c$ . И два встречных световых луча проносятся друг мимо друга не с относительной скоростью  $2c$ , как это бывает с двумя автомобилями на шоссе, а все с той же скоростью  $c$  (рис. 111)! Преобразование Галилея пригодно только для относительно малых скоростей  $v$ . При очень больших значениях  $v$  оно становится все более неточным и окончательно «отказывает», если скорость  $v$  приближается к скорости света  $c$ .

### Специальная теория относительности

Работа, которую опубликовал в 1905 г. в журнале «Анналы физики» 25-летний Альберт Эйнштейн, насчитывала не более 30 страниц. Она носила заглавие «К электродинамике движущегося тела» и содержала суть его специальной теории относительности, ставшей потом такой знаменитой. Эйнштейн пришел к убеждению, что крушение теории эфира не только поставило физику в затруднительное положение, но и указало единственный выход

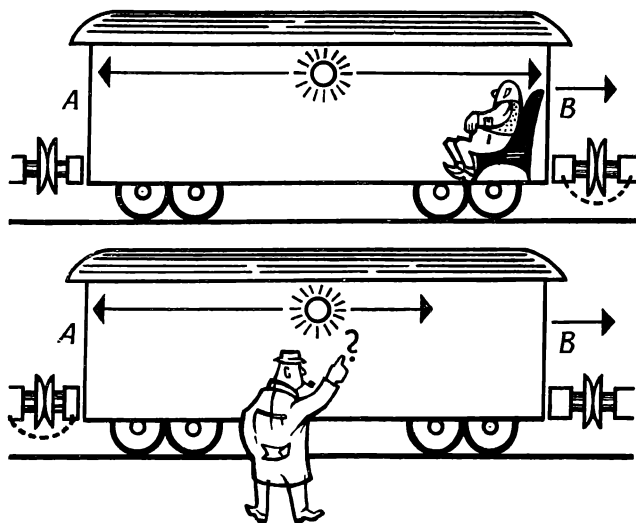
из него. Для этого надо было исправить издавна укоренившиеся взгляды на пространство и время, так как они пришли в явное противоречие с опытом. Из этого опыта науке надо было взять только два постулата, в правильности которых мы теперь твердо уверены:

1. Во всех системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, господствуют одинаковые законы природы.

2. Скорость света имеет всегда одно и то же значение независимо от системы отсчета; она является поэтому абсолютной природной константой.

Первый из этих тезисов, это уже известный со времен Галилея классический принцип относительности, второй содержит результат опыта Майкельсона. Какие трудности для рассуждения могут возникнуть, если мы захотим применить оба закона о д н о в р е м е н н о, лучше всего показывает пример, который привел сам Эйнштейн.

Пусть в середине одного из вагонов поезда, идущего равномерно и прямолинейно, зажгли лампу (рис. 112). Световые лучи распространяются во все стороны с одинаковой скоростью, так как, согласно постулату 1, свет



Р и с. 112. Распространение света, наблюдаемое из движущейся и покоящейся систем отсчета.

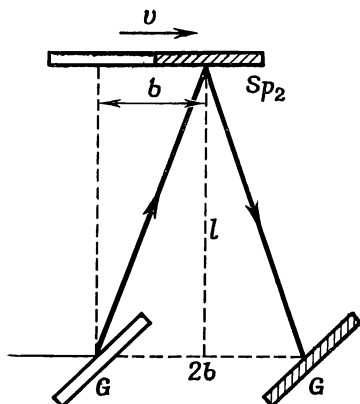
в движущемся поезде ведет себя точно так же, как и в неподвижном. Поэтому пассажир в вагоне увидит, что свет одновременно достигнет передней и задней стенок вагона.

Но человек, стоящий на насыпи, приходит к другому выводу. Правда, скорость света, согласно постулату 2, имеет для него то же самое значение, как и для пассажира в вагоне. Не играет роли, движется или стоит источник света в момент включения, так как классический принцип сложения скоростей не пригоден для света. Но наблюдатель на насыпи заметит, что свету нужно определенное время, чтобы достичь передней стены  $B$  вагона. А в это время вагон немного продвинется вперед. Поэтому свет пройдет большее расстояние и достигнет передней стены  $B$  немного позже. И наоборот, задняя стена  $A$  за то время, пока свет будет в пути, немного приблизится к первоначальному местонахождению лампы и поэтому раньше будет залита светом. Короче, человек на насыпи увидит, что сначала будет освещена задняя стенка  $A$  и несколько позже передняя стенка  $B$  вагона. Оба события, если смотреть с его точки зрения, происходят не одновременно.

Отсюда следует, что два события, которые совершаются одновременно в одной системе отсчета, не подчиняются этой закономерности в другой системе, движущейся равномерно по отношению к первой. Этот непонятный и парадоксальный результат можно объяснить, если вместе с Эйнштейном принять, что оба наблюдателя применяют для измерения времени различные масштабы. Таким образом, не существует не только абсолютного движения, но и абсолютного времени. Не существует мировых часов, которые тикают где-то в космосе и торжественно объявляют всем светилам, какая секунда сейчас идет. Каждая система отсчета имеет свой собственный ход времени.

### Замедленное время

Поэтому, рассматривая любой процесс в природе, мы должны применять оба постулата, сформулированные на стр. 201 не отдельно друг от друга, но всегда совместно. С опытом Майкельсона мы до сих пор знакомимся несколько односторонне. Давайте займемся им подробнее. Вместе с прибором и Землей мы летим сквозь мировое пространство и тем самым находимся в одной движущейся системе



Р и с. 113. К расчетам в опыте Майкельсона.

отсчета. Время пробега светового луча от наклонно стоящей пластинки  $G$  до зеркала  $Sp_2$  и обратно определяется как частное от деления пути на скорость

$$t = \frac{2l}{c}; \quad (a)$$

здесь  $t$ , разумеется, означает время, прошедшее в нашей движущейся системе отсчета!

А как будет выглядеть этот опыт, если мы мысленно перенесемся в другую систему отсчета, неподвижную по отношению к первой, и будем рассматривать процесс движения луча извне?

От пластинки  $G$  луч направляют к зеркалу  $Sp_2$ . В то время как свет находится в пути, это зеркало, подобно только что рассматриваемой передней стенке железнодорожного вагона, продвинется дальше на отрезок  $b$  (рис. 113). Весь дополнительный отрезок пути до прибытия луча обратно к  $G$  равен

$$2b = vt_0. \quad (6)$$

Но теперь под  $t_0$  мы должны понимать то время, которое протекло в нашем н е п о д в и ж н о м наблюдательном пункте. Будет ли оно равным времени  $t$ , измеренному в движущейся системе, или нет, мы сейчас выясним.

Чтобы снова вернуться к пластинке  $G$ , свет должен двигаться теперь по наклонной. Он должен пройти

не короткий отрезок  $l$ , а более длинный  $\sqrt{l^2 + b^2}$ . Путь туда и обратно займет время

$$t_0 = \frac{2\sqrt{l^2 + b^2}}{c}. \quad (\text{в})$$

Теперь, чтобы установить, в каком отношении друг к другу находятся оба промежутка времени  $t$  и  $t_0$ , подставим в выражение (в) из (а)  $l = ct/2$  и из (б)  $b = vt_0/2$  и получим <sup>1)</sup>

*релятивистский эффект замедления времени:*

$$t_0 = \frac{t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (76)$$

где для краткости отношение  $v/c$  обозначено буквой  $\beta$ .

Поэтому для наблюдателя, который находится в покоящейся системе, промежуток времени  $t$ , замеренный в движущейся системе отсчета, должен иметь другое значение  $t_0$  (рис. 114). И этот промежуток времени  $t_0$  должен, согласно формуле (76), быть больше, чем промежуток  $t$ , так как подкоренное выражение представляет собой число, в любом случае меньшее 1 (см. таблицу на стр. 207).

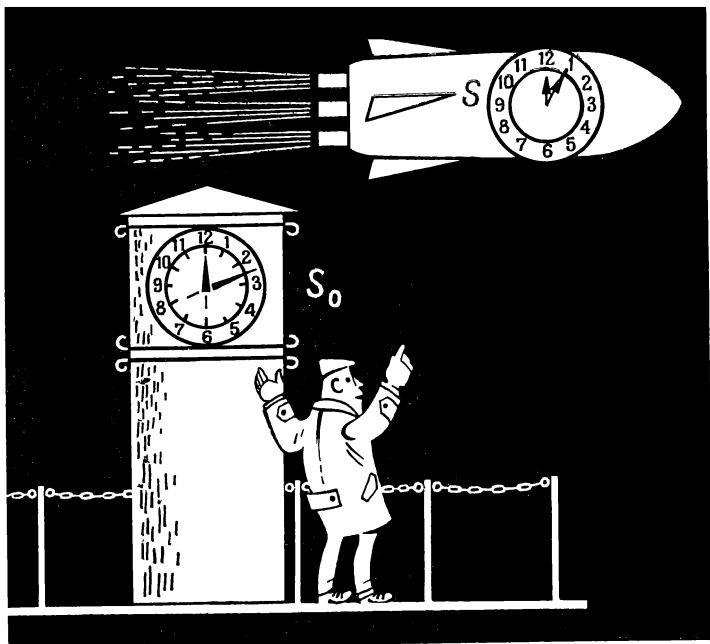
Чтобы понять, что это означает на практике, представим себе мчащийся по шоссе автомобиль. Пусть у шофера есть часы, по которым он определяет, что километр он проехал, скажем, за  $t = 6$  сек. Стоящий на обочине шоссе наблюдатель тоже измеряет время, затраченное автомобилем, чтобы проехать 1 км, и получает  $t_0$ . Этот промежуток времени будет б о л ь ш е; допустим, что  $t_0 = 10$  сек <sup>2)</sup>. Человек на обочине должен тогда, если только он хоть немного в здравом уме, сделать следующее разумное заключение: часы у шофера отстают, они идут слишком медленно. Но затем после долгих споров и строгой проверки оказывается, что в состоянии покоя и те и другие часы полностью в порядке и идут абсолютно безошибочно

---

1) После подстановки получаем  $t_0 = 2\sqrt{\left(\frac{ct}{2}\right)^2 + \left(\frac{vt_0}{2}\right)^2}$  и после соответствующего упрощения  $c^2 t_0^2 = c^2 t^2 + v^2 t_0^2$ . Отсюда следует

$$t_0^2 = \frac{c^2 t^2}{c^2 - v^2} = \frac{t^2}{1 - (v/c)^2} \quad \text{или} \quad t_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

2) Далее мы увидим, что это сильно преувеличено.



Р и с. 114. Замедление времени.

и синхронно. Тогда остается только последнее предположение, которое определенно может иметь самые отчаянные последствия. В этом виноваты не часы, а с а м о в р е м я! Тот же самый процесс, который в движущейся системе продолжается 6 сек, в покоящейся системе занимает 10 сек. Наблюдателю на обочине шоссе все происходящее в автомобиле кажется замедленным, как при специальной киносъемке. Поэтому-то такой процесс и называют замедлением времени.

Таким образом, взаимодействие двух систем отсчета функционирует как машина, растягивающая время. В то время как человек на обочине становится старше на 10 сек, для шофера проходит только 6 сек. Сэкономленные секунды он может использовать, например, для того, чтобы спокойно зажечь сигарету, словом, он живет дольше!

Однако замедление времени не связано с наличием карманных часов. Вообще говоря, часы представляют собой

один из многих возможных приборов, в которых происходит периодически повторяющийся процесс, и этот процесс механически отсчитывается. Совсем не обязательно наличие колесиков, которые связаны тонкими пружинками и ритмически колеблются туда и сюда. Все другие процессы в движущихся системах, если смотреть из неподвижного наблюдательного пункта, протекают замедленно.

В этом можно убедиться, наблюдая любой физический, химический или биологический процесс, течение которого можно проследить при помощи какого-либо прибора, измеряющего время. Поэтому движущийся наблюдатель никогда сам не может установить замедление времени до тех пор, пока он находится в своей системе отсчета, так как все процессы, которые он может использовать для сравнения, замедляются в том же самом темпе: удары его сердца, рост его бороды и, без сомнения, его ощущение времени. Для него все остается по-старому, и не существует ни малейшего намека на то, что могло бы ему объяснить изменение в масштабе времени.

### Движущиеся мезоны

Не будет ничего удивительного, если сказанное в конце предыдущего раздела вызовет у некоторых читателей сомнения в правильности теории относительности. Впрочем, такие сомнения только желательны. В самом деле, должен показаться крайне подозрительным тот факт, что эффект, основанный на таком опрокидывающем все наши привычные представления понятии, как замедление времени, еще не мог наблюдать ни один человек. Это станет, однако, сразу же понятным, если мы сделаем несколько вычислений по формуле (76). Тогда окажется, что замедление времени при существующих в повседневной жизни и технике скоростях настолько незначительно, что оно вообще не может играть никакой практической роли. Даже для реактивного самолета, который движется со скоростью, вдвое превышающей скорость звука, оно составляет только две триллионных ( $2 \cdot 10^{-12}$ ) секунды! Никакие часы не в состоянии зарегистрировать такую разницу во времени.

Но если мы примем, что тело движется со скоростью, составляющей 80% от скорости света  $c$ , тогда уже

$t_0 = 1,67 t$ <sup>1)</sup>. 6 сек в этой движущейся системе соответствуют 10 сек в неподвижной системе. Это как раз то соотношение времени, которое мы произвольно принимали в нашем примере на стр. 204. Теперь мы видим, что такого явления не сможет наблюдать ни один шофер.

Так как коэффициентом  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  приходится пользоваться довольно часто, хорошо бы всегда иметь под рукой его значения. Из следующей таблицы видно, что замедление времени начинает играть некоторую практическую роль только при скоростях, превышающих половину скорости света, а становится вполне ощутимым, когда скорость рассматриваемой системы отсчета очень близка к скорости света. Для тела, которое само движется

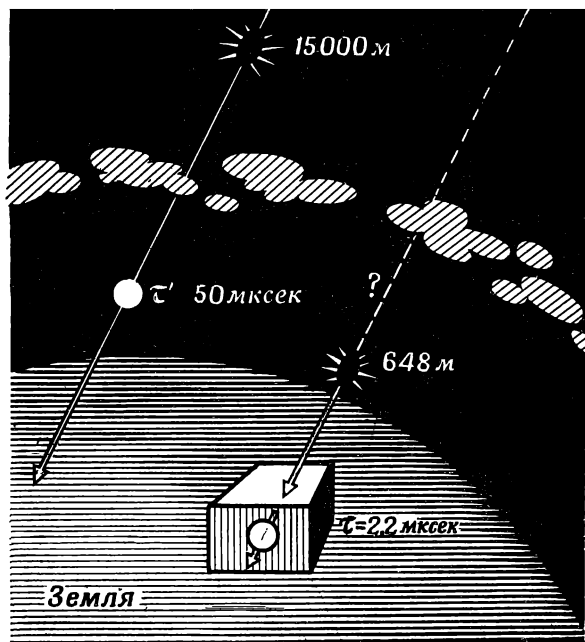
$\frac{v}{c}, \%$ ( $c=300\ 000$ км/сек)	$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$
0	1,000	1,000
10	0,995	1,005
50	0,866	1,155
80	0,600	1,667
86,6	0,500	2,000
90	0,436	2,294
99	0,141	7,09
99,5	0,0999	10,01
99,9	0,0447	22,36
99,99	0,0141	70,71
99,999	0,00447	223,6
99,9999	0,00141	707,1
100	0	$\infty$

со скоростью света,  $v = c$ , откуда  $t_0 = \infty$ . Если смотреть с покоящегося наблюдательного пункта, время на этом мчащемся теле замерло бы, или, другими словами, понятие времени потеряло бы на таком теле всякий смысл.

При всех трудностях, которые, казалось бы, стоят на пути любого экспериментального доказательства замедле-

$$1) t_0 = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = \frac{t}{\sqrt{1 - 0,64}} = \frac{t}{0,6} = 1,67t.$$





Р и с. 115. Увеличение времени жизни распадающегося  $\mu$ -мезона.

ния времени, имеется все же по меньшей мере один решающий эксперимент, который устраняет все сомнения в реальности этого понятия. Мы уже узнали на стр. 183, как определяют среднюю продолжительность жизни  $\mu$ -мезона, наблюдая его распад в свинцовой плите. Незадолго до своего распада мезон тормозится в ней так сильно, что его можно практически рассматривать как покоящийся. А в свободной атмосфере, перед входом в измерительную аппаратуру, он летит со скоростью, близкой к скорости света. Итак, если принять, что средняя продолжительность его жизни составляет  $\tau = 2,16 \text{ мксек}$ , он может за это время пройти очень короткий отрезок пути  $s \cdot \tau = 2,16 \cdot 10^{-6} \text{ сек} \cdot 10^8 \text{ м/сек} = 648 \text{ м}$  (рис. 115).

Этот результат находится в явном противоречии с тем фактом, что мезоны проходят в атмосфере путь во много километров. Они никогда не могли бы достичь земной поверхности и должны были уже на больших высотах погибнуть. Но из двух множителей  $s$  и  $\tau$  ошибочным может

быть только один — средняя продолжительность жизни мезона. И теория относительности сразу дает правильный ответ. Распадающийся  $\mu$ -мезон — это часы, единственные в своем роде, которые тикают в своей жизни только один раз. Вследствие своей скорости, близкой по значению к скорости света  $c$ , эти часы идут во время движения значительно медленнее, чем в заторможенном состоянии. Как доказано большим числом наблюдений, проведенных в горах на различных высотах, это увеличение продолжительности жизни точно соответствует формуле (76). Поэтому с полным правом можно сказать, что явление замедления времени так же реально, как и сила тяжести.

Оно — не искусный фокус, показанный при помощи хитроумных расчетов, а основывается на законе природы, в котором ничего нельзя изменить.

### Сокращение длин

Вернемся, однако, еще раз к эксперименту с автомобилем, при помощи которого мы объясняли себе действие замедления времени. Для водителя автомобиля время поездки сокращается в  $\sqrt{1-\beta^2}$  раза. Поскольку используемые им часы идут, по его мнению, вполне нормально, ему намного ближе будет другое объяснение опыта. Он может с полным правом сказать: «Мои часы идут правильно, за это я ручаюсь! Это изделие первой классной фирмы и гарантийный срок далеко еще не истек. Следовательно, вполне может быть, что расстояние между километровыми столбами не соответствует знакам на них. В то время, пока я еду мимо, они каким-то, правда, непонятным мне образом становятся ближе друг к другу. Тогда совершенно ясно, что измеряемое мною время должно получиться более коротким».

Теория Эйнштейна не может не признать правоту шофера в данном случае. Абсолютные размеры тела также не существуют, как и абсолютное время. Не только время, но и длина предмета — понятие относительное. Оба параметра зависят от относительной скорости, которую имеют две системы отсчета одна относительно другой, но для каждой такой пары систем отсчета всегда можно принять, что одна из них находится в состоянии покоя. Безразлично, какую из них мы выберем. У едущего в автомобиле создается впечатление, что километровые столбы

только проносятся мимо него, в то время как он сам спокойно сидит в кресле. Также и с точки зрения физики абсолютно ничего не изменится, если принять автомобиль за покоящуюся систему, а цепь километровых столбов за движущуюся. Обозначим расстояние между столбами через  $l$ . Для водителя автомобиля оно сокращается до значения  $l_0$ . Это явление называют *сокращением длин*.

*Релятивистское сокращение длины*

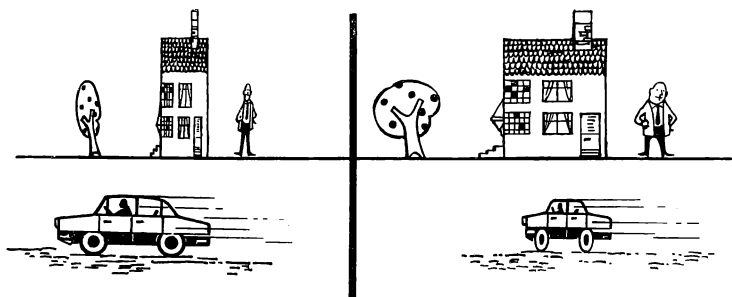
$$l_0 = l \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (77)$$

Но человек на обочине, приглядевшись повнимательней, также замечает что-то странное: автомобиль сжимается как гармошка в направлении движения (рис. 116)! Дело в том, что вся теория относительности основывается на взаимозаменяемости систем отсчета. Поэтому ни об одном предмете в этом мире, даже об эталоне метра, хранящемся в палате мер и весов, нельзя утверждать, что он обладает абсолютной длиной.

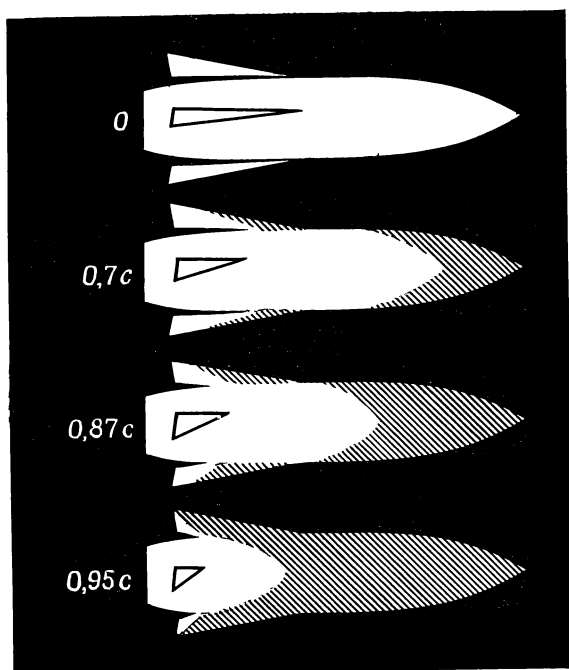
До Эйнштейна о существовании этого изменения длины уже высказал предположение голландец Лоренц в 1882 г., почему оно и было названо лоренцовым сокращением. Лоренц пришел к этому выводу, когда он пытался объяснить опыт Майкельсона. Он предположил, что одно из оптических плеч прибора, а именно совпадающее с направлением движения Земли, должно сокращаться так, как если бы его длину умножили на коэффициент  $\sqrt{1 - \beta^2}$ . Однако только Эйнштейн установил связь этого явления со всеми остальными частями своей всеобъемлющей теории.

Взглянув на таблицу на стр. 207, мы снова убедимся, к нашему успокоению, что сокращение длин в обычной жизни не играет никакой роли и только при скоростях, сравнимых со скоростью света, оно проявляется достаточно заметно (рис. 117). Самый «худший» случай, если тело движется со скоростью света. Тогда  $\beta = c/c = 1$  и подкоренное выражение равно нулю. В этом случае из неподвижного наблюдательного пункта тело должно казаться сжатым в направлении движения до бесконечно тонкой пластинки (если бы только, конечно, была возможность сообщить ему эту скорость!).

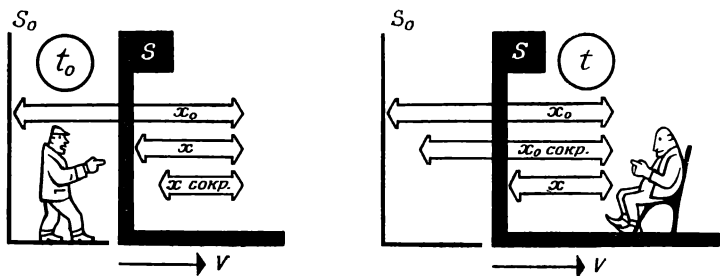
После того, как мы попытались разобраться в изменениях длины и времени при движении, можно сделать



Р и с. 116. Сокращение длин при наблюдении из двух различных наблюдательных пунктов.



Р и с. 117. Величина сокращения длины при приближении к скорости света.



Р и с. 118. К объяснению преобразования Лоренца.

осторожную попытку представить эти соотношения несколькими уравнениями. Чтобы описать простым классическим способом положение некоторой точки в двух системах, равномерно движущихся одна относительно другой, необходимо использовать уравнение преобразования Галилея (75), о котором мы уже говорили на стр. 194:

$$x = x_0 - vt.$$

Принимая во внимание то обстоятельство, что расстояние  $x$  в движущейся системе сокращается, следует написать:

$$x \sqrt{1 - \beta^2} = x_0 - vt_0. \quad (78)$$

Также ясно, что вместо  $t$  надо подставить  $t_0$ , поскольку в данном случае измерение времени соответствует покоящейся системе. Если смотреть из этой системы, то расстояние  $x$  становится короче в результате сокращения длины. По аналогии с преобразованиями Галилея формула (78) называется *преобразованием Лоренца*.

На рис. 118 схематически показано, как система  $S$  удаляется от наблюдателя. Замеренная в движущейся системе, координата  $x$  точки, неподвижной по отношению к наблюдателю, кажется ему меньше. Эта координата стоит в левой части равенства (78).

Но теперь мы изменим наш наблюдательный пункт и представим себя находящимися в движущейся системе  $S$ . Если взять за основу обычное преобразование Галилея, то при этом не останется ничего другого, как воспользоваться равенством (75) в виде  $x_0 = x + vt$ , потому что от изменения пункта нашего наблюдения  $x_0$ ,  $x$  и  $t$  не изменились, и нет никакого повода сомневаться в надежности применяемого масштаба. Однако дело обстоит не так

просто, если применить соответствующее преобразование Лоренца. В этом случае, при наблюдении из пункта  $S$  будет сокращаться расстояние  $x_0$ , а зато расстояние  $x$  останется неизменным. Кроме того, нельзя больше применять измерение времени, соответствующее системе  $S_0$ , а только то, которое удовлетворяет системе  $S$ . Итак, в исправленном виде равенство  $x_0 = x + vt$  запишется так:

$$x_0 \sqrt{1 - \beta^2} = x + vt. \quad (79)$$

Продолжение таких рассуждений должно привести к результатам, которые не будут содержать никаких противоречий с опытом. С другой стороны, эти формулы снова превращаются в преобразования Галилея, если рассматривать медленно движущиеся тела. Классические формулы являются поэтому не ошибочными, но пригодными только в предельном случае, а именно тогда, когда речь идет о скоростях, намного меньших скорости света. Об этом можно сразу судить по тому, что подкоренное выражение  $\sqrt{1 - \beta^2}$  почти равно единице, если дробь  $\beta = v/c$  очень мала. Кроме того, тогда излишне делать различие между двумя временными масштабами  $t_0$  и  $t$ .

### Прирост массы

Расстояние и время при различных физических процессах непрерывно связаны с массой. Не существует «времени самого по себе». Оно не маячит над вещами как призрак с угрожающе поднятой косою, чтобы со злобным оскалом управлять миром. Понятие времени имеет смысл только в тесной связи с материей. Эта взаимная связь между длиной, временем и массой приводит нас к выводу, что масса  $m$  тела не является абсолютно неизменной величиной. Применяя свою теорию к динамике движущегося тела, Эйнштейн нашел

*релятивистский прирост массы*

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (80)$$

Согласно этой формуле, масса  $m_0$  тела, движущегося со скоростью  $v$ , соответствующим образом возрастает, если смотреть из неподвижного наблюдательного пункта.

При этом индексом  $m_0$  обозначают *массу покоя*; *масса движущегося тела*  $m$  будет идентична массе покоя, если скорость тела очень мала по сравнению со скоростью света  $c$ . А именно тогда  $\beta = v/c$ , а тем более  $\beta^2$ , представляет собой настолько малое число, что им можно пренебречь по сравнению с 1 и считать  $m = m_0$ .

Однако уже сегодня существует отрасль техники, которая должна всерьез учитывать этот прирост массы. В ускорителях, применяемых для исследований в ядерной физике, протоны, электроны и другие частицы приобретают такие большие скорости, что прирост их массы, точно рассчитанный по формуле (80), надо тщательно учитывать при строительстве и обслуживании ускорителей, чтобы эти установки вообще могли функционировать. Если сообщить телу скорость света  $c$ , то его масса станет бесконечно большой, так как знаменатель в формуле (80) в этом случае будет равен нулю. Но это потребовало бы также бесконечно большой затраты энергии, что, разумеется, невозможно ни технически, ни физически. Отсюда опять-таки следует, что ни одно тело не может двигаться со скоростью света.

Подлинный переворот в мышлении совершило, однако, последнее уравнение, которое вывел Эйнштейн из своей теории. Это соотношение «масса — энергия»  $E = mc^2$ . В 1906 г. Эйнштейн сам еще смутно понимал, какое значение оно будет когда-нибудь иметь. Он писал: «Не исключено, что у веществ, содержание энергии в которых можно изменять в высокой степени (например, у солей радия), удастся провести испытание теории».

### Космическое путешествие с точки зрения теории относительности

Результаты специальной теории относительности реальны в той же степени, как и удивительны. Едва ли другие открытия современной физики так окрылили фантазию и вызвали столько предсказаний неожиданных возможностей развития науки и техники. Этому же способствуют колоссальные успехи космических полетов, которые дают основания к дальнейшим смелым прогнозам. Нет абсолютно никаких сомнений в том, что радиус действия, грузоподъемность и надежность космических кораблей будут все больше возрастать. Однако если говорить об исследо-

вании гипотетических планет других звезд, то мы прежде всего наталкиваемся на трудность: звезды удалены от Земли на расстояние в десятки и даже сотни световых лет. Время путешествия туда будет бесспорно очень долгим, оно намного превысит продолжительность жизни одного человека.

Но мысль не знает границ и очень быстро находит спасительный выход. Нужно только создать ракету, способную развивать достаточно большую скорость. Так как скорость света недостижима, придется удовлетвориться, скажем 99,5% ее значения. Тогда путешественники будут пользоваться всеми благами замедления времени. Так как все процессы в этом космическом корабле протекают в 10 раз медленнее (см. таблицу на стр. 207), то время путешествия на ближайшую к Земле звезду Проксима Центавра, составляющее по земным масштабам около 40 лет, продолжалось бы для пассажиров ракеты только 1 год. При их возвращении на Землю они нашли бы, конечно, что люди, оставшиеся там, постарели на 20 лет. Это было бы не так уж плохо, если бы вся идея не имела одного слабого места.

Дело в том, что не существует ракетных топлив, посредством которых можно было бы достичь околосветовой скорости, так как в этом случае скорость истечения газов должна быть очень близкой к скорости света. Здесь есть только одна возможность: продукты сгорания топлива должны покидать сопло двигателя не в виде газов, а в виде квантов излучения, которые сами обладают скоростью света. Так как кванты электромагнитного излучения называют также фотонами, речь идет таким образом о создании *фотонной ракеты*. Но каким образом можно получить эти фотоны?

Максимальная теоретическая граница, до которой можно превращать массу в энергию излучения путем ядерной реакции, составляет менее 1%. На стр. 157 мы уже рассчитали дефект массы при синтезе гелия из водорода и нашли, что он составляет  $\frac{0,03}{4,03} = 0,75\%$ . Но фотонное

топливо должно обеспечивать стопроцентное превращение массы в энергию, иначе соотношение между массой ракеты на старте и ее массой без топлива (стр. 29) будет еще хуже, чем на современном уровне техники. Подсчитано, что при ядерной реакции такого рода, даже в случае исполь-



зования возникающих естественных продуктов реакции, достижимы всего несколько десятых долей скорости света, что не дает никакой выгоды с точки зрения замедления времени.

Все же единственный выход заключается пока что в полном излучении элементарных частиц, которые можно наблюдать в отдельных случаях. Для этого нужно везти с собой колоссальный запас «топлива», например, положительных протонов и отрицательных антипротонов. Взаимодействуя друг с другом, они «аннигилируют», и за счет этого возникает богатое энергией  $\gamma$ -излучение. Согласно закону сохранения количества движения, в каждой паре квантов направление их движения противоположно, так что теперь перед нами возникает щекотливый вопрос, как этим фотонам придать единое направление. Кроме того, при сегодняшнем состоянии ядерной техники необходимо по меньшей мере  $10^6$  протонов, чтобы произвести один единственный антипротон. Нужны многие миллиарды лет, чтобы на одной из существующих сегодня больших ускорительных установок получить всего 1  $\bar{p}$  антипротонов. Разумеется, все отдельные вопросы, связанные с техническим осуществлением этого проекта, остаются пока что без ответа.

Таким образом, очень легко выдвигать различные утопические проекты и грандиозные идеи. Возражения против их практического осуществления также можно довольно легко рассеять убедительным аргументом, что, мол, многие сегодняшние знания и достижения считались раньше абсолютно невозможными. Но если изготовление фотонной ракеты и осуществление путешествия на ней к другим звездам когда-нибудь станет возможным, то, во всяком случае, известные сегодня физические явления и законы недостаточны для этого. Можно надеяться, что успеху в данной области будут способствовать новые открытия. Не надо терять оптимизма!

Не следует забывать и об опасностях, которые связаны с путешествием с околосветовой скоростью. Как это обстоятельно изложил советский ученый профессор Рытов, основная опасность заключается в огромной энергии, освобождающейся при столкновениях космического корабля с микрометеорными телами, частицами космической пыли и межзвездным водородом. При  $v = 260\,000$  км/сек столкновение с частицей массы 1 мг освобождает энер-

гию в 21 млрд. калорий<sup>1)</sup>, которой достаточно, чтобы мгновенно превратить в пар 10 м<sup>3</sup> железа. Даже самый прочный материал не в состоянии противостоять такой катастрофе!

Еще более непосредственным и уничтожающим было бы действие межзвездного водорода. Если ракета летит со скоростью  $v = 260\,000$  км/сек, то скорость атомов водорода относительно ракеты имеет ту же величину, а их энергия, определяемая этой скоростью, равна  $10^9$  эв, т. е. такая же, как и у космических лучей. При плотности межзвездного водорода 1 атом/см<sup>3</sup> (стр. 162) получилась бы, по расчету проф. Рытова, атака  $10^{10}$  частичек на 1 см<sup>2</sup> в 1 сек. Это излучение, которое в 10 миллиардов раз больше естественного уровня, мгновенно убило бы все живое на космическом корабле, даже если бы удалось предотвратить связанные с предыдущим процессы разрушения и сгорания корабля.

---

<sup>1)</sup> При  $v = 260\,000$  км/сек данная масса покоя  $m_0 = 1$  мг удваивается:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{2,6}{3}\right)^2}} = \frac{m_0}{0,5}.$$

При столкновении будет освобождаться количество энергии, которое требуется для образования этого прироста массы, т. е.  $W = mc^2 = 10^{-6}$  кг  $\cdot$   $32 \cdot 10^{16}$  м<sup>2</sup>/сек<sup>2</sup> =  $9 \cdot 10^{10}$  н  $\cdot$  м (вт  $\cdot$  сек) =  $21,5 \cdot 10^9$  кал.

# ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

## Галактики

Охватить мысленным взором весь мир, постичь его строение — эта задача уже стоила человечеству колоссального труда, а впереди — еще большая работа. С одной областью знаний мы пытаемся познакомиться. Она простирается от изучения элементарных частиц, из которых состоит вещество, до исследования строения всей нашей Галактики. Каждый шаг вперед, от малого к большому, позволяет познавать, так сказать, ступенчатое строение материи. Путь пролегает от элементарного к сложному, и всё элементарное встречается снова и снова, но каждый раз на более высокой ступени. Мы видели, как тесно законы ядерной физики и теории относительности связаны с проблемами, встречающимися при изучении космоса. Не зная аксиом Ньютона, мы не можем понять движение небесных тел; без теории строения атома решающие процессы в звездах оставались бы для нас полнейшей загадкой.

Но процесс познания еще далеко не закончен. Сегодня мы не можем с уверенностью сказать, в какой области физики произойдет следующий, еще больший скачок к качественно новым представлениям о материи и к каким изменениям в нашей привычной картине мира это приведет. Очень многие пока что любовно оберегаемые теории могут когда-нибудь устареть.

Но что никогда не изменится, так это факты, наблюдения и результаты измерений, выраженные в числах и таблицах, полученные на лентах самописцев и фотографических пластинках. И прежде чем перейти к одному из самых удивительных явлений, которое в последние десятилетия дало повод для особенно смелых, но не всегда надежных заключений о свойствах мира, мы вкратце расскажем, как устроена известная нам в настоящее время часть Вселенной.



Р и с. 119. Туманность Андромеды.

Мы уже знаем, что наше Солнце с системой планет является одной из примерно 100 млрд. звезд, населяющих Галактику. Это, по нашим земным понятиям, гигантское образование парит в пространстве как своеобразный «остров Вселенной» и издали должно выглядеть как туманное сгущение со следами спиральной структуры. Кроме этой звездной системы, существуют еще другие, которые в некоторых деталях очень на нее похожи. Их называют *галактиками* (с маленькой буквы), хотя под словом «галактика» первоначально понимали только нашу собственную систему. Одну из таких галактик можно видеть невооруженным глазом как слабое туманное пятнышко на северном небе. Это — туманность Андромеды. Она имеет форму утолщенного в середине диска со спиральными рукавами и очень похожа на нашу Галактику (рис. 119). Из-за формы ее называют *спиральной туманностью*. Ее размеры, светимость, масса и период вращения тоже кажутся во многом совпадающими с соответствующими параметрами нашей Галактики. Масса туманности Андромеды равна 250 млрд. солнечных масс, расстояние до нее оценивается в 2 млн. св. лет. Таким образом, туманность Андромеды является самым удаленным объектом из всех, которые мы можем видеть невооруженным глазом.

Вы, наверное, вспоминаете, что мы уже встречали термин «туманность», когда говорили о бесформенных скоплениях межзвездного вещества внутри системы Млечного Пути. Но по отношению к далеким галактикам этот термин приобретает иной смысл. Галактики имеют видимое сходство с «настоящими» туманностями только вследствие огромного удаления от нас, из-за чего свет отдельных звезд сливается в одно пятнышко, слабо мерцающее в небе. Только при помощи мощных инструментов удастся «разрешить» такую туманность хотя бы частично на отдельные звезды.

Не все галактики обладают спиральной формой. Некоторые имеют шаровую, эллиптическую форму или даже форму спиралей с балкообразной перемычкой. Галактики отделены одна от другой огромными расстояниями<sup>1)</sup>. Но Вселенная необъятна, и число галактик в ней

---

<sup>1)</sup> Правда, не надо забывать, что и сами галактики имеют весьма солидные размеры — их поперечники достигают сотен тысяч световых лет. Если это учесть, то получается любопытный

неисчислимо. В объеме пространства, куда способен проникнуть современный телескоп, обнаружено около 100 млн. галактик.

Даже на таких больших расстояниях можно заметить, что почти все галактики, подобно нашей, имеют отчетливо выраженное *ядро*. Ядро нашей Галактики нам не удастся наблюдать из-за темных облаков, о которых мы уже говорили раньше.

В туманности Андромеды ядро имеет относительно малый диаметр, около 25 св. лет. Ядро галактик обычно представляет собой очень плотное скопление миллионов звезд. В нем господствуют свои особые законы. Из этого ядра вытекают огромные потоки межзвездного газа и пыли. Оказалось, что все это относится также и к ядру нашей Галактики, которое мы хотя и не видим непосредственно, но тем не менее можем изучать при помощи радиоизлучения на волне 21 см (стр. 163).

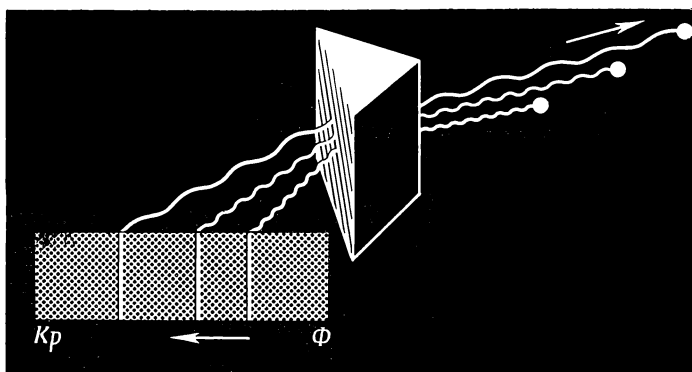
Пока что не удалось обнаружить закона *распределения* галактик в пространстве. Можно только установить, что они разбросаны во Вселенной довольно хаотически, группируясь в более или менее крупные скопления. Наша система Млечного Пути вместе с туманностью Андромеды и уже упомянутыми Магеллановыми Облаками также образует подобное скопление — так называемую Местную Группу.

### Разбегание галактик

Что же касается *движения* галактик в пространстве, то в 1929 г. американский астроном Хаббл (1889—1953) сделал сенсационное открытие. При спектроскопическом исследовании света, приходящего от далеких галактик, он установил, что линии в их спектрах расположены не на своих обычных местах, а сдвинуты к красному концу спектра. В физике известны только две причины, которые могут иметь следствием такое *красное смещение*. Одной причиной является действие на световые кванты сильного поля тяготения звезд, обладающих большой массой (стр. 237). Этот эффект легко поддается расчету на основе

---

вывод, что пространство Вселенной гораздо теснее заполнено галактиками, чем пространство внутри галактик — звездами.—  
*Прим. ред.*



Р и с. 120. Красное смещение спектральных линий пропорционально расстоянию.

общей теории относительности, но для объяснения наблюдений Хаббла он совсем не подходит: значение красного смещения, получаемого в результате такого расчета, получается слишком малым.

Тогда в качестве второй возможной причины остается уже рассмотренный нами ранее эффект Доплера (стр. 112). Используя его, получаем такой ответ: все галактики движутся от нас со скоростью, которая должна быть тем больше, чем сильнее спектральные линии сдвинуты к красной области.

Но самым поразительным в этом открытии является следующее обстоятельство. Значение красного смещения пропорционально расстоянию  $r$  до наблюдаемой звездной системы (рис. 120). Следовательно, скорость  $v$ , с которой «разбегаются» галактики, должна быть пропорциональна расстоянию  $r$ . Итак,

*скорость разбегания галактик*

$$v = \alpha \cdot r, \quad (81)$$

где коэффициент пропорциональности — это так называемая

*постоянная Хаббла*

$$\alpha = 0,25 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1}. \quad (82)$$

Смысл этой постоянной попробуем объяснить на следующем примере. Пусть расстояние до некоторой галактики  $r = 14 \cdot 10^6 \text{ пс} = 43,2 \cdot 10^{19} \text{ км}$ . Тогда по формуле (81) скорость ее удаления от нас

$$v = 0,25 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1} \cdot 43,2 \cdot 10^{19} \text{ км} = 1080 \text{ км/сек}.$$

На стр. 115 мы вывели выражение (61) для относительного изменения длины волны  $\lambda$  вследствие эффекта Доплера:

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

Если мы подставим здесь для скорости  $v$  удаляющегося от нас объекта ее выражение из формулы (81), то получим

*красное смещение в спектрах галактик*

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\alpha \cdot r}{c}. \quad (83)$$

Из всех обнаруженных до настоящего времени объектов наиболее удалена от нас туманность, которая была сфотографирована в виде маленького расплывчатого пятнышка при помощи упоминавшегося раньше 5-метрового телескопа. По смещению спектральных линий скорость удаления этой туманности составила  $144\,000 \text{ км/сек}$ , т. е. около 46% скорости света. Отсюда находим <sup>1)</sup>, что расстояние до этого объекта составляет 6 млрд. св. лет.

Величина красного смещения  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = 0,46$  дает, например, для линии, лежащей в фиолетовой части спектра при  $\lambda = 380 \text{ нм}$ , значение  $\Delta\lambda = 380 \text{ нм} \cdot 0,46 = 175 \text{ нм}$ . В спектре этой туманности фиолетовая линия находится в том месте, где в спектре земного источника должна быть зеленая линия  $380 + 175 = 555 \text{ нм}$ .

Об эффекте Хаббла очень много писали, думали и философствовали. С самого начала надо предупредить, что постоянная  $\alpha$  получена в результате приближенных расчетов, а точное ее значение отнюдь не известно. Дело в том, что расстояния между галактиками огромны, и установить точные значения этих расстояний при помощи современных приборов очень трудно. Следовательно, понижает-

---

1)  $r = \frac{v}{\alpha} = \frac{144\,000 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}}{0,25 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1}} = 5,76 \cdot 10^{22} \text{ км} = 6 \cdot 10^9 \text{ св. лет}.$



ся надежность определения  $\alpha$ . Кроме того, при больших скоростях разбегания в формулу (61), выражающую эффект Допплера, надо внести поправку на основе теории относительности. Все сказанное убеждает нас в том, что делать далеко идущие выводы из обнаруженного разбегания галактик было бы крайне неосторожно.

Если же мы примем это разбегание как бесспорный факт, то можно сказать, что галактики ведут себя совсем не так, как ведет себя взломщик, за которым гонится полиция. Чем дальше галактики удалены от нас, тем быстрее они «убегают». Их скорость возрастает примерно на 75 км/сек при увеличении расстояния на каждый мегапарсек ( $1 \text{ Мпс} = 10^6 \text{ пс}$ ). Наблюдателю с Земли кажется, что Вселенная разбегается по радиальным направлениям во все стороны. Она разлетается как разорвавшаяся граната, и чем это в конце концов завершится, пока не может сказать никто.

Но делать отсюда вывод, что система Млечного Пути или тем более наша Земля были раньше центром Вселенной, было бы глупым зазнайством. Скорее всего надо принять, что эта картина радиального разбегания галактик должна выглядеть из любой точки мира абсолютно так же, как и с Земли. Но это уже относится к строению Вселенной, к ее геометрии. Мы еще займемся геометрией Вселенной в связи с общей теорией относительности.

### Основные постулаты общей теории относительности

Специальная теория относительности, хотя она и явилась одним из гениальнейших творений человеческого разума, которое только мог создать один человек, еще не удовлетворила самого Эйнштейна. Прежде всего сказывалось то обстоятельство, что лежащее в ее основе преобразование Лоренца было выведено только для системы отсчета, движущейся *равномерно*, а не *ускоренно*. К этому несовершенству теории присоединилась еще и нерешенная проблема тяготения. Хотя ньютоновский закон тяготения был известен уже довольно давно и на его основе удалось построить общую небесную механику, обладающую точностью, которая до сегодняшнего дня едва ли оставляет желать чего-либо лучшего, природа тяготения по-прежнему не была выяснена. Поэтому Эйнштейн



Р и с. 121. Ускоренная система отсчета.

в течение многих лет стремился к тому, чтобы расширить свое творение и довести его до *общей теории относительности*. Это должно было способствовать решению обоих основных вопросов.

Но что, однако, представляет собой *ускоренная система отсчета*? Если мы сидим в вагоне, который полностью изолирован от внешней среды, а поезд идет идеально равномерно и без всяких толчков, то никакие средства не помогут нам установить, движется ли вообще наш вагон. Совсем другое дело, если поезд начнет *ускорять* свое движение или внезапно резко затормозит. Тут портфели и чемоданы выскочат из багажных сеток, а люди, стоящие в коридоре, начнут спотыкаться и падать друг на друга (рис. 121). Все ограничится извинениями и вежливым смехом, так как ни один человек не в состоянии что-либо сделать против этой внезапно возникшей силы инерции. Ведь это было не что иное, как инерция, которая дремлет в каждом теле и сразу превращается в силу, если система отсчета изменяет свое равномерное движение. До тех пор пока сохраняется ускорение, продолжает действовать и сила инерции.

Во вращающейся кабине действуют такие силы, которые отсутствуют в равномерно и прямолинейно движущемся поезде. Это центробежная сила, которая отбрасывает все предметы в сторону от оси вращения. Это также сила инерции, которая возникает потому, что массе «навязан» характер движения, который ей противоречит согласно первой аксиоме Ньютона (стр. 16).

Таким образом, различие между равномерно и ускоренно движущимися системами отсчета очевидно. В первой

удовлетворяются законы Ньютона, например закон инерции, а во второй — нет. В то время как равномерно и прямолинейно движущиеся системы невозможно отличить друг от друга, ускоренная система тотчас выдает себя наличием и величиной сил инерции, которые в ней действуют.

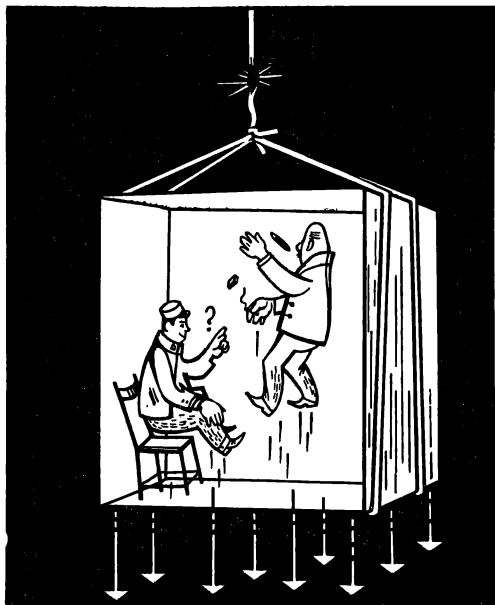
Кроме инерции, масса обнаруживает еще свойства тяжести. Над этим явлением мы уже ломали голову на стр. 40. Прежде всего можно легко доказать, что *сила тяжести* является только частным случаем *силы инерции*. Для этой цели сядем в лифт какого-нибудь достаточно высокого здания. В тот момент, когда наш спутник уже собрался зажечь свою сигару, вдруг рвется канат, и лифт устремляется вниз (рис. 122). Хотя задуманный эксперимент и кажется немного жестоким, однако шахта на случай падения лифта снабжена специально встроенными хитроумными приспособлениями, так что ничего страшного случиться не может. Кроме того, предположим, что здание достаточно высокое, чтобы у нас хватило времени для проведения различных наблюдений.

Они будут очень интересными. Сначала человек останется стоять с раскрытым ртом, но сигара не упадет вниз. Она повиснет в воздухе перед его испуганным лицом и терпеливо будет «ждать» спичку. Это произойдет потому, что человек и сигара падают вниз с одинаковым ускорением. Сам человек не будет чувствовать больше своего веса — сила тяжести внезапно исчезнет. Даже спичка «не захочет» больше гореть. Она будет только коротко вспыхивать, чтобы тотчас снова погаснуть, ибо горячие продукты сгорания не поднимаются вверх. Мы констатируем

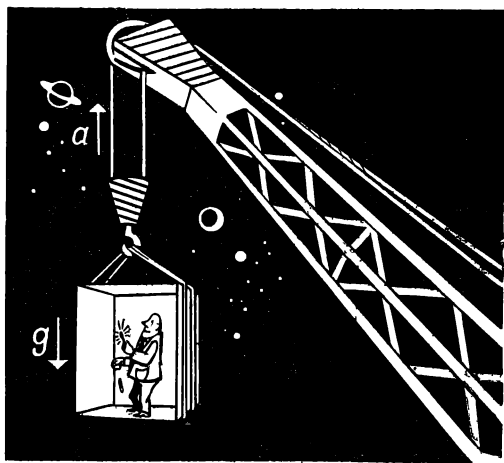
*Первое:* для внешнего наблюдателя сила тяжести существует как до начала, так и во время падения; для наблюдателя внутри она исчезла.

Иными словами, в лифте господствует точно такое состояние, как в пространстве, лишенном силы тяготения, — где-нибудь в космосе, вдалеке от всех притягивающих небесных тел.

Если бы лифт находился в таком месте, где действительно отсутствует сила тяжести, то можно было бы продолжить эксперимент. Представим себе, что какой-то мощный подъемный кран вдруг захватывает канат и тянет лифт вверх с постоянным ускорением  $a = 9,81 \text{ м/сек}^2$



Р и с. 122. Исчезновение силы тяжести при свободном падении



Р и с. 123. Сила тяжести как сила инерции.

(рис. 123). Эффект поразительный! Человек снова чувствует свой вес и твердый пол под ногами. Спичка опять как ни в чем не бывало загорается. Но теперь для курения нужна сигара, которая тем временем упала на пол. В кабине установились полностью земные условия, как если бы она прочно и спокойно стояла на земле и, несмотря на это, как мы узнали еще в поезде, все это только проявление силы инерции. Она заменяет теперь поле тяготения, которого совсем не существует. Но нет! Сила тяготения здесь *п о д л и н н а я*, и мы констатируем

*Второе:* для наблюдателя, находящегося снаружи, сила тяжести исчезла, а для наблюдателя внутри она существует.

Тем самым мы создали ситуацию, из которой исходил Эйнштейн при создании общей теории относительности. То, что инертная и тяжелая массы пропорциональны друг другу (стр. 40), это отнюдь не случайность и не обман — они даже *идентичны*. Сила тяжести возникает и исчезает, если переходить от одной системы отсчета к другой, которая движется ускоренно по отношению к ней.

Отсюда видно, что общая теория относительности ставит перед собой задачу установить ту закономерность в природе, которая *не зависит от выбора системы отсчета*. Движение тела тогда протекает таким образом, что для описания его в неподвижной системе отсчета нужны *силы*, которые исчезают или, наоборот, появляются в другой системе, движущейся относительно этой системы ускоренно. Поэтому проблемы, поставленные перед общей теорией относительности, намного труднее, чем вопросы специальной теории. Там ставится только одна задача — правильно преобразовать длину, время и массу. Здесь же надо при смене систем отсчета вводить новые силы и притом такие, которые точно соответствуют действительности. Необходимый для этой цели математический аппарат очень сложен.

В результате получена система уравнений, которые описывают состояние поля тяготения в пространстве и времени. Они похожи на уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле. Эти уравнения позволяют совершать преобразования физических законов в любой системе отсчета, причем сила тяготения естественно фигурирует здесь среди других сил.

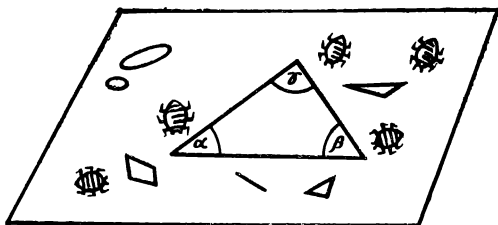
## Искривление пространства

В основе нашей способности представлять какой-нибудь предмет или явление лежит *трехмерная геометрия Эвклида*. Опираясь на нее, мы ориентируемся в пространстве и можем в любое время изготовить наглядные модели физических процессов, которые облегчают нам понимание этих процессов. Наглядное изображение — всегда желанный помощник в научной работе. Но оно не является самоцелью этой работы. Разве можно наглядно представить себе, что такое энергия, электричество или мезон, которых ни один человек никогда не видел? Разумеется, нет. И, однако, мы говорим обо всех этих вещах так, как если бы их можно было потрогать руками. Мы умеем применять к ним математический аппарат, знаем все их «уловки» и тайные свойства и заставляем их служить человечеству. Они изучены и познаны довольно полно, хотя их еще никто не видел. Тот, кто всегда настаивает на наглядности, никогда ничего не поймет в физике.

Точно так же общая теория относительности займется в первую очередь не о наглядности. Речь идет о необходимости при помощи уравнений охватить мир полнее, чем это было сделано до сих пор, не входя при этом в противоречие с проверенными фактами. Для этого Эйнштейн вместо эвклидовой геометрии должен был использовать другую, более общую. Таким образом возникает совершенно новая структура мира, которую нелегко представить в нашем воображении: искривленное пространство. Чтобы объяснить все же, что это такое, приведем знаменитую сказку о плоских насекомых.

Когда-то существовал мир, который имел только два измерения: длину и ширину (рис. 124). Это была огромная плоскость, и все живущие на ней существа были еще более плоскими, чем клопы. Они честно питались четырехугольниками и кругами, а по праздникам ели эллипсы и другие подобные лакомства.

Эти существа были совсем не так поверхностны, как выглядели со стороны. Наоборот, они тщательно изучали эвклидову геометрию плоскости и, разумеется, давно нашли, что сумма углов треугольника составляет точно  $180^\circ$ . Из физики они знали целый ряд законов движения, немного занимались оптикой и другими более или менее



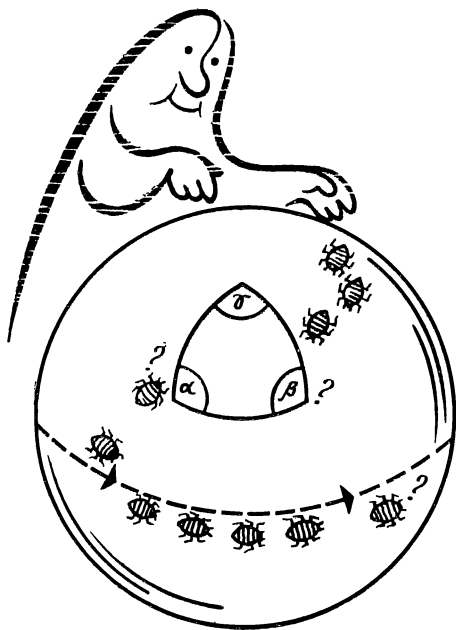
Р и с. 124. Мир двумерных существ.

простыми вещами. Они знали, что если бежать прямо, то никогда не добежишь до конца мира, который по этой причине являлся для них бесконечно большим. Мысль о бесконечности мира наполняла их восторгом и легла в основу их мировоззрения.

Так жили эти существа в согласии с самими собой и со своим распластанным ландшафтом. Но однажды появился злой дух и с подлой ухмылкой пересадил кое-кого из них на громадный шар (рис. 125). Так как шар был очень велик, а у этих насекомых было слабое зрение, они не заметили, что их новый мир обладает округлостью, хотя и очень слабой. Они начали поспешно сновать взад и вперед в своем новом мире, однако скоро успокоились, так как ничего, бросающегося в глаза, не обнаружилось.

Только взявшись основательно и систематически за изучение новой страны, они сделали непонятное для себя открытие: сумма углов треугольника составляла теперь не  $180^\circ$ , а больше, и тем больше, чем крупнее был треугольник. Одна измерительная экспедиция получила даже результат  $270^\circ$ ! Одно насекомое, знаменитое своими математическими способностями, после долгих размышлений создало теорию и сделало по этому поводу глубоко-мысленный доклад: мир должен быть искривленным либо равномерно, как окружность, либо по гиперболе, или, наконец, совсем без всякой закономерности, это выяснить трудно. Все насекомые благоговейно выслушали его, но ничего не поняли. Это было выше их плоского уровня. Только уважение к незапятнанной репутации и славе их великого математика не давало им возможности серьезно сомневаться в его здравом уме.

Однако речь шла, в конце концов, не о нескольких градусах суммы углов треугольника; на карту было



Р и с. 125. Двумерные существа на шаре.

поставлено нечто большее. Теория искривленного мира была в состоянии подвергнуть самой серьезной опасности все существующие у них представления о Вселенной. Поэтому они очень неохотно предприняли все же еще одну последнюю исследовательскую экспедицию, к которой их настоятельно призывал великий математик. Много недель маршировали они прямо, не отклоняясь в сторону ни на шаг, и казалось, что никогда не будет конца этому путешествию. Многие уже натерли себе волдыри на лапках и ворчали, что это предприятие бессмысленно и натертые лапки — это его единственный наглядный результат.

И вдруг на далеком горизонте появились признаки жизни. Неуверенными шагами, из последних сил наши исследователи побрели вперед. Когда они подошли ближе, то не поверили своим глазам.

О чудо, это были их собственные друзья, которых они несколько недель назад так легкомысленно поки-



нули! Радость от встречи была вначале неопиcуема. Растроганно они трясли друг другу немногие оставшиеся здоровыми лапки. Но внезапно ими овладело глубокое уныние. Этот прекрасный мир обладал теперь той ужасной и непостижимой пропастью, которую им предсказал их великий Учитель,— он был искривлен и замкнут, и они обошли его, не заметив при этом ничего особенного. Мир был и остался загадочным и не поддающимся воображению. И все же он существовал!

Мы на Земле не знаем подобных забот. Наше пространство трехмерно, и чувствуем мы себя в нем довольно хорошо, почти как рыбы в воде. Однако если как следует обдумать историю о плоских насекомых, то не будет абсолютно никаких оснований только из принципа отклонять идею об искривленности пространства. Искривление двумерного пространства, где жили насекомые, было произведено так, что при этом получился шар. Радиус кривизны везде соответствовал радиусу этого шара. Мера же *искривления нашего пространства* определяется величиной и взаимными расстояниями находящихся в пространстве масс. Поэтому искривление пространства изменяется от точки к точке и в местах, где воздействие масс отсутствует, оно должно быть равно нулю.

Отсюда следует, что, согласно общей теории относительности, пространство представляет собой нечто иное, чем пустое Ничто. Оно не может быть также голой «формой существования», как его понимает идеалистическая философия. «Пространство само по себе» — это такой же продукт нашего мышления, как и «время само по себе». Пространство и время существуют только в связи с материей, и распределение материи определяет геометрические свойства пространства. Физика и геометрия слились в общей теории относительности в неразрывное целое. В. И. Ленин писал: «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени» <sup>1)</sup>. Общая теория относительности нашла теоретические и наблюдательные доказательства того, что свойства и структура пространства и времени полностью зависят от распределения и движения материи.

---

<sup>1)</sup> Соч., 5-е изд., т. 18, стр. 181.— *Прим. ред.*

## Следствия общей теории относительности

Мысль о *неевклидовой геометрии* как таковая отнюдь не нова. Еще гениальный математик Карл Фридрих Гаусс (1777—1855) много занимался этим вопросом<sup>1)</sup>. О правильности научной теории каждый разумный человек судит, опираясь не на произвольные домыслы, а на опыт. Но разве каждый школьник не знает, что сумма углов плоского треугольника должна составлять  $180^\circ$ ? Однако Гаусс сказал себе: то, что кажется правильным в малом, в большом масштабе может быть совсем другим. Если действительно существует искривление пространства, оно должно проявиться в том, что сумма углов треугольника отклоняется от привычной величины.

Для этой цели в 1840 г. он решил измерить с большой точностью суммы углов большого треугольника (Инзельсберг — Верхний Хаген — Брокен). Гаусс никогда не публиковал результаты этого опыта, так как злорадные замечания его коллег были бы ему неприятны; дело в том, что он не смог установить в пределах допустимых ошибок никакого отклонения. Сегодня мы знаем, почему его опыт не удался. Его треугольник был еще слишком мал. Искривление пространства становится заметным только для огромных, воистину космических расстояний.

### 1. Геодезические линии

Свет — это единственное средство, посредством которого можно проверить, является ли данная линия прямой или нет. Об этом мы уже говорили (стр. 91). Но если мы теперь представим, что луч света при своем долгом путешествии через космос должен проходить мимо различных масс, то станет ясно, что он никогда не может дать прямую линию. Когда он доходит до нас, он уже изогнут в виде какой-то линии, лишенной как будто

---

<sup>1)</sup> Системы неевклидовой геометрии первыми разработали выдающийся русский математик Н. И. Лобачевский (1792—1856) и венгерский математик Я. Бояи. Лобачевский опубликовал свое сочинение об этом в 1829 г., Бояи — в 1831 г. Сам Гаусс при жизни никаких работ по неевклидовой геометрии не опубликовал. Поэтому геометрия справедливо получила название «геометрии Лобачевского». — *Прим. ред.*

всякой закономерности. Тяжелое разочарование для всех чертежников и геометров: прямой линии не существует. Но они могут несколько раздраженно ответить нам: «Но мы даже и не говорили о свете. Мы только вслед за нашим великим коллегой Эвклидом утверждаем, что прямая — это кратчайшее расстояние между двумя точками».

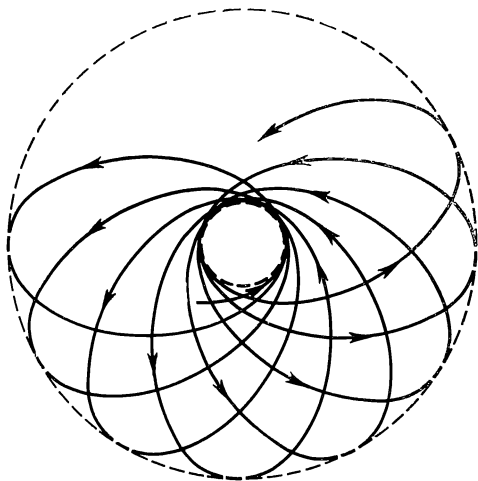
Все это, конечно, верно только на плоскости. Если мы воткнем две кнопки в поверхность шара и соединим их туго натянутой нитью, то образуется, во всяком случае, не прямая линия. Нить будет лежать по дуге большого круга <sup>1)</sup>. Короче, чем эта дуга, расстояния никак не может получиться. Итак, мы установили, что кратчайшим расстоянием на искривленной плоскости является отнюдь не прямая, а некоторая кривая — *геодезическая линия*. Аналогично, если наше обычное трехмерное пространство изогнуто, это означает, что в нем не существует больше прямых линий в смысле геометрии Эвклида, но только геодезические. Мы можем их указать без большого труда. Их описывает любое тело, если оно движется только по инерции. С этой точки зрения баллистическая парабола, описываемая брошенным камнем, это такая же геодезическая линия, как и круговая орбита Земли вокруг Солнца. Эти геодезические линии не лежат неподвижно в пространстве, как сетка долгот и широт на глобусе. Их расположение зависит от положения масс, между которыми движется тело, а также от его собственной массы. Когда первые математики ввели понятие прямой линии, они думали найти свой идеал в образе светового луча и построили согласно этому свою геометрию. Из всех возможных геодезических линий пространства они интуитивно выбрали ту, которая по сравнению с другими меньше всего изогнута. К счастью, этот изгиб в земных масштабах так незначителен, что не вносит никакой путаницы.

## 2. Смещение перигелия Меркурия

Когда Эйнштейн опубликовал свою теорию, существовала только одна возможность проверить ее пра-

---

<sup>1)</sup> Напомним читателю, что большой круг на сфере — это линия пересечения его плоскостью, проходящей через центр сферы. Все остальные круги на сфере — малые. — *Прим. ред.*

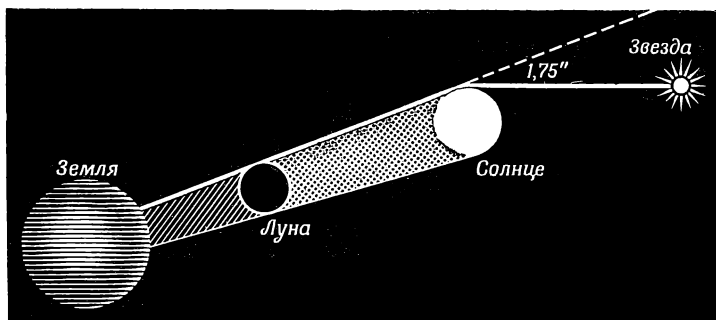


Р и с. 126. Смещение перигелия Меркурия (сильно преувеличено).

вильность. Это было известное уже несколько десятков лет, но необъяснимое смещение перигелия планеты Меркурий. Явление это состоит в том, что наиболее близкая к Солнцу точка эллиптической орбиты планеты за одно столетие сдвигается примерно на  $43''$ . Поэтому описываемые планетой эллипсы не замкнуты, а образуют систему петель вроде розетки (рис. 126). У остальных планет это явление практически не заметно. Можно вначале попытаться объяснить его, привлекая специальную теорию относительности, по которой масса возрастает из-за увеличения скорости вблизи Солнца (закон площадей!). Однако такой расчет дает только  $7''$ . Общая теория относительности дает сразу же  $43''$  — отличное совпадение с результатами наблюдений.

### *3. Отклонение света в поле тяготения*

Особенно сильно должен отклоняться от прямой луч света, если он проходит вблизи какой-нибудь большой массы. Единственным объектом для возможного обнаружения этого эффекта, имеющим достаточно большую массу, является Солнце. Луч должен отклоняться к Солнцу, проходя через его поле тяготения. Отклонение можно



Р и с. 127. Отклонение луча света звезды в поле тяготения Солнца (сильно преувеличено).

рассчитать по специальной теории относительности, а именно на основе того факта, что фотоны света в соответствии с уравнением  $W = mc^2$  имеют энергию, пропорциональную их массе. Тогда найдем, что луч света, проходящий вблизи Солнца, будет искривлен в виде гиперболы (рис. 127), который составляет угол  $0'',87$ . С учетом искривления пространства общая теория относительности дает удвоенное значение угла, а именно  $1'',75$ .

Чтобы измерить эту величину, надо наметить какой-то источник света, который находится позади Солнца. Для этого выбирают подходящие звезды. Солнечный свет, сильно рассеивающийся в земной атмосфере, затмевает свет звезд на дневном небе, тем более находящихся в непосредственной близости к Солнцу. Поэтому измерение становится возможным только тогда, когда солнечный диск во время полного солнечного затмения закрыт Луной. Перед началом эксперимента необходимо знать точное положение звезды при отсутствии Солнца. Для этого ночью делают фотографический снимок того участка неба, где полгода спустя должно состояться предсказанное затмение. На втором снимке, сделанном в момент затмения, положение звезды должно быть сдвинуто. Но так как теоретическое отклонение составляет всего лишь  $1'',75$ , установить фактическую величину сдвига очень трудно. Малейшее влияние отклонения желатинового слоя при проявлении пластинки, изменение в юстировке приборов, охлаждение атмосферы и связан-

ное с этим изменение ее лучепреломления во время солнечного затмения, а также многие другие обстоятельства, которые нельзя предусмотреть, могут все испортить. Нужны многократные опыты, чтобы доказать, что наблюдаемое отклонение хотя бы приблизительно соответствует расчетному значению.

#### 4. Красное смещение в поле тяготения

Уже из основного соотношения специальной теории относительности  $W = mc^2$  следует, что лучам света, как и любому другому электромагнитному излучению, соответствует *инертная масса*. Но проявляют ли фотоны свойства *тяжести*? При помощи точных измерений отклонения световых лучей в окрестностях Солнца на эту задачу был дан однозначный ответ, хотя, к сожалению, в нем еще отсутствовала желаемая точность. К счастью, существует еще одна возможность доказать идентичность инерции и тяжести. Это красное смещение спектральных линий в поле тяготения.

Если мы захотим поднять камень в поле тяготения Земли, то для этой цели нам придется совершить определенную работу. По формуле (41) она равна произведению веса тела на высоту подъема:  $mgH$ . Но если тело преодолевает поле тяготения «самостоятельно», без притока энергии извне, то оно может это сделать только за счет собственных запасов энергии. Камню надо придать для этого соответствующее количество кинетической энергии, ракету надо снабдить топливом. Точно так же перемещение кванта света в поле тяготения происходит за счет затраты его энергии.

Таким образом, если мы посылаем квант света вертикально вверх, то он должен при этом терять энергию  $\Delta W = mgH$ , где под  $m$  надо понимать его *тяжелую массу*. Общая энергия кванта по формуле (74)  $\Delta W = mc^2$ . При этом  $m$  — его *инертная масса*. Тогда относительная потеря энергии  $\Delta W/W = mgH/mc^2$ . Если и инертная и тяжелая массы идентичны друг другу (а как раз это и утверждает общая теория относительности), можно сократить множитель  $m$ . Далее энергия одного кванта света пропорциональна его частоте  $\nu$ :

$$W = h\nu.$$

Это установил в 1900 г. Макс Планк. Поэтому коэффициент пропорциональности  $h$  называется *постоянной Планка* <sup>1)</sup>. Итак, если подставить  $\Delta W = h \cdot \Delta \nu$  и  $W = h\nu$ , то сокращается также множитель  $h$  и мы получаем

*относительное изменение частоты света при прохождении разности высот  $H$*

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2}. \quad (84)$$

Если мы примем, например, разность высот 44 м, то относительное изменение частот получится равным  $4,8 \cdot 10^{-15}$  <sup>2)</sup>. Измерение столь малого изменения частоты должно казаться утопией. Для обычного света это заведомо невозможно, так как все оптические спектральные линии не абсолютно тонкие, а по различным причинам имеют определенную ширину. Это можно сравнивать с полосой частот радиопередатчика. Но, используя  $\gamma$ -излучение радиоактивных веществ, можно уже сегодня получать достаточно тонкие линии. Поэтому в последнее время возникла возможность определять изменение частот излучений, посланных вертикально вверх или вниз. При двухкратном пробегании  $\gamma$ -лучами разности высот в 22 м измерения дают изменение частоты  $5,1 \cdot 10^{-15} \pm \pm 10\%$ . Большей точности, разумеется, требовать нельзя.

Прежние опыты с видимым светом, излучаемым звездами, не были так точны. Квант света, испускаемый Солнцем, теряет при этом энергию, которая идет на преодоление поля тяготения Солнца. По формуле (43) она равна  $\Delta W = \frac{fm_1 m_2}{r_1}$ . Если  $m_2$  — масса кванта света, то тогда вместо формулы (84) получим

*относительное изменение частоты света, излучаемого звездой:*

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{fm}{rc^2}. \quad (85)$$

1) Хотя в данном случае мы и не нуждаемся в значении этой постоянной, все же приведем ее величину  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  *вт.сек*<sup>2</sup>.

2)  $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot 44 \text{ м}}{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{сек}} = 4,8 \cdot 10^{-15}$ .

Отсюда для Солнца получаем значение  $2 \cdot 10^{-6}$  <sup>1)</sup>. Это можно в какой-то степени проверить. При этом надо подчеркнуть, что этот эффект не имеет ни малейшей связи с эффектом Доплера, так как тот соответствует источнику излучения, который находится в движении относительно наблюдателя.

## Модели мира

Если мы обдумаем все сказанное до сих пор о физических соотношениях в космосе, то сам собою возникнет вопрос: а как же все-таки создан мир в целом, что он собой представляет, если рассматривать его как бы со стороны? Чтобы сразу предупредить все вопросы, скажем прямо — мы этого еще не знаем. По сравнению с более ранними временами, когда философы и теологи произвольно конструировали мировые системы, этот вопрос претерпел коренное изменение. Теперь мы накопили так много научных знаний, что вопрос о структуре мира уже может обсуждаться на основе вполне реальных соображений. С помощью произвольных умозрительных построений здесь больше ничего не добьешься. На место лженаучных учений о сотворении мира и о его конце пришла современная космология, результаты которой определяются не чьими-то желаниями, а трезвыми физико-математическими соображениями. Впереди цель — создать модель мира, которая не противоречила бы всей совокупности известных фактов.

В средние века это не представляло такой уж большой проблемы. Развитие мира было точно описано в Библии. Земля, Солнце, Луна и звезды образовывали единое целое. Мир имел конец и в пространстве и во времени. У него была определенная причина и определенная цель.

Все это изменилось с появлением новых воззрений на строение мира, физически обоснованных Галилеем и Ньютоном. Было установлено, что Земля — лишь пылинка, затерянная в бесконечном пространстве, наполненном бесчисленными звездами. Это пространство существует в вечно продолжающемся времени без начала

---

<sup>1)</sup> Для массы Солнца  $m = 2 \cdot 10^{30}$  кг и его радиуса  $r = 6,96 \cdot 10^8$  м

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{6,96 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{сек}^2} = 2,1 \cdot 10^{-6}.$$



и конца. В этой Вселенной, бесконечной в пространстве и времени, ни одна точка наблюдения не имеет преимущества перед другими.

Однако с такими выражениями, как «бесконечный» и «вечный», надо бы обращаться немного поосторожнее. А именно, если бы Вселенная была бесконечно большой, она должна была также содержать бесконечно много звезд. Тогда небесный свод должен быть полностью покрыт звездами, и его поверхность должна была бы светить с яркостью нашего Солнца. Но темнота ночного неба находится в явном противоречии с этим выводом. На этот парадокс обратил внимание немецкий астроном Ольберс (1758—1840).

Другое противоречие получается, если принять универсальность закона тяготения (а никакой опыт не дает нам основания в этом сомневаться). Сила тяготения уменьшается с квадратом расстояния. Но объем пространства возрастает как третья степень расстояния. Если вещество распределено в пространстве равномерно, то также пропорционально третьей степени возрастает и масса этого вещества. Тогда между двумя любыми областями пространства должны были бы действовать огромные силы тяготения, величина которых все более увеличивалась бы с ростом расстояния.

Мир, в общем и целом неизменный в своей геометрии и распределении масс, называют *статическим*. Но наличие сил тяготения при однородном распределении масс не допускает такого статического состояния. Тогда существуют только две возможности: либо Вселенная должна расширяться, либо, наоборот, сжиматься. Модель мира, созданная в рамках общей теории относительности, не допускает существования неизменной Вселенной.

В настоящее время существуют следующие точки зрения на этот вопрос:

1. Все известные нам законы природы справедливы во всей Вселенной и во все времена.

*Оговорка.* Не исключено, что при изучении Вселенной в более широких масштабах мы сможем обнаружить изменения основных законов; скажем, выяснится, что закон тяготения Ньютона годен только до определенного расстояния; не исключено также, что значения фундаментальных постоянных природы с течением времени могут изменяться.

2. Если отказаться от всех подробностей и ограничиться важнейшими и самыми крупными объектами, т. е. галактиками, то можно считать, что материя распределена во Вселенной равномерно, т. е. вселенная однородна. Из любой точки наблюдений открывается одна и та же общая картина.

*Оговорка.* Не исключено, что дальнейшие исследования приведут к систематическим отклонениям от этой однородности.

3. Так как надежность общей теории относительности можно считать гарантированной, структура Вселенной неевклидова и соответствует четырехмерному искривленному пространству-времени.

*Оговорка.* В настоящее время еще нельзя сказать, какая из многих возможных неевклидовых геометрий правильно представляет мир как целое.

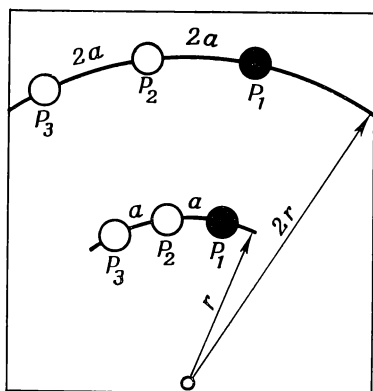
4. Наблюдаемое разбегание туманностей с наибольшей степенью вероятностей соответствует расширению Вселенной.

*Оговорка.* Расширение Вселенной могло происходить не во все периоды ее существования; вполне возможно, что были или будут фазы сжатия.

### Расширяющаяся Вселенная

Чтобы нагляднее представить себе расширение Вселенной, прибегнем снова к аналогии. Наш трехмерный мир представим в виде поверхности шара. Если мир не точно сферический, это в принципе ничего не меняет. Возьмем резиновый баллон и подставим его на одно мгновение под ливень капель краски, создаваемый малярным ручным распылителем. На круглой поверхности баллона лягут тогда все «звездные системы» этого мира. Они будут распределены здесь произвольно, но в общем и целом равномерно в виде маленьких пятнышек краски. Каждое из этих пятнышек представит «галактику», насчитывающую примерно 200 млрд. звезд.

Выберем произвольно одну такую точку  $P_1$  (рис. 128). Пусть это наша система Млечного Пути. Вторая точка  $P_2$  удалена от нее на расстояние  $a$ , третья —  $P_3$  — на удвоенное расстояние  $2a$ . Теперь начнем надувать баллон. Мир



Р и с. 128. Скорость разбегания туманностей как следствие расширения Вселенной.

будет расширяться, и точки станут отдаляться друг от друга. Если за время  $t$  радиус  $r$  баллона удвоится, то удвоится и расстояние между всеми точками. Точка  $P_2$  будет удалена теперь от  $P_1$  на расстояние  $2a$ ,  $P_3$  от  $P_1$  — на расстояние  $4a$ . Тогда скорости по отношению к точке  $P_1$  составят

$$\text{для точки: } P_2: \quad v_2 = \frac{2a - a}{t} = \frac{a}{t},$$

$$\text{для точки: } P_3: \quad v_3 = \frac{4a - 2a}{t} = \frac{2a}{t}.$$

Мы видим, что это точно соответствует закону, характеризующему разбегание туманностей: скорости пропорциональны расстояниям от центра наблюдения. Но это пригодно не только для исходной точки  $P_1$ , но и для любой точки нашей забрызганной краской поверхности. Ни одна точка не может посягнуть на какое-то особенное положение. Таким образом, наше пространство не имеет центра, все точки шаровой поверхности равноправны. Разбегание туманностей выглядит одинаково независимо от того, из какой звездной системы мы смотрим.

Поразмыслив, мы могли бы еще сослаться на внутренность баллона, которая у нашей модели должна быть полой. Но она вовсе не полая! Каждая точка поверхности баллона была внутри его до того, как она начала все более и более удаляться от его центра. Благодаря этому такая модель мира имеет замечательное свойство: она дает достаточно места для всего прошлого и будущего.

Теперь вернемся к нашему реальному миру.

Если бы расширение происходило непрерывно и равномерно, то радиус  $r$  сферической Вселенной, показанный на рис. 128, по мере нашего возвращения в прошлое должен был бы становиться все меньше и меньше. Постоянная Хаббла имеет значение  $0,25 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1}$  (стр. 222) или, что то же самое,  $75 \text{ км/сек} \cdot \text{Мпс}$ . Это означает, что точка, которая в данный момент находится от нас на расстоянии в  $1 \text{ Мпс} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ км}$ , секунду назад находилась на  $75 \text{ км}$  ближе. Время, которое должно было пройти, чтобы точка достигла такого удаления, легко рассчитать:

$$T = \frac{3,09 \cdot 10^{19} \text{ км}}{75 \text{ км/сек}} = 4,11 \cdot 10^{17} \text{ сек}, \text{ или } 15 \text{ млрд. лет}$$

Этот расчет вытекает из предпосылки, что когда-то давно вся Вселенная была сжата до одной единственной точки. Все вещество Вселенной, вся огромная его масса вместе с принадлежащей ей энергией миллиардов известных сегодня небесных тел была сконцентрирована в одной точке или по меньшей мере в очень маленьком пространстве. По неясным причинам потом произошел колоссальный взрыв, после которого материя начала разлетаться в пространстве в разные стороны и с этого момента вступила на нынешний путь своего развития.

С этим расчетом согласуется единственное обстоятельство, которое является, правда, довольно волнующим. Дело в том, что интервал времени 15 млрд. лет соответствует приблизительной оценке возраста Земли. При этом исходили из того, что радиоактивный уран, пройдя многочисленный ряд распадов, превращается в устойчивый свинец. Исследуя процентное содержание урана и свинца в различных минералах, можно довольно легко рассчитать время, за которое образовалось имеющееся количество свинца. Отсюда получается, что около 5 млрд. лет назад существовало естественное равновесие в составе химических элементов. Если ввести поправку на время, за которое элементы образовались из первичной плазмы, и, может быть, немного исправить постоянную Хаббла, то это совпадение в самом деле поразительно.

Мы рассказали об этой модели мира потому, что именно она чрезвычайно много описывалась и обсуждалась. Однако еще совсем не доказано, действительно ли Вселенная замкнута в себе описанным образом. Так же

хорошо можно себе представить, что расширение происходит в обычном трехмерном пространстве. Все галактики сохраняют в соответствии со своей инерцией ту скорость, которую они получили в начале своего «разбегания». Тогда галактики с самыми большими скоростями также должны быть наиболее удаленными от нас, если мы прежде всего примем, что точка их старта лежала вблизи нашей собственной Галактики. Все галактики в целом образуют тогда сферическое пространство. Так как они могут иметь скорость, самое большее равную скорости света  $c$ , то произведение всего прошедшего времени  $T$  на эту скорость дает нам современный *радиус мира*  $R = = cT$ . Подставив значение  $T$ , которое мы рассчитали ранее (стр. 243), получим  $R = 3 \cdot 10^5 \text{ км/сек} \cdot 4,11 \cdot 10^{17} \text{ сек} = = 12,3 \cdot 10^{22} \text{ км} = 13 \text{ млрд. св. лет}$ .

Итак, эта модель мира повсеместно *открытая*. Она бесконечна, в то время как модель, которую мы рассмотрели перед этим, конечна и *замкнута в себе*. Применяя специальную теорию относительности, можно также привести доказательства того, что в этой открытой модели мира любую точку Вселенной можно рассматривать как начальную. Распределение материи в пространстве однородно, как и в первом случае.

Но, по-видимому, вопрос о том, конечна или бесконечна наблюдаемая нами Вселенная, нельзя решать безоговорочно. Надо прежде всего учитывать многие астрофизические данные и включать их в рассмотрение этого вопроса. Именно таким образом получают модели мира, замкнутого и бесконечного в одно и то же время.

\* \* \*

Как это и должно быть, наши физические экскурсии во Вселенную привели нас к одному очень важному выводу. Объяснение конечных связей природы и космоса в целом перестало быть привилегией религии и отрешенных от мира философов. Эти проблемы стали предметом беспристрастных научных исследований и рассуждений.

Только физика, если понимать это слово в его широком значении, способна исследовать все эти великие и еще не решенные вопросы, которые человечество выдвигает с давних пор. Только она призвана шаг за шагом

объяснять такие проблемы и приводить к их решению. При этом все яснее становится одно: нет такой проблемы в мире, которая бы с самого начала противоречила научному способу рассмотрения.

Мир познаваем! Но процесс познания еще далеко не закончен. Может быть, мы стоим еще в самом его начале. Ведь только теперь человек начал сам выходить в космос, чтобы заняться физикой там, где он значительно ближе, чем прежде, к этому самому большому из всех объектов исследования. После завоевания человеком космоса следует ожидать еще бóльших достижений.

Поэтому картина мира, созданная человеком, с теми изменениями, которые она претерпела в течение всего времени существования человечества, будет изменяться и дальше. Этому так бурно развивающемуся сознанию противостоит действительный мир. Именно этот действительный мир, а не наши сегодняшние знания и также не общие представления, господствующие в настоящее время,— это и есть для человека единственная реальность.

Но мы должны радоваться тому, что этот внешний мир так неисчерпаемо глубок и интересен.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	5
<b>ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ</b>	
О чем пойдет речь в этой книге . . . . .	7
Планетная система . . . . .	8
О возникновении классической механики . . . . .	14
<b>АКСИОМЫ НЬЮТОНА</b>	
Инерция . . . . .	16
Масса и сила . . . . .	17
Количество движения . . . . .	19
Действие и противодействие . . . . .	20
<b>ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ</b>	
Сохранение количества движения . . . . .	24
Уравнение движения ракеты . . . . .	26
Момент количества движения . . . . .	33
Вращение и противовращение . . . . .	36
<b>ПРЕОДОЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ</b>	
Тяготение . . . . .	38
Ускорение силы тяжести и сила тяжести . . . . .	40
Скорость на круговой орбите . . . . .	45
Период обращения и синхронные спутники . . . . .	51
Сидерический и тропический годы . . . . .	53
Период обращения и масса . . . . .	56
Масса Луны и двойные звезды . . . . .	59
Приливы и отливы . . . . .	63
<b>КАК УЛЕТЕТЬ С ЗЕМЛИ</b>	
Критическая скорость . . . . .	68
Скорость и продолжительность полета ракеты, улетающей с Земли . . . . .	74

Наложение полей тяготения . . . . .	77
«Побег» из солнечной системы . . . . .	79
Виды траекторий . . . . .	81
Составные орбиты . . . . .	88

## СВЕТ КАК МАСШТАБНАЯ ЛИНЕЙКА

Скорость света . . . . .	90
Расстояния . . . . .	91
Система Млечного Пути . . . . .	97
Размеры небесных тел . . . . .	100
Телескоп . . . . .	103
Разрешающая способность телескопа . . . . .	106
Эффект Доплера . . . . .	112

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД

Солнечное излучение . . . . .	117
Приборы для измерения излучения . . . . .	120
Видимый блеск звезд . . . . .	123
Абсолютный блеск звезд . . . . .	128
Пульсирующие звезды . . . . .	129
Светимость и масса . . . . .	132
Температура звезд . . . . .	134
Цвет звезд . . . . .	139
Давление света . . . . .	143

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВЕЗД

Спектры звезд . . . . .	147
Химические элементы во Вселенной . . . . .	150
Масса и энергия . . . . .	153
Происхождение энергии звезд . . . . .	155
Облака в космическом пространстве . . . . .	159
Радиоизлучение на волне 21 см . . . . .	163
Космическое радиоизлучение . . . . .	167
Рождение звезд . . . . .	172

## КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Состав космических лучей . . . . .	175
Распад $\mu$ -мезона . . . . .	179
Происхождение космических лучей . . . . .	183
Солнечное излучение . . . . .	185
Околоземные зоны радиации . . . . .	188



## В МИРЕ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Система отсчета . . . . .	192
Относительные скорости . . . . .	194
Опыт Майкельсона . . . . .	197
Специальная теория относительности . . . . .	200
Замедленное время . . . . .	202
Движущиеся мезоны . . . . .	206
Сокращение длин . . . . .	209
Прирост массы . . . . .	213
Космическое путешествие с точки зрения теории относительности . . . . .	214

## ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Галактики . . . . .	218
Разбегание галактик . . . . .	221
Основные постулаты общей теории относительности . . . . .	224
Искривление пространства . . . . .	229
Следствия общей теории относительности . . . . .	233
Модели мира . . . . .	239
Расширяющаяся Вселенная . . . . .	241

Г. Линднер

### ФИЗИКА В КОСМОСЕ

Редактор Г. КУЗЬМЕНКО

Художник А. АНТОНОВА

Художественный редактор Н. ФИЛЬЧАГИНА

Технический редактор Ю. ЭККЕ

Корректор О. РУМЯНЦЕВА

Сдано в производство 25/V 1966 г. Подписано к печати 22/VIII 1966 г.  
Бумага  $84 \times 108 \frac{1}{32} = 3,38$  бум. л. 13,02 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 11,65.

Изд. № 27/3363. Цена 99 коп. Зак. 307

Темплан 1966 г. изд-ва «МИР», пор. № 135

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 16 Главполиграфпрома Комитета по печати  
при Совете Министров СССР. Москва, Трехпрудный пер., 9



99 ксп.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»