

УНИВЕРСУМ



ФИЗИКА

11

  
ПРОСВЕЩЕНИЕ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

УНИВЕРСУМ

С.В. Громов Н.В. Шаронова Е.П. Левитан

# ФИЗИКА

# 11

Оптика  
Тепловые явления  
Строение и свойства вещества  
Строение Вселенной

**Учебник для 11 класса  
общеобразовательных  
учреждений**

**Под редакцией  
Н. В. Шароновой**

Допущено Министерством образования  
и науки Российской Федерации

7-е издание,  
дополненное и переработанное

Москва «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 2006



УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72  
Г87

В оформлении учебника использован фрагмент гравюры  
голландского художника М. К. ЭСХЕРА

**Громов С. В.**

**Г87** Физика : оптика. Тепловые явления. Строение и свойства вещества. Строение Вселенной : учеб. для 11 кл. общеобразоват. учреждений / С. В. Громов, Н. В. Шаронова, Е. П. Левитан; под ред. Н. В. Шароновой. — 7-е изд., доп. и перераб. — М. : Просвещение, 2006. — 336 с. : ил. — ISBN 5-09-014625-X.

Оригинальный учебник нового поколения, написанный по авторской программе, отличается строгой логикой, современным подходом к изложению материала, широким использованием исторических фактов. Содержит большое количество задач с примерами решения важнейших типов.

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72

ISBN 5-09-014625-X

© Издательство «Просвещение», 2006  
© Художественное оформление.  
Издательство «Просвещение», 2006  
Все права защищены

## ОПТИКА

**Оптикой** называют раздел физики, в котором изучаются свойства света. Установление природы света было результатом исследований многих ученых. В середине XVII в. сначала итальянский священник Ф. Гримальди, а затем английский ученый Р. Гук высказали идею о волновой природе света. Иной точки зрения на природу света придерживался Исаак Ньютон. Главным недостатком волновой теории он считал то, что с ее помощью не удавалось объяснить прямолинейность распространения света. Необходимость обоснования этого свойства привела Ньютона к представлению о свете как потоке мельчайших частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и распространяющихся в соответствии с законами механики. Отдавая предпочтение корпускулярной концепции света, Ньютон тем не менее был осторожен в окончательных выводах и допускал иные взгляды на природу света. Гипотезу о световых корпускулах он считал лишь «очень вероятным следствием своей доктрины, а не основной предпосылкой».

Между тем в 1662 г. французский ученый Пьер Ферма сформулировал принцип, позволяющий вывести все известные к тому времени законы оптики, вообще не используя каких бы то ни было гипотез о природе света. Согласно **принципу Ферма**:

Свет распространяется между двумя точками по такому пути, которому соответствует наименьшее время распространения.

Такое поведение света Ферма объяснял тем, что «природа действует наиболее легкими и доступными путями». При этом он подчеркивал, что подразумевает именно наиболее легкий, а не кратчайший путь, т. е. такой путь, на котором свет встречает минимальное сопротивление и потому проходит его за наименьшее время.

Принцип Ферма позволял вывести законы отражения и преломления света, но не давал ответа на вопрос: что такое свет? Поэтому споры о природе света продолжались. В 1690 г. вышла (написанная за 12 лет до этого) книга голландского ученого Христиана Гюйгенса «Трактат о свете». В этой книге свет рассматривался как продольные механические волны, распространяющиеся с большой, но конечной скоростью в особой, заполняющей всю Вселенную среде — мировом эфире. Что же не нравилось Гюйгенсу и другим сторонникам волновой теории в корпускулярной концепции света? Основные их возражения (часто не обоснованные) сводились к следующему:

1) Известно, что пересекающиеся световые пучки не влияют друг на друга. Как это может быть, если свет — это обладающие массой корпускулы?



Пьер Ферма



Христиан Гюйгенс

2) Как могут материальные частицы (световые корпускулы) двигаться со столь огромной скоростью, какой является скорость света?

3) Почему мы не замечаем уменьшения массы Солнца, если излучаемый им свет есть поток корпускул?

Однако авторитет Ньютона был столь велик, что подавляющее большинство ученых того времени, позабыв о колебаниях и сомнениях самого Ньютона, отбросили все возражения и приняли корпускулярную теорию света.

Ситуация изменилась лишь в начале XIX в., когда английский ученый Т. Юнг и французский физик О. Френель с помощью разработанной ими волновой теории смогли объяснить такие свойства света, которые корпускулярная теория объяснить не могла. Свет стали считать упругими волнами, распространяющимися в мировом эфире.

В 60-х гг. XIX в. Максвелл предсказал существование электромагнитных волн и обнаружил, что скорость их распространения совпадает со скоростью света. Обнаружив это совпадение, Максвелл пришел к выводу, что «свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма». Другими словами, *свет — это электромагнитные волны*.

Опыты Герца подтвердили электромагнитную теорию света, так как они продемонстрировали совпадение свойств электромагнитных волн с уже известными свойствами света.

Впоследствии было установлено, что диапазон частот существующих в природе электромагнитных волн очень велик: от нескольких герц до  $10^{20}$  Гц и выше. Сюда относятся (в порядке возрастания частоты) радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение и гамма-лучи. Все они имеют общую — электромагнитную — природу и распространяются в вакууме с одной и той же скоростью  $c \approx 300\,000$  км/с.



# Глава 1. ВОЛНОВАЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## § 1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Электромагнитные волны — это поперечные волны. Если свет — это тоже электромагнитные волны, то и они, следовательно, должны быть поперечными. Какие оптические явления подтверждают это?

Обратимся к «Трактату о свете» Христиана Гюйгенса. В этой книге Гюйгенс описывает удивительное явление, обнаруженное им в опытах с прозрачными кристаллами исландского шпата: если пропустить свет через кристалл шпата, то после вторичного прохождения света через такой же кристалл, при определенной ориентации светового луча и кристалла, луч практически полностью исчезает. Отсюда можно заключить, что в результате действия на свет первого кристалла вышедшая из него световая волна оказывается не такой, какой она была до этого. Впоследствии французский ученый Э. Малюс назвал это явление *поляризацией света*.

В электромагнитной теории света поляризация световых волн объясняется следующим образом.

Некоторые кристаллы (например, турмалин) обладают свойством пропускать только такие световые волны, в которых проекция вектора напряженности  $\vec{E}$  на определенное направление в кристаллической решетке кристалла, называемое его осью, отлична от нуля.

*Естественный свет*, создаваемый Солнцем или какими-либо обычными источниками, например лампами, представляет собой совокупность световых волн, излучаемых огромным количеством различных атомов. В таком свете колебания вектора  $\vec{E}$  происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения света. Если пучок такого света направить на кристалл турмалина, то через него будет пропущена лишь та часть падающего света, в которой электрический вектор ориентирован параллельно оси кристалла.

**Определение.** Процесс ориентации колебаний вектора  $\vec{E}$  световой волны в определенном направлении называется **поляризацией света**.

В результате прохождения через кристалл турмалина свет из естественного превращается в *линейно-поляризованный*, т. е. такой, у которого вектор  $\vec{E}$  во всех точках совершает колебания параллельно одному-единственному направлению.

Теперь легко понять в описанном выше опыте Гюйгенса роль второго кристалла. До него доходит уже поляризованный (первым кристаллом) свет. При параллельном расположении осей обоих кристаллов ничего интересного не произойдет. Если же второй кри-



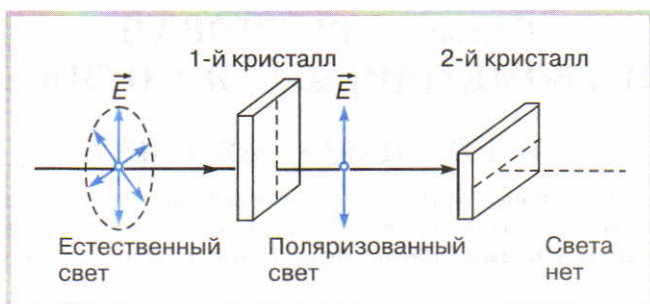


Рис. 1

талл вращать, оставляя первый неподвижным, то по мере увеличения угла между их осями интенсивность прошедшего света будет постепенно уменьшаться и при взаимно перпендикулярном расположении осей обратится в нуль (рис. 1). В этом случае в падающей на второй кристалл световой волне не будут присутствовать колебания вектора  $\vec{E}$ , параллельные оси кристалла, и потому этот кристалл не пропустит свет, полностью поглотив его.

Поперечность световых волн приводит не только к возможности погасить свет, прошедший через кристалл исландского шпата другим таким же кристаллом, но и к целому ряду физических явлений. Это — двойное лучепреломление в некоторых кристаллах, в частности в кристалле исландского шпата (при определенном значении угла падения луча света относительно оси кристалла происходит раздвоение луча). Это — явление Брюстера (если отраженный от кристалла пучок естественного света направить на другой такой же кристалл, то при определенном угле падения от второго кристалла свет вообще не отразится). Это — изменение интенсивности света, предварительно пропущенного через поляризатор, при дальнейшем прохождении света через растворы некоторых веществ, например сахара (причем явление существенно зависит от концентрации раствора) и др. Иногда всю совокупность различных явлений, связанных с поперечностью световых волн и возможностью получить поляризованный свет, называют поляризацией. Во всех этих явлениях происходит поворот плоскости поляризации световой волны различными средами — твердыми и жидкими. Такие среды называются оптически активными. Оптически активные вещества есть и в живых организмах, в продуктах органического происхождения. На поляризационных явлениях основано их широкое применение в технике.

Явление поляризации свойственно лишь поперечным волнам. Если бы световые волны были продольными, то их поляризация была бы невозможна. Одним из первых, кто это понял, был французский ученый О. Ж. Френель. Исследование поляризации света вынудило Френеля прийти к выводу, что свет — это распространяющиеся в эфире поперечные, а не продольные волны. Это дало повод

его современнику Томасу Юнгу заметить: «Гипотеза мистера Френеля, по крайней мере, чрезвычайно остроумна, и с ее помощью можно проводить удовлетворительные расчеты; однако ее сопровождает одно обстоятельство, следствия которого поистине *ужасающи*... До сих пор считалось, что только твердые тела обладают поперечной упругостью, поэтому если принять те различия, которые описывает сам вдохновитель волновой системы в своих «Лекциях», то можно прийти к выводу, что светоносный эфир, заполняющий все пространство и проникающий почти во все вещества, не только упруг, но и абсолютно тверд!!!»

Такое сочетание свойств, когда эфир должен был быть одновременно и твердым и абсолютно проницаемым для любых перемещающихся в нем тел, выглядело странным и неестественным. Устранить эту трудность удалось лишь на основе электромагнитной теории света, разработанной Максвеллом. Электромагнитные волны не нуждаются в какой-либо среде-носителе и могут распространяться даже в вакууме. Поэтому гипотеза о существовании светоносного эфира стала ненужной и проблема о его странных свойствах отпала сама собой.

- ? 1. Расскажите о развитии взглядов на природу света. 2. В чем заключается принцип Ферма? 3. Чем отличается естественный свет от линейно-поляризованного? 4. Какую роль сыграло изучение поляризации света в установлении истинной природы света?

## § 2. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Рассмотрим падение световой волны на плоскую границу раздела двух однородных и изотропных сред<sup>1</sup>. Обозначим через  $\vec{k}$  волновой вектор падающей волны, а через  $\vec{k}'$  волновой вектор отраженной волны. Так как частоты и скорости распространения этих волн одинаковы, то

$$k = \frac{\omega}{v} = k'.$$

Проведем к поверхности раздела сред вектор нормали  $\vec{n}$ . Плоскость, в которой лежат векторы  $\vec{k}$  и  $\vec{n}$ , называется *плоскостью падения* волны. Из соображений симметрии ясно, что в плоскости падения будет лежать и вектор  $\vec{k}'$  отраженной волны (рис. 2), так как выходы из этой плоскости в направлениях «на нас» и

<sup>1</sup> Однородность и изотропность среды означают, что ее свойства во всех точках и по всем направлениям внутри данной среды одинаковы.

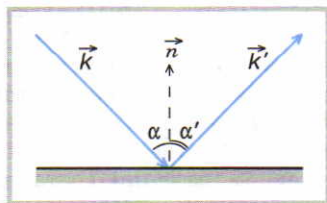


Рис. 2

«от нас» полностью равноправны и ни одному из них (в силу изотропности) нельзя отдать предпочтение.

Так как направления волновых векторов совпадают с направлениями лучей, то мы, таким образом, приходим к выводу:

Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восставленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. (2.1)

Измеряемые от нормали углы  $\alpha$  и  $\alpha'$ , показанные на рисунке 2, называют соответственно *углом падения* и *углом отражения* света. Докажем, что эти углы равны. Для этого заметим, что число «гребней» и падающей и отраженной волн, приходящееся на единицу длины вдоль оси  $X$ , одно и то же (рис. 3). Поэтому равны и проекции волновых векторов на эту ось:

$$k_x = k'_x.$$

Но

$$k_x = k \sin \alpha = \frac{\omega}{v} \sin \alpha,$$

$$k'_x = k' \sin \alpha' = \frac{\omega}{v} \sin \alpha'.$$

Поэтому

$$\sin \alpha = \sin \alpha',$$

и, следовательно,

Угол отражения равен углу падения: (2.2)  
 $\alpha' = \alpha.$

Утверждения (2.1) и (2.2) составляют содержание **закона отражения света**.

Возникает вопрос: какая доля световой энергии возвращается при отражении света в первую среду? Расчеты показывают, что при нормальном ( $\alpha=0$ ) падении света на границу раздела двух диэлектриков **коэффициент отражения** (т. е. отношение интенсивности отраженного света к интенсивности падающего света) определяется выражением

$$R = \left( \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} \right)^2, \text{ или } R = \left( \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} \right)^2 \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости света соответственно в первой и второй средах. Например, на границе воздуха со стеклом ( $v_1 = c$ ,  $v_2 = c/1,5$ )  $R = 0,04$ ,  $R = 4\%$ , а на границе воздуха с водой ( $v_2 = c/1,33$ )  $R = 0,02$ ,  $R = 2\%$ . Эти значения показывают, что ни вода, ни стекло при нормальном падении света не могут служить хорошим зеркалом. На практике в зеркалах используют отражение света от задней поверхности стекла, покрытой тонким слоем металла (так как коэффици-



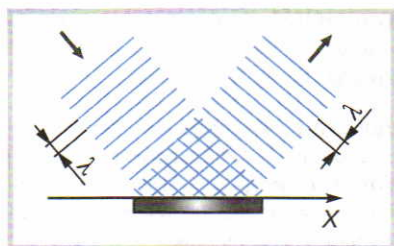


Рис. 3



Рис. 4

ент отражения металлов, например серебра, характеризующий их отражательную способность, намного больше, чем диэлектриков, и близок к 100%).

Напомним, что *изображение предмета в плоском зеркале* всегда является 1) мнимым, 2) прямым, 3) равным по размеру самому предмету и 4) находящимся на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним. Другими словами, изображение предмета в плоском зеркале расположено симметрично предмету относительно плоскости зеркала (рис. 4).

Закон отражения света впервые был сформулирован древнегреческим ученым Евклидом около 300 г. до н. э. В I в. до н. э. римский поэт Тит Лукреций Кар в своей знаменитой поэме «О природе вещей» этот закон изложил следующим образом:

...Отскакивать все от вещей заставляет природа  
И отражаться назад под таким же углом, как упало.

Через 100 лет Герон Александрийский заметил, что «из всех лучей, падающих из данной точки и отражающихся в данную точку, минимальны те, которые от плоских и сферических зеркал отражаются под равными углами». Спустя полторы тысячи лет, заменив минимальность пути требованием минимальности времени, Пьер Ферма сформулировал принцип, позволивший доказать не только закон отражения, но и закон преломления света.

Закон отражения (2.2) с помощью принципа Ферма доказывается следующим образом. Пусть луч света выходит из т.  $A$  и после отражения от поверхности  $MN$  попадает в т.  $B$  (рис. 5). Тогда требованию минимальности времени распространения света будет удовлетворять лишь такой путь  $AOB$ , при котором угол падения  $\alpha$  равен углу отражения  $\alpha'$ . Любой другой путь, например  $AO_1B$ , длиннее  $AOB$  и потому требует для своего прохождения большего времени. Чтобы убедиться в этом, достаточно построить т.  $B'$ , симметричную т.  $B$  относительно  $MN$ , и заметить, что длина пути  $AOB$  равна длине прямолинейного отрезка  $AOB'$ , а длина

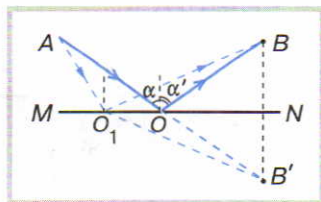


Рис. 5



пути  $AO_1B$  равна длине ломаной линии  $AO_1B'$ . Но отрезок прямой всегда короче ломаной, проведенной между теми же точками. Поэтому  $OB < AO_1B$ , что и требовалось доказать.

- ? 1. Что такое плоскость падения? 2. Докажите, что волновой вектор отраженной волны лежит в плоскости падения. 3. Сформулируйте закон отражения света. 4. Докажите, что угол падения равен углу отражения: а) на основе волновой теории; б) с помощью принципа Ферма. 5. Охарактеризуйте изображение, даваемое плоским зеркалом.

### § 3. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

При падении света на границу раздела двух сред часть света отражается, а часть проходит во вторую среду, как правило изменяя направление своего распространения (преломляясь). Обозначим через  $\vec{k}$  волновой вектор падающей световой волны, а через  $\vec{k}''$  волновой вектор преломленной волны. Модули этих векторов соответственно равны:

$$k = \frac{\omega}{v_1}, \quad k'' = \frac{\omega}{v_2},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости света в первой и второй средах. Из соображений симметрии (см. § 2) ясно, что вектор  $\vec{k}''$  должен лежать в плоскости падения света (рис. 6). Поэтому мы можем утверждать, что

Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения луча лежат в одной плоскости. (3.1)

Пусть  $\alpha$  — *угол падения*, а измеряемый от нормали к преломленному лучу угол  $\beta$  — *угол преломления* света. Найдем связь между ними. Нетрудно заметить, что число «гребней» падающей и преломленной волн, приходящееся на единицу длины вдоль оси  $X$ , одно и то же (рис. 7). Поэтому равны и проекции волновых векторов на эту ось:

$$k_x = k''_x,$$

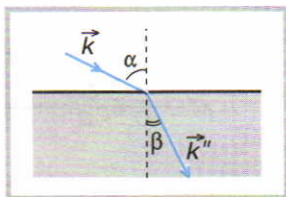


Рис. 6

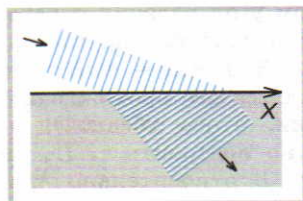


Рис. 7

но  $k_x = k \sin \alpha = \frac{\omega}{v_1} \sin \alpha,$

$$k'_x = k' \sin \beta = \frac{\omega}{v_2} \sin \beta.$$

Поэтому  $\frac{\omega}{v_1} \sin \alpha = \frac{\omega}{v_2} \sin \beta,$

и, следовательно,

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред, равная отношению скоростей света в этих средах: (3.2)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Утверждения (3.1) и (3.2) составляют содержание закона преломления света.

**Определение.** Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называется **относительным показателем преломления** второй среды по отношению к первой:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Из закона преломления следует, что относительный показатель преломления равен отношению скоростей света в данных средах:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3.3)$$

Показатель преломления какой-либо среды по отношению к вакууму называют **абсолютным показателем преломления** данной среды. Из формулы (3.3) следует, что он равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3.4)$$

Используя это выражение, нетрудно доказать, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно обратному отношению абсолютных показателей преломления рассматриваемых сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.5)$$

Абсолютный показатель преломления любой среды всегда больше единицы. Например, у воды  $n \approx 1,3$ , у стекла  $n \approx 1,5$ , у воздуха  $n \approx 1,0003 \approx 1$ . В вакууме  $n = 1$ .

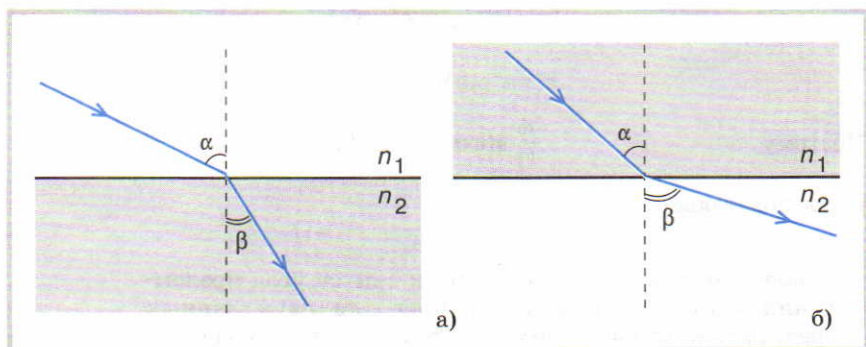


Рис. 8

Из двух сред та, в которой скорость света меньше (а показатель преломления  $n$  больше), называется *оптически более плотной*, а среда, в которой эта скорость больше (а показатель преломления  $n$  меньше), — *оптически менее плотной*. Из закона преломления следует, что, попадая в среду, оптически более плотную ( $n_2 > n_1$ ), луч света отклоняется от своего первоначального направления в сторону к перпендикуляру к границе раздела двух сред (рис. 8, а), а попадая в среду, оптически менее плотную ( $n_2 < n_1$ ), — в сторону от перпендикуляра к границе раздела двух сред (рис. 8, б).

Наибольший практический интерес представляет преломление света в стеклянных линзах, треугольных призмах и плоскопараллельных пластинках, находящихся в воздухе.

Используя закон преломления, можно доказать, что плоскопараллельная пластинка (рис. 9) сохраняет направление падающего на нее параллельного пучка лучей ( $\beta' = \alpha$ ), лишь смещая ось этого пучка на некоторое расстояние  $h$ . При заданном угле падения это смещение пропорционально толщине пластины  $d$  и при уменьшении последней также уменьшается.

В отличие от плоскопараллельной пластинки *треугольная стеклянная призма* (рис. 10) *отклоняет падающий на нее луч в сторону*

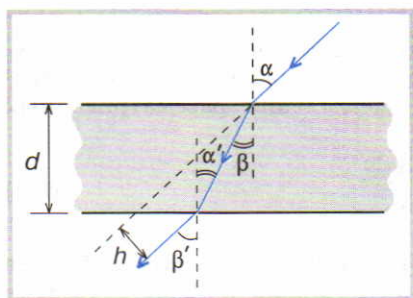


Рис. 9

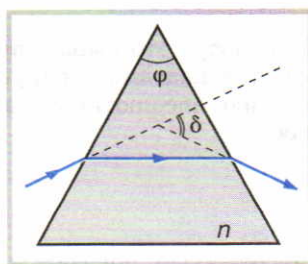


Рис. 10



ну к своему основанию. В общем случае угол этого отклонения  $\delta$  зависит как от показателя преломления вещества призмы  $n$  и ее преломляющего угла  $\varphi$ , так и от угла падения на нее луча света. Если, однако, преломляющий угол призмы мал (настолько, что можно считать, что  $\sin \varphi \approx \varphi$ ), то для почти нормального падения света на такую призму угол отклонения перестает зависеть от угла падения и оказывается равным:

$$\delta = (n - 1)\varphi. \quad (3.6)$$

### Для дополнительного чтения

Для того чтобы убедиться в этом, обратимся к рисунку 11. Из этого рисунка видно, что за время  $t = \frac{l}{v}$ , требующееся свету, чтобы пройти внутри стекла через основание призмы, волновой фронт у ее вершины (двигаясь здесь со скоростью  $c = nv$ ) успеет пройти расстояние, в  $n$  раз большее:  $s = ct = c \frac{l}{v} = nl$ . Учитывая малость углов, отсюда находим:

$$\delta = \frac{s - l}{h} = \frac{nl - l}{h} = (n - 1) \frac{l}{h} = (n - 1)\varphi,$$

что совпадает с формулой (3.6).

Рассмотрим подробнее случай, когда свет попадает из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ( $n_2 < n_1$ ). Так как при этом угол преломления больше угла падения, то при увеличении последнего неизбежно наступит момент, когда при некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигает своего максимального значения  $\beta_0 = 90^\circ$  (рис. 12).

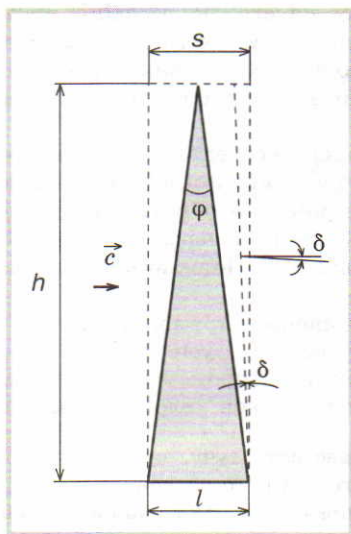


Рис. 11

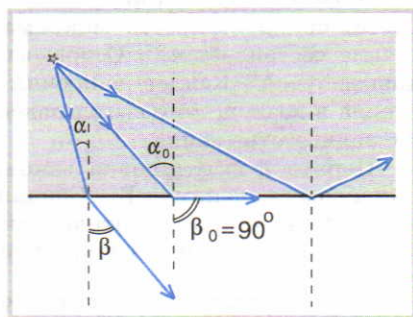


Рис. 12





Рис. 13

В этом случае

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \beta_0} = \frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_0,$$

откуда

$$\alpha_0 = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right).$$

При угле падения  $\alpha > \alpha_0$  преломление света во вторую среду прекращается и весь свет от границы с ней полностью отражается. По этой причине описанное явление получило название **полного отражения**, а угол  $\alpha_0$  — **предельного угла полного отражения**. Например, переходу стекло — воздух ( $n_1 = n_{\text{ст}} = 1,5$ ,  $n_2 = 1$ ) соответствует предельный угол полного отражения, равный:

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n_{\text{ст}}} = 42^\circ.$$

Значение коэффициента отражения при полном отражении превосходит его самые большие значения, имеющие место при зеркальном отражении от полированных поверхностей, и составляет практически 100%.

Полное отражение используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодов (рис. 13), а также в отражательных приборах (см. задачи 15 и 16) различных оптических приборов (биноклей, перископов и т. п.).

Явление преломления света впервые было описано Евклидом. В его книге «Катоптрика» рассказывается об опыте с кольцом: наблюдатель смотрит на кубок с лежащим на его дне кольцом так, что края кубка не позволяют его увидеть; затем, не меняя положения глаз, в кубок начинают наливать воду, и через некоторое время кольцо становится видимым. Однако закон преломления света древним грекам открыть не удалось.

В 1611 г. немецкий ученый И. Кеплер, исследуя преломление света, обнаружил, что максимальный угол преломления света в стекле составляет  $42^\circ$ . Основываясь на **принципе обратимости световых лучей**<sup>1</sup>, Кеплер заключил отсюда, что при переходе света из стекла в воздух, когда угол падения больше  $42^\circ$ , должно наблюдаться полное отражение.

Первая формулировка закона преломления принадлежит голландскому ученому В. Снеллиусу. Когда он умер (1626 г.), в его бумагах нашли оптический трактат, в котором утверждалось, что при преломлении света отношение косекансов углов падения и

<sup>1</sup> Этот принцип утверждает, что если навстречу лучу, претерпевшему ряд отражений и преломлений, пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, что и первый луч, но в обратном направлении. Этот принцип легко доказывается с помощью принципа Ферма.

преломления является величиной постоянной, не зависящей от угла падения света.

Через 11 лет Декарт впервые попытался связать преломление света со скоростью света в разных средах. У него получилось

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Не все согласились с такой формулой. В 1648 г. появилось знаменитое рассуждение о «солдатском фронте» патера Меньяна. Согласно Меньяну, при переходе света из одной среды в другую луч света изменяет свое направление аналогично тому, как изменяется направление движения «солдатского фронта», когда луг, по которому идут солдаты, преграждается пашней, граница которой проходит наклонно «фронту». Отсюда следовало, что отношение  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  равно прямому отношению скоростей  $\frac{v_1}{v_2}$ , а не обратному  $\frac{v_2}{v_1}$ , как это получилось у Декарта.

В 1662 г. появилось первое строгое доказательство закона преломления, принадлежащее Пьеру Ферма. С помощью своего принципа минимального времени он получил

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (3.7)$$

что опять противоречило выводу, к которому пришел Декарт.

Спор о правильном законе преломления принял особенно острый характер, когда выяснилось, что закон принимает разный вид в зависимости от того, считаем ли мы свет волнами или потоком частиц (корпускул).

Так, например, в корпускулярной теории Ньютона преломление света объяснялось тем, что, когда свет попадает на границу раздела двух сред, на частицы света действует сила, направленная перпендикулярно этой границе (рис. 14). Поскольку такая сила не может изменить горизонтальную проекцию скорости частицы, то  $v_1 \sin \alpha = v_2 \sin \beta$  и закон преломления принимает «декартов» вид.

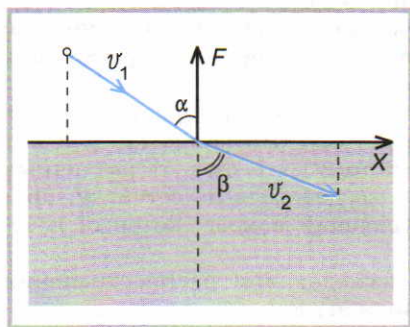


Рис. 14

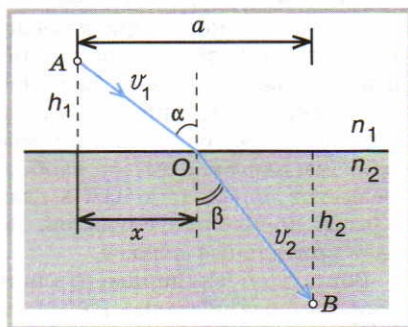


Рис. 15



Волновая же теория Гюйгенса приводила к другому выводу — тому, который совпадал с формулой Ферма (3.7).

Какому же из законов отдать предпочтение? Из формулы Декарта — Ньютона следовало, что при переходе света из воздуха в стекло (или воду) скорость света возрастает, а из формулы Ферма — Гюйгенса следовало, что она при этом уменьшается. Поэтому спор о правильном законе преломления (а вместе с ним и о природе света) могло разрешить только непосредственное измерение скорости света в различных средах.



1. В чем заключается закон преломления света? Докажите его.
2. Может ли угол преломления быть равным углу падения?
3. Что такое относительный показатель преломления?
4. Чему равен абсолютный показатель преломления?
5. Какую из двух сред называют оптически более плотной?
6. Выведите формулу (3.5).
7. В каком случае наблюдается полное отражение? Кто его открыл?
8. Выведите формулу (3.7), используя принцип Ферма. Указание: выразив время, которое требуется свету на прохождение пути  $AOB$  (рис. 15), через  $v_1$ ,  $v_2$  и  $x$ :

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + h_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(a-x)^2 + h_2^2}}{v_2},$$

- найдите производную найденной функции и приравняйте ее к нулю.
9. Какую роль играл закон преломления света в споре о природе света?

## § 4. СКОРОСТЬ СВЕТА

В древности лучи света часто отождествляли со «зрительными лучами», которые якобы выходили из глаз и в результате «ощупывания» предметов позволяли видеть последние. Скорость таких лучей считалась бесконечно большой. То, «что лучи, исходящие из наших глаз, движутся с бесконечной скоростью», — писал в I в. Герон Александрийский, — можно заключить из следующего соображения. Когда, например, сначала закрыв глаза и затем открыв их, мы взглянем на небо, то не требуется никакого промежутка времени до того момента, когда зрительные лучи достигнут неба. В самом деле, мы увидим звезды, как только взглянем вверх, хотя расстояние до них, можно сказать, бесконечное...».

Однако постепенно люди поняли, что никаких «зрительных лучей» не существует и видим мы не потому, что какие-то лучи выходят из наших глаз, а, наоборот, потому, что свет от различных предметов попадает к нам в глаза и, воздействуя на сетчатку, приводит к появлению сигналов, поступающих в мозг, который и создает зрительные образы.

Вопрос об экспериментальном исследовании распространения света впервые поставил Галилей. «Должны ли мы считать его мгновенным, — спрашивал Галилей, — или же совершающимся во времени, как все другие движения? Нельзя ли опытом убедиться, ка-

ково оно на самом деле?» Анализируя эту проблему, Галилей обращает внимание на то, что если наблюдать «с большого расстояния действие артиллерии, то свет от пламени выстрелов без всякой потери времени запечатлевается в нашем глазу в противоположность звуку, который доходит до уха через значительный промежуток времени». «Достаточно быстрое распространение звука заставляет уже предполагать, что распространение света должно быть крайне быстрым», — делает вывод Галилей и предлагает провести следующий опыт. «Два лица держат каждый по огню, заключенному в фонаре или в чем-либо подобном, который можно открывать и закрывать движением руки на виду у компаньона; став друг против друга на расстоянии нескольких локтей, участники начинают упражняться в закрывании и открывании своего огня на виду у компаньона таким образом, что как только один замечает свет другого, так тотчас же открывает и свой... После подобных упражнений на малом расстоянии два упомянутых компаньона помещаются вместе со своими огнями в расстоянии двух или трех миль друг от друга и, выждав ночи для производства опыта, начинают внимательно наблюдать, получается ли ответ на открытие и закрытие огня с той же быстротою, что и на близком расстоянии; если получается, то можно с достоверностью заключить, что распространение света происходит мгновенно; если бы для него требовалось время, то расстояние в три мили, пробегаемое светом от одного источника до глаза другого участника и обратно, было бы достаточным, чтобы обнаружить известное запоздание».

Самому Галилею, однако, так и не удалось «убедиться, действительно ли появление противоположного света совершается внезапно». Единственный вывод, к которому он пришел, — это то, что «если оно происходит и не внезапно, то, во всяком случае, с чрезвычайной быстротой, почти мгновенно».

Впервые скорость света была измерена в 1676 г. работавшим в Париже датским астрономом Олафом Рёмером. Его результаты были опубликованы в «Трактате о свете» Гюйгенса, по приглашению которого Рёмер и прибыл в Париж.

Рёмер наблюдал затмения ближайшего спутника Юпитера — Ио. Во время затмения Ио входит в тень своей планеты и перестает быть видимым. Спустя некоторое время он выходит из нее и снова появляется на небе. Затем все повторяется. Поскольку Земля и Юпитер движутся при этом по своим орбитам, то расстояние, с которого нам приходится наблюдать за затмениями, все время меняется. Если измерить число  $N$  затмений, которое произойдет за время  $t$ , в течение которого расстояние между Юпитером и Землей станет снова прежним (приблизительно один год), то по формуле  $T = t/N$  можно найти период обращения спутника вокруг своей планеты. Для Ио он составляет приблизительно 42,5 ч.

Метод определения скорости света, по Рёмеру, состоит в следующем. Начнем наблюдать за затмениями Ио в тот день, когда Земля и Юпитер оказываются на одной прямой с Солнцем и расстоя-



ние между ними минимально (положения  $Z_1$  и  $Ю_1$  на рисунке 16). Предположим, что спутник Юпитера вышел из тени своей планеты в момент  $t_0$  относительно Юпитера. На Земле это событие будет замечено спустя время, требующееся свету на преодоление расстояния  $l$  от Юпитера до Земли, т. е. в момент времени

$$t_1 = t_0 + \frac{l}{c}. \quad (4.1)$$

Через некоторое время Земля и Юпитер, двигаясь по своим орбитам, окажутся в положениях  $Z_2$  и  $Ю_2$  (см. рис. 16). Если за это время спутник Юпитера совершит  $n$  оборотов, то очередной его выход из тени произойдет в момент времени  $t'_0 = t_0 + nT$  относительно Юпитера и в момент времени

$$t_2 = t'_0 + \frac{l'}{c} = t_0 + nT + \frac{l'}{c} \quad (4.2)$$

для наблюдателя на Земле. Здесь  $l' = l + \Delta l$  — новое расстояние от Земли до Юпитера, превышающее старое на некоторую величину  $\Delta l$ .

Промежуток времени между наблюдаемыми выходами Ио из тени при этом составит

$$\Delta t = t_2 - t_1 = nT + \frac{\Delta l}{c}.$$

Отсюда скорость света

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t - nT} = \frac{\Delta l}{\tau},$$

где  $\tau = \Delta t - nT$  есть *время запаздывания* появлений Ио, вызванное конечностью скорости распространения света (это время нужно свету для преодоления расстояния  $\Delta l$ ). Зная  $\Delta l$  и измерив время запазды-

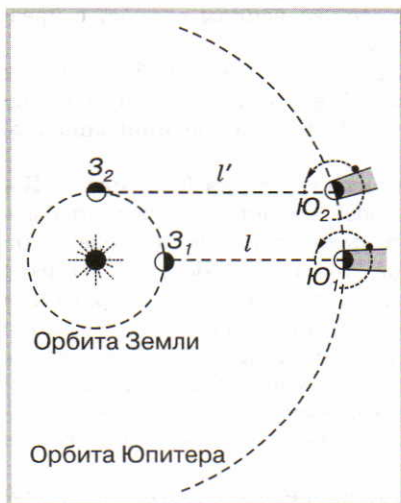


Рис. 16

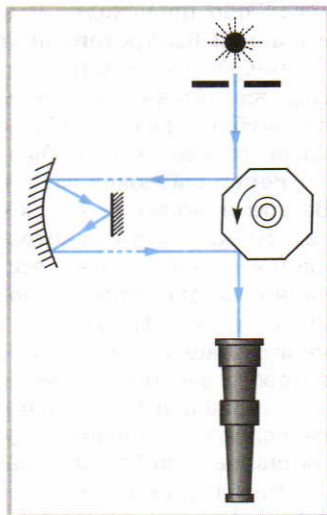


Рис. 17

вания, Рёмер получил для скорости света значение 212 000 км/с. Значение оказалось очень большим, но все-таки конечным!

Используя полученное значение, Рёмер в сентябре 1676 г. предсказал время запаздывания затмения Ио, которое должно было наблюдаться через два месяца. Убедившись в ноябре в правильности своего предсказания, он представил доклад о полученных результатах в Парижскую академию наук.

Доклад Рёмера на заседании Парижской академии наук вызвал бурю протестов со стороны присутствовавших там ученых, по мнению которых скорость света была бесконечно большой. Главное возражение их состояло в том, что для других спутников Юпитера никакого запаздывания не наблюдалось<sup>1</sup>.

Результаты Рёмера требовали экспериментальной проверки в земных условиях. Однако сделать это никому не удавалось. Даже при расстояниях в несколько километров нужно было измерять промежутки времени порядка миллионных долей секунды, а никакой аппаратуры столь высокой точности в XVII—XVIII вв. не было.

Первым, кто сумел определить скорость света в земных условиях, был французский физик А. И. Физо. В 1849 г., применив весьма хитроумный метод прерывания света вращающимся зубчатым колесом, он получил значение  $c = 313\,000$  км/с.

Через год с помощью вращающегося зеркала это удалось сделать другому французскому ученому — Ж. Фуко. Измерив сначала скорость света в воздухе, Фуко затем поместил на пути света в своем опыте трубу с водой и обнаружил, что скорость света в воде составляет  $3/4$  скорости света в воздухе. Этот результат явился для физиков того времени окончательным подтверждением волновой теории света.

В дальнейшем скорость света измеряли много раз и с помощью все более и более тонких опытов. Рассмотрим один из них — опыт с вращающимся зеркалом, проведенный в 1926 г. американским физиком Альбертом Майкельсоном.

Установка Майкельсона (рис. 17) размещалась на двух горных вершинах, разделенных расстоянием 35,4 км. Зеркалом служила восьмигранная стальная призма. После отражения от призмы луч света попадал на систему зеркал, возвращающих его назад. Для того чтобы этот луч попадал в глаз наблюдателя, вращающаяся призма должна была за время распространения света туда и обратно  $t = 2l/c$ , успеть повернуться хотя бы на  $1/8$  оборота. Другими словами, время  $t$  должно составлять  $1/8$  периода вращения призмы:

$$2 \frac{l}{c} = \frac{T}{8}.$$

Отсюда скорость света

$$c = \frac{16l}{T} = 16lv,$$

<sup>1</sup> На самом деле это было связано лишь с недостаточной точностью наблюдений.

где  $\nu$  — частота, с которой должна была вращаться призма, чтобы отраженный от нее свет попадал в глаз наблюдателя. Определив эту частоту, Майкельсон получил значение скорости света, равное 299 796 км/с.

«То, что скорость света, — писал Майкельсон, — является категорией, недоступной человеческому воображению, и что, с другой стороны, ее возможно измерить с необыкновенной точностью, делает ее определение одной из самых увлекательных проблем, с которыми может столкнуться исследователь».

Наиболее точное значение скорости света было получено в 1972 г. американским ученым К. Ивенсоном с сотрудниками. В результате независимых измерений частоты  $\nu$  и длины волны  $\lambda$  лазерного излучения ими было получено значение  $c = \lambda\nu = 299\,792\,456,2 \pm 0,2$  м/с. Однако в 1983 г. на заседании Генеральной ассамблеи мер и весов было принято новое определение метра<sup>1</sup>, из которого следовало, что скорость света в вакууме абсолютно точно равна:

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с.}$$



1. Почему Галилею не удалось определить скорость света? 2. Опишите астрономический метод определения скорости света, примененный Рёмером.
3. Почему результаты опытов Фуко рассматривались учеными того времени как подтверждение именно волновой (а не корпускулярной) теории света? 4. Опишите опыт Майкельсона.
5. Чему равна скорость света в вакууме?

## § 5. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. ЦВЕТА ТЕЛ

Итак, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с. Но свет бывает разным: желтым, красным, зеленым и т. п. Какому же из них соответствует приведенное значение скорости? Оказывается, любому. В вакууме лучи всех цветов распространяются с одной и той же скоростью. Можно ли отсюда заключить, что и в веществе лучи разного цвета распространяются одинаково быстро?

Чтобы ответить на этот вопрос, необязательно измерять скорость всех этих лучей в какой-либо среде. Можно поступить проще. Вспомним соотношение (3.4)

$$n = \frac{c}{v}.$$

Из него следует, что различным скоростям  $v$  соответствуют и разные показатели преломления  $n$ . Поэтому для ответа на поставленный выше вопрос достаточно просто посмотреть, под одинаковыми ли углами будут преломляться лучи разных цветов, попадая из пустоты на границу с какой-либо средой. Если под одинаковыми,

<sup>1</sup> Согласно этому определению метр — это длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды.



то, значит, световые волны разного цвета имеют в этой среде одну и ту же скорость; если же под разными, то каждому цвету в ней соответствует своя скорость.

Как же обстоит дело в действительности? Обратимся к экспериментальным данным. Еще в 1605 г. английский ученый Томас Харриот, изучая преломление света в жидкостях, обнаружил, что показатель преломления одного и того же вещества для красных лучей один, а для зеленых лучей другой. Это означает, что скорость световых волн разного цвета в веществе различна.

В настоящее время известно, что *цвет, видимый глазом, определяется частотой световой волны*. Поэтому открытие Харриота можно рассматривать как обнаружение зависимости показателя преломления вещества от частоты света.

**Определение.** Зависимость показателя преломления, а также скорости света от его частоты (или цвета) называется **дисперсией света**.

Сам Харриот о своем открытии умолчал, и о его исследованиях узнали значительно позже. В 1611 г. аналогичное явление, только не в жидкостях, а в стекле, обнаружил итальянский ученый Марк Антоний Доминис. И хотя его результаты были опубликованы, широкого распространения они не получили, а сам Доминис через 13 лет умер в тюрьме инквизиции.

В 1648 г. дисперсия света была переоткрыта чешским ученым Я. М. Марци. Однако и на этот раз никто не обратил на это внимания. И лишь когда соответствующие опыты были проведены Исааком Ньютоном, мир наконец узнал о новом явлении.

«В начале 1666 года, — вспоминал впоследствии Ньютон, — то есть тогда, когда я был занят шлифовкой оптических стекол несферической формы, я достал треугольную стеклянную призму и решил испытать с ее помощью прославленное явление цветов. С этой целью я затемнил свою комнату и проделал в ставнях небольшое отверстие, с тем чтобы через него мог проходить тонкий луч солнечного света. Я поместил призму у места входа света так, чтобы он мог преломляться к противоположной стене. Сначала вид ярких и живых красок, получавшихся при этом, приятно развлек меня. Но через некоторое время, заставив себя присмотреться к ним более внимательно, я был удивлен их продолговатой формой...»

Итак, при прохождении через стеклянную призму луча белого света на экране, установленном позади призмы, наблюдается радужная цветная полоска (см. цв. вклейку I). На этой полоске можно различить семь основных цветов, плавно и постепенно переходящих друг в друга: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Наблюдаемая картина получила название **призматического или дисперсионного спектра**.

До Ньютона белый (солнечный) свет считался простым, а различные цвета — его изменениями, появляющимися в результате взаимодействия света с «темнотой» или каким-либо веществом.

Ньютон же, по словам современников, высказал «странную и необычную» гипотезу:

«Мы должны различать два рода цветов: одни первоначальные и простые, другие же сложные из них». Некоторые из простых лучей, по Ньютону, «способны производить красный цвет и никакого другого, другие — желтый и никакого другого и т. д. ...Цвета не являются качествами света, происходящими из-за преломлений или отражений в естественных телах (как обычно считают), но суть естественные и прирожденные качества, различные в различных лучах».

Свои окончательные выводы Ньютон сформулировал в виде нескольких теорем. Первые две из них гласят:

«**Теорема I.** Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степеням преломляемости».

«**Теорема II.** Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости».

Итак, *белый свет*, по Ньютону, *не является простым*. Он имеет сложный состав и может быть разложен в спектр с помощью стеклянной призмы.

Рецензию на работу Ньютона было поручено сделать Роберту Гуку. Просидев над отзывом несколько часов подряд, Гук в своей рецензии выдвинул столь сильное возражение против ньютоновской теории, что Ньютону для обдумывания своего ответа потребовалось полгода.

По мнению Гука, утверждение о том, что в белом свете содержатся лучи всех цветов, равносильно утверждению о том, что в воздухе, заключенном в органных мехах, содержатся сразу все звуковые тона. Иными словами, это то же самое, что говорить о том, что шум есть совокупность правильных музыкальных звуков.

В своем ответе на рецензию Гука Ньютон ушел от рассматриваемой проблемы<sup>1</sup> и сосредоточил внимание на слабых местах теории самого Гука.

Однако вслед за возражениями Гука последовала критика со стороны Гюйгенса. «Если бы то, что лучи света в их первоначальном состоянии были некоторые красными, некоторые синими и так далее, было правдой, — писал он, — то было бы очень трудно объяснить на механических принципах, в чем же состоит это различие цветов».

Гюйгенс оказался очень прозорлив — объяснение этого различия появилось лишь в XIX в., когда было установлено, что излучения различных цветов отличаются частотой колебаний.

**Определение.** Электромагнитное излучение одной определенной и строго постоянной частоты называется **монохроматическим**.

---

<sup>1</sup> Через 200 лет проблема роли прибора при спектральном разложении света вновь привлекла к себе внимание. Ее решением занимались Рэлей, Пуанкаре и другие ученые.



Белый свет не является монохроматическим, так как, имея сложный состав, он не характеризуется одной какой-либо определенной частотой.

Почему же различные монохроматические излучения (лучи разной частоты и, следовательно, разного цвета) преломляются в призме под разными углами? Правильного объяснения этому явлению и закономерности, которой оно подчиняется (дисперсии света), Ньютон не нашел. Это и неудивительно: ведь тогда еще не была известна истинная природа света.

Классическая электромагнитная теория дисперсии была создана лишь в конце XIX в. Х. А. Лоренцем. Согласно электромагнитной теории дисперсия света является результатом взаимодействия световой волны с молекулами вещества. Когда световая волна проникает в вещество, под действием электрического поля этой волны электроны молекул начинают совершать вынужденные колебания. Частота этих колебаний совпадает с частотой волны, а амплитуда зависит от соотношения между данной частотой и собственной частотой колебаний электрона. При разной частоте света амплитуда вынужденных колебаний электронов и поляризация вещества также различны. Различной при этом оказывается и диэлектрическая проницаемость вещества  $\epsilon$ . Но скорость света  $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ , а показатель преломления  $n = c/v$ . Поэтому если  $\epsilon$  зависит от частоты света, то от частоты зависят и  $v$  с  $n$ .

Особенно значительной становится амплитуда колебаний электронов в веществе при  $v \approx v_0$ . В этом случае наблюдается резонансное поглощение энергии и излучения соответствующих частот из падающего света «выпадают» (поглощаются).

У молекул бесцветного прозрачного вещества, например стекла, наиболее существенные резонансные частоты лежат в ультрафиолетовой области. Поэтому обычное стекло хорошо пропускает видимый свет и поглощает ультрафиолетовый.

У цветных стекол резонансы имеются и в видимом диапазоне частот. Из-за этого часть проходящего света поглощается и остается лишь тот, который и придает цвет стеклу (см. цв. вклейку I). Например, глядя на лампу накаливания через синий светофильтр, мы увидим ее синей потому, что синий светофильтр из всей совокупности излучений лампы пропускает только синие, фиолетовые и голубые лучи, а остальные поглощает.

Цвет непрозрачных предметов определяется тем светом, который они диффузно (рассеянно) отражают. Так, например, предмет, поглощающий все лучи, кроме зеленых, отражая их, приобретает зеленый цвет.

Если же поверхность какого-либо предмета одинаково хорошо отражает лучи всех цветов спектра, то она будет казаться белой. Белые поверхности характеризуются значительным коэффициентом отражения. Причем, чем больший коэффициент отражения имеет белая поверхность, тем более светлой она кажется. Очень светлым поэтому выглядит белый порошок оксида магния (коэффициент от-



ражения 96%). Свежевыпавший снег отражает 85% падающего светового потока, белая бумага — 75%.

«Черных лучей» в природе не существует. Предмет нам кажется черным в том случае, когда он поглощает почти весь падающий на него свет, одинаково плохо отражая лучи всех цветов. Например, коэффициент отражения черного бархата составляет всего лишь 0,3%.

Вообще все цвета, встречающиеся в природе, делят на *ахроматические* и *хроматические*. К ахроматическим цветам относятся белый, черный и серый цвета.

К хроматическим относятся спектральные цвета (от красного до фиолетового), пурпурные (малиновый, вишневый и сиреневый) и все остальные (коричневый, салатный и т. п.), получающиеся в результате смешения различных цветов между собой. Пурпурные цвета возникают при смешении в разной пропорции красных и фиолетовых или синих цветов.

Красный, зеленый и синий цвета являются *взаимно независимыми*. Это означает, что каждый из них не может быть получен в результате смешения двух других. Направив на белый экран три пучка света, пропущенные соответственно через красный, зеленый и синий светофильтры, в месте их пересечения можно получить белый цвет. Правда, он получится лишь при одном совершенно определенном соотношении яркостей складывающихся световых пучков. Изменяя это соотношение, в результате смешения красного, зеленого и синего цветов можно получить практически любой другой хроматический цвет.

- ?
1. Чем определяется цвет, видимый глазом?
  2. Что такое дисперсия?
  3. Почему стеклянная призма разлагает пучок белого света в спектр?
  4. Какое излучение называют монохроматическим?
  5. Чем объясняется белый цвет снега, черный цвет сажи, зеленый цвет листьев, цвет красного стекла?
  6. Красный лист бумаги рассматривают через синее стекло. Какого цвета будет казаться бумага?
  7. Меняется ли цвет излучения при его переходе из одной среды в другую? Почему?
  8. Почему система цветного телевидения основана на применении трех цветов — красного, зеленого и синего?

## § 6. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проблема объяснения дисперсии света особенно остро встала в первой половине XIX в., когда в споре о природе света победила волновая теория Юнга и Френеля. Неожиданный удар по их теории был нанесен французским ученым Симеоном Пуассоном. Если бы теория Юнга и Френеля была справедливой, заявил Пуассон, дисперсии света в природе не существовало бы. В самом деле, из волновой теории следует, что скорость упругих волн определяется лишь свойствами среды, в которой эти волны распространяются.

Поэтому в одной и той же среде любые световые волны (хотя бы и разного цвета) должны распространяться с одинаковой скоростью.

Тогда еще не знали, что разгадка проблемы кроется в том, что свет — это не упругие, а электромагнитные волны. Но уже в то время стало ясно, что для создания теории дисперсии нужны дополнительные исследования этого явления.

За экспериментальное исследование дисперсии света взялся немецкий ученый Йозеф Фраунгофер. В 1815 г. он сконструировал **спектроскоп** — аппарат, предназначенный для визуального наблюдения спектров. Спектроскоп состоит из трех основных частей: коллиматора, призмы и зрительной трубы для разглядывания спектра. Зрительную трубу можно заменить на экран в виде матового стекла или на фотопластинку. В последнем случае получится аппарат, называемый **спектрографом**.

Устройство спектрографа показано на рисунке 18. Коллиматор  $K$  представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза  $L_1$ . Щель находится в фокусе этой линзы. Благодаря этому свет падает на призму параллельным пучком. Призма разлагает этот свет в спектр, который с помощью линзы  $L_2$  фокусируется на фотопластинке.

Излучаемый любым источником свет, как правило, имеет сложный состав. Совокупность частот или длин волн, характеризующих излучение какого-либо вещества, называется **спектром излучения** этого вещества.

На экране спектроскопа свету каждой частоты, присутствующему в излучении исследуемого вещества, соответствует свое изображение входной щели (т. е. своя, как говорят, спектральная линия). Все вместе они и образуют наблюдаемый спектр.

Характер спектра излучения определяется свойствами отдельных излучающих атомов, а также взаимодействием атомов вещества между собой.

Вещества, находящиеся в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии, дают **линейчатый** спектр излучения, т. е. такой спектр, в котором присутствуют не все, а только некоторые ча-

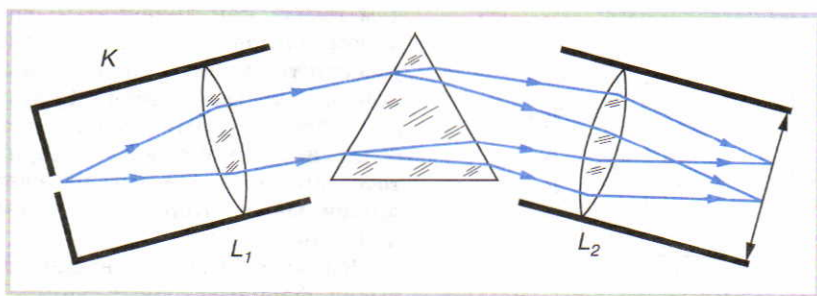


Рис. 18



стоты. На экране спектроскопа он представляется в виде ряда нескольких цветных линий, разделенных темными промежутками.

Газы, находящиеся в молекулярном состоянии, дают **полосатый** спектр. Цветные полосы этого спектра представляют собой совокупности большого числа тесно расположенных и потому практически сливающихся спектральных линий.

Плотные газы, у которых взаимодействие частиц достаточно сильно, а также твердые и жидкие тела и высокотемпературная плазма дают **непрерывный** или **сплошной** спектр, в котором содержатся излучения всех частот. На экране спектроскопа непрерывный спектр представляется в виде сплошной радужно окрашенной полосы. Именно такой спектр в свое время наблюдал Ньютон.

Распределение энергии по частотам в непрерывном спектре излучения различных тел различно. На одних частотах энергия излучения может быть больше, на других меньше. У черных тел кривая зависимости энергии излучения от частоты имеет максимум (рис. 19). Положение этого максимума зависит от температуры излучающего тела и с ростом последней смещается в сторону больших частот. У тел с температурой ниже  $4000^\circ\text{C}$  этот максимум приходится на инфракрасный диапазон частот, при температуре около  $6000^\circ\text{C}$  — на видимый (желтый), а при еще большей температуре — на ультрафиолетовый.

Исследуя с помощью своего спектроскопа солнечный свет, Фраунгофер вдруг обнаружил на фоне сплошного спектра Солнца большое количество темных линий. Теперь эти линии называются фраунгоферовыми. Аналогичные линии им были обнаружены также в спектрах Венеры, Сириуса и других светил.

Причину появления этих линий объяснил в 1859 г. немецкий физик Густав Кирхгоф. Дело в том, что вещества способны не только излучать, но и поглощать свет. Совокупность частот или длин волн, поглощаемых данным веществом, называется **спектром поглощения** этого вещества.

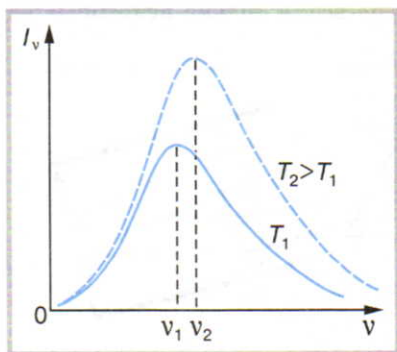


Рис. 19

Темные линии на фоне сплошного спектра, которые наблюдал Фраунгофер, были не чем иным, как линейчатым спектром поглощения. Часть электромагнитных волн, излучаемых поверхностным слоем Солнца (его фотосферой), поглощается солнечной атмосферой, в результате чего до Земли доходит свет, лишенный некоторых своих компонентов.

Кирхгоф изучил несколько тысяч фраунгоферовых линий в солнечном спектре. Чтобы как



можно сильнее растянуть полосу этого спектра, он использовал уже не одну, а четыре призмы, с помощью которых ему удалось получить радужную полосу длиной почти 3 м.

Скрупулезное изучение спектров излучения и поглощения различных тел позволило Кирхгофу и его коллеге Бунзену обнаружить следующие **спектральные закономерности**:

1) атомы данного химического элемента излучают волны строго определенного набора частот, вследствие чего линейчатый спектр излучения у каждого химического элемента свой, не совпадающий со спектром ни одного другого химического элемента;

2) атомы данного химического элемента поглощают волны тех частот, которые они сами могут излучать, из-за чего темные линии в спектре поглощения данного химического элемента оказываются расположенными в тех же местах спектра, что и линии в спектре его излучения (см. цв. вклейку II).

Открытие этих закономерностей позволило Кирхгофу и Бунзену разработать **спектральный анализ** — *метод определения химического состава вещества по его спектру*.

Для проведения спектрального анализа нужно располагать таблицей спектров всех химических элементов. После этого останется только сравнить с ними спектр исследуемого вещества и, обнаружив совпадения в расположении линий, сделать соответствующий вывод.

В настоящее время различают *качественный* спектральный анализ, с помощью которого устанавливают, какие химические элементы входят в состав вещества, и *количественный* спектральный анализ, позволяющий по интенсивности спектральных линий химического элемента определить его количественное содержание в исследуемом образце.

Спектральный анализ выгодно отличается от химического анализа своей простотой, высокой чувствительностью (например, с его помощью можно обнаружить наличие химического элемента, масса которого в данном образце составляет  $\sim 10^{-10}$  г), а также возможностью определять химический состав отдаленных тел, в том числе Солнца и других звезд.

Любопытно, что за 15 лет до открытия спектрального анализа французский философ О. Конт утверждал, что «мы ничего не сможем узнать о звездах, кроме того что они существуют». Развитие науки опровергло это мнение. С помощью спектрального анализа на Солнце удалось обнаружить около 70 химических элементов. И теперь хорошо известно, из чего состоят Солнце и другие звезды. Интересно, что, когда Кирхгоф обнаружил на Солнце золото, один из его приятелей заметил: «Ну и что толку от вашего солнечного золота? Ведь его все равно не доставить на Землю!» Через несколько лет Кирхгоф получил за свои исследования солнечного спектра золотую медаль. Показывая ее своему приятелю, Кирхгоф сказал: «Как видите, солнечный спектр все-таки дал мне немного золота!»

С открытием спектрального анализа в науке наступила новая эра — эра спектроскопии. В 1860 г. Кирхгоф и Бунзен с помощью спектрального анализа доказали существование нового металла — цезия, в следующем году ими был открыт рубидий. В этом же году Крукс открыл таллий, через год Рейх и Рихтер нашли индий. Еще через несколько лет Жансен открыл гелий. Причем гелий (что в переводе значит «солнечный») сначала был обнаружен в атмосфере Солнца, и лишь через 13 лет его нашли на Земле.

В настоящее время спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении и атомной индустрии; с помощью этого анализа определяют химический состав руд и минералов в геологии, а также состав различных находок в археологии. Спектральный анализ применяется при исследовании состава различных слоев атмосферы, почвы, красок (при реставрационных работах) и т. п. Важную роль он играет и в криминалистике.

Исследуя с помощью спектрального анализа волосы, в разное время срезанные с головы Наполеона, было установлено, что он был отравлен мышьяком, небольшие дозы которого ему подмешивали в пищу во время его пребывания на острове Святой Елены.

- ?
1. Кто изобрел спектроскоп?
  2. Как устроен спектрограф?
  3. Что называют спектром излучения?
  4. Какие вещества дают линейчатый спектр? полосатый спектр? сплошной спектр?
  5. Что такое спектр поглощения?
  6. Что называют спектральным анализом? Какие закономерности лежат в его основе?
  7. В чем состоят преимущества спектрального анализа по сравнению с химическим?
  8. Как вы думаете, почему на могиле Й. Фраунгофера написаны слова: «Приблизил звезды»?

### *Для дополнительного чтения*

## § 7. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Начавшиеся во второй половине XIX в. многочисленные исследования спектров звезд привлекли внимание физиков к одной старой проблеме. Еще в 1842 г. австрийский физик Х. Доплер указал на то, что движение источника света должно влиять на частоту световых волн, регистрируемую наблюдателем. Однако в то время теория Доплера была подвергнута критике, и на протяжении последующих лет, вплоть до самой смерти в 1853 г., Доплер так и не смог добиться всеобщего признания предсказанного им эффекта.

**Определение.** Эффектом Доплера называется изменение частоты принимаемых волн при относительном движении их источника и наблюдателя (приемника волн).



Лишь в 1860 г. Эрнст Мах обратил внимание ученых на этот эффект, предсказав, что линии поглощения в спектрах движущихся звезд должны быть сдвинуты относительно их положения в лабораторных спектрах. Через 7 лет такое смещение линий действительно было обнаружено в спектре звезды Сириус.

Теория эффекта Доплера довольно проста. Пусть неподвижный источник света испускает монохроматические волны с частотой  $\nu_0$ . Эту частоту можно представить в виде

$$\nu_0 = \frac{N}{\Delta\tau}, \quad (7.1)$$

где  $N$  — число колебаний, совершенное за время  $\Delta\tau$ , измеренное в системе отсчета, связанной с самим источником. Эффект Доплера заключается в том, что если тот же источник будет двигаться относительно наблюдателя, то последний зарегистрирует частоту  $\nu$ , отличную от  $\nu_0$ .

Для нахождения связи между  $\nu$  и  $\nu_0$  рассмотрим ситуацию, когда наблюдатель покоится в точке  $A$  (рис. 20), а источник  $S$  движется вдоль луча зрения (принятого за ось  $X$ ) с некоторой скоростью  $\vec{v}$ . Если в момент времени  $t_1$ , когда расстояние между наблюдателем и источником равно  $l$ , последний излучает волну, то эта волна дойдет до наблюдателя через время  $l/c$ , т. е. в момент времени

$$T_1 = t_1 + \frac{l}{c}.$$

Волна, испущенная источником спустя некоторое время  $\Delta t$ , т. е. в момент  $t_2 = t_1 + \Delta t$ , достигнет наблюдателя в момент времени

$$T_2 = t_2 + \frac{l + v_x \Delta t}{c},$$

где  $v_x$  — *лучевая скорость* источника, т. е. проекция скорости источника на луч зрения.

Таким образом, волны, излучаемые источником в течение времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , будут регистрироваться наблюдателем в течение времени

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \left(1 + \frac{v_x}{c}\right) \Delta t.$$

Разделив число колебаний  $N$  на это время, мы получим регистрируемую частоту волны:

$$\nu = \frac{N}{\Delta T} = \frac{N}{(1 + v_x/c) \Delta t}, \quad (7.2)$$

или с учетом уравнения (7.1):

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + v_x/c} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta t}. \quad (7.3)$$

Если скорость источника  $v \ll c$ , то собственное время  $\Delta t$  можно считать равным времени  $\Delta\tau$ , прошедшему по часам

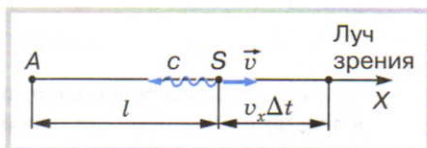


Рис. 20



системы отсчета, связанной с наблюдателем. В этом (не релятивистском) случае  $\Delta\tau/\Delta t=1$ , и, следовательно,

$$v = \frac{v_0}{1 + v_x/c}. \quad (7.4)$$

Отсюда видно, что если  $v_x > 0$ , то  $v < v_0$ , а если  $v_x < 0$ , то  $v > v_0$ . Это означает, что при удалении источника частота принимаемых волн уменьшается, а при его приближении эта частота увеличивается. Если же источник движется перпендикулярно лучу зрения, то  $v_x = 0$  и эффект Доплера отсутствует.

Вследствие эффекта Доплера линии в спектрах поглощения звезд и туманностей должны смещаться к красному концу спектра, если эти объекты удаляются от нас, и к фиолетовому концу спектра, если они приближаются к нам. Измерив относительное смещение спектральных линий (т. е.  $\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v - v_0}{v_0}$ ), можно определить лучевую скорость космического объекта по отношению к Земле. В частности, именно таким образом было установлено, что наша Вселенная расширяется и что скорость, с которой удаляются скопления галактик друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними (Э. Хаббл, 1929 г.).

Для количественной проверки эффекта Доплера было произведено измерение смещения линий в спектрах противоположных краев Солнца. Вычисленная по этим данным скорость осевого вращения Солнца (около 2 км/с) совпала со скоростью вращения, которая была определена независимым путем по перемещению солнечных пятен.

Эффект Доплера наблюдается не только для электромагнитных (в частности, световых), но и для звуковых волн. Именно этим эффектом объясняется изменение высоты звука, издаваемого пронесшимся мимо станции поездом.

?

1. В чем заключается эффект Доплера? 2. В каком случае частота принимаемых волн от движущегося источника увеличивается, а в каком уменьшается? 3. Как изменяется высота звука, воспринимаемого пассажиром на станции от пронесшегося мимо поезда? 4. Используя соотношения

$$v = \frac{v_0}{1 + v_x/c} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta t},$$

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

получите формулу релятивистского эффекта Доплера. 5. Существует ли в теории относительности поперечный эффект Доплера (когда  $v_x = 0$ )?

## § 8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА (I)

Наиболее ярко волновые свойства света обнаруживаются в явлениях интерференции и дифракции. Рассмотрим сначала первое из этих явлений.

**Определение.** Интерференцией света называется явление возникновения устойчивого в пространстве и во времени распределения интенсивности света, возникающее при наложении двух (или нескольких) световых волн.

Интерференцию света можно объяснить на основе электромагнитной теории. Согласно этой теории интенсивность электромагнитных, в частности световых, волн пропорциональна среднему значению квадрата напряженности электрического поля в волне:

$$I \sim \overline{E^2}. \quad (8.1)$$

Когда две световые волны с напряженностями  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ , которые мы для простоты будем считать параллельными<sup>1</sup>, приходят в какую-либо точку пространства, они создают там поле, напряженность которого определяется по принципу суперпозиции:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (8.2)$$

Если волны придут в данную точку в одной фазе, то векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  окажутся сонаправленными и результирующая напряженность поля в этой точке возрастет. Если же световые волны придут в данную точку в противофазе, то векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  окажутся противоположно направленными и результирующая напряженность поля в этой точке уменьшится.

Для нахождения интенсивности света  $I$  возведем обе части равенства (8.2) в квадрат:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha$$

и усредним по времени. В результате мы получим сумму интенсивностей складывающихся волн  $I_1$  и  $I_2$  и величины  $I_{12} \sim 2E_1E_2 \cos \alpha$  (где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ ):

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}.$$

**Условие интерференционного максимума:**

Интенсивность света максимальна в тех точках пространства, где разность фаз складывающихся волн равна нулю или четному числу  $\pi$ :

$$\Delta\varphi = 0, \pm 2\pi, \dots = 2n\pi,$$

где  $n$  — любое целое число.

<sup>1</sup> Когда световые волны поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, интерференция не наблюдается.

В этом случае  $\vec{E}_1 \uparrow \vec{E}_2$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ ,  $I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2}$ , и потому интенсивность света оказывается равной:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2.$$

Если, в частности,  $I_1 = I_2$ , то результирующая интенсивность света в данной точке будет в 4 раза превышать интенсивность одной волны:  $I_{\max} = 4I_1$ .

#### Условие интерференционного минимума:

Интенсивность света минимальна в тех точках пространства, где разность фаз складывающихся волн равна нечетному числу  $\pi$ :

$$\Delta\varphi = \pm \pi, \pm 3\pi, \dots = (2n + 1)\pi,$$

где  $(2n + 1)$  — любое нечетное число.

В этом случае  $\vec{E}_1 \downarrow \vec{E}_2$ ,  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos \alpha = -1$ ,  $I_{12} = -2\sqrt{I_1 I_2}$ , и потому интенсивность света оказывается равной:

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2.$$

Если, в частности,  $I_1 = I_2$ , то результирующая интенсивность света будет равна нулю:  $I_{\min} = 0$ . В этом случае говорят, что волны гасят друг друга.

Результат интерференции, таким образом, зависит от разности фаз волн, пришедших в данную точку. Эту разность фаз можно найти с помощью формулы

$$\varphi = \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} \text{ либо } \varphi = \omega t - kr.$$

В первом случае мы получим разность фаз двух плоских монохроматических волн:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t - (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r}. \quad (8.3)$$

Во втором случае — разность фаз двух сферических монохроматических волн:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t - (k_2 r_2 - k_1 r_1). \quad (8.4)$$

И в том и в другом случае, как видим, разность фаз с течением времени  $t$  изменяется. Поэтому в одной и той же точке пространства волны будут то усиливать, то ослаблять друг друга. В соответствии с этим угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  будет принимать значение то 0, то  $180^\circ$ , а его косинус — то +1, то -1. Величина  $I_{12}$  при этом обратится в нуль и интенсивность света  $I$  везде окажется равной просто сумме интенсивностей  $I_1$  и  $I_2$ . Интерференция света в этом случае наблюдаться не будет.

Для того чтобы наблюдалась устойчивая (стационарная) интерференционная картина (т. е. оределенная последовательность чередующихся максимумов, минимумов и промежуточных значений интенсивности), необходимо, чтобы разность фаз  $\Delta\varphi$  складывающихся световых волн с течением времени не изменялась.

**Определение.** Волны, разность фаз которых не зависит от времени, называются **когерентными**.



Из выражений (8.3) и (8.4) видно, что *две монохроматические волны когерентны, если их частоты одинаковы.*

В самом деле, если  $\omega_1 = \omega_2$ , то соответствующие разности фаз (для волн, распространяющихся в одной и той же среде и имеющих одинаковые начальные фазы) оказываются равными:

$$\Delta\varphi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} \quad (8.5)$$

для плоских волн и

$$\Delta\varphi = k(r_1 - r_2) = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r \quad (8.6)$$

для сферических волн. Время  $t$  в эти выражения уже не входит.

Величина  $\Delta r = r_1 - r_2$ , появившаяся в выражении (8.6), определяется разностью расстояний от источников волн до данной точки и потому называется *геометрической разностью хода* двух волн.

Если две плоские когерентные световые волны направить на экран, то мы увидим на нем параллельно расположенные светлые и темные интерференционные полосы. Светлые полосы будут наблюдаться в тех местах экрана, где волны будут усиливать друг друга, а темные — там, где они будут ослаблять друг друга.

*Интерференция — явление, свойственное всем волнам:* и электромагнитным, и упругим, и волнам на поверхности жидкостей. Поэтому интерференцию можно наблюдать не только для световых, но и, например, для звуковых волн.

Для того чтобы обнаружить на слух звуковые «интерференционные полосы», нужно подключить к звуковому генератору, настроенному на частоту 2—3 кГц, два громкоговорителя и расположить их на расстоянии 1—1,5 м друг от друга. После этого каждому ученику в классе следует закрыть одно ухо рукой и просто подвигать головой влево-вправо.

- ?** 1. Какое явление называют интерференцией света? 2. Как объясняется интерференция света с точки зрения электромагнитной теории? 3. В чем заключается условие интерференционного максимума? минимума? 4. Какие волны называют когерентными? 5. Почему устойчивую интерференционную картину дают только когерентные волны? 6. В каком случае две монохроматические волны являются когерентными? 7. Что называют геометрической разностью хода двух волн? 8. Какое число полуволн ( $\lambda/2$ ) должно укладываться на разности хода двух волн, чтобы они давали интерференционный максимум? минимум?

## § 9. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА (II)

Открытие и исследование интерференции света как типично волнового явления связаны с именем замечательного английского ученого Т. Юнга.

Томас Юнг родился в 1773 г. В два года он уже научился читать, в 6 лет начал изучать латынь. В возрасте от 9 до 14 лет он



Томас Юнг

изучил греческих и римских классиков и овладел французским, итальянским, древнееврейским, персидским и арабским языками. В этот же период, решив сделать микроскоп, он научился токарному делу и дифференциальному исчислению.

Девизом Юнга было: «Всякий человек может сделать то, что делают другие». И вся его жизнь стала подтверждением этому. Он успевает дважды в неделю брать уроки танцев, дважды — уроки музыки и рисования и четыре раза заниматься верховой ездой. Он был цирковым наездником и канато-

ходцем, прекрасным знатоком живописи и доктором медицины. Он сыграл важную роль в расшифровке египетских иероглифов и научился играть почти на всех музыкальных инструментах. В его сочинениях разбираются вопросы механики, оптики, физиологии зрения, акустики, теплоты, гидравлики, астрономии, химии, геофизики, медицины, зоологии, филологии, музыки, живописи, кораблестроения, теории прочности и др. Именно он первым ввел в науку термин «энергия».

В январе 1800 г. Юнг выступил с докладом, который ознаменовал начало атаки на сторонников корпускулярной теории света. Отметив, что «со времени публикации несравненных работ сэра Исаака Ньютона его учение об испускании частиц света... сделалось почти безраздельно принятым», Юнг заметил, что «в ньютоновской системе имеются затруднения, на которые обращалось мало внимания». Например, «каким образом происходит, что все световые лучи, возникают ли они от слабой электрической искры, от удара двух кремней, от ничтожнейшей степени ощутимого глазом накаливания, распространяются с одинаковой скоростью. Какое же основание может дать корпускулярная теория для того, чтобы все эти разнообразные источники света выбрасывали из себя светящиеся частицы с равной скоростью?». Не удовлетворяло Юнга и ньютоновское объяснение «цветов тонких пластинок».

В 1801 г. Юнг высказывает очень важное предположение, согласно которому «ощущение различных цветов зависит от различной частоты колебаний, возбуждаемых светом на сетчатке».

Вскоре он приходит к выводу, что световые волны могут усиливать и ослаблять друг друга, и в науке появляется новый термин — «интерференция».

«Предположим, — пишет Юнг, — что некоторое число одинаковых волн движутся с постоянной скоростью по поверхности стоячей воды озера и входят в узкий канал, выходящий из озера; допустим далее, что другая подобная же причина возбудила другой равный ему ряд волн, которые приходят в тот же канал с той же скоро-



стью одновременно с первым. Ни один из этих рядов волн не уничтожит друг друга, но их действия взаимно наложатся; ежели они войдут в канал таким образом, что гребни одного ряда совпадут с гребнями другого, то они совместно приведут к возникновению ряда больших сложенных друг с другом гребней, но ежели гребни одного ряда расположены так, что они соответствуют впадинам другого, то они должны строго заполнить эти впадины и поверхность воды должна оставаться гладкой. Я полагаю, что сходные эффекты имеют место всякий раз, когда таким образом смешиваются две порции света; и это я называю всеобщим законом интерференции света».

Для подтверждения своей теории Юнг проводит классический опыт по интерференции света, описание которого впоследствии вошло во все учебники физики. В этом опыте свет от Солнца падал на экран с узкой щелью  $S$  (рис. 21). Прощедшая через эту щель световая волна падала затем на второй экран уже с двумя щелями  $S_1$  и  $S_2$ . Когда в область перекрытия световых волн, идущих от  $S_1$  и  $S_2$ , помещался третий экран, то на нем появлялись параллельные интерференционные полосы, содержащие (по словам Юнга) «красивое разнообразие оттенков, постепенно переходящих один в другой».

Изучая интерференционные полосы, Юнг впервые определил длину и частоту световых волн разного цвета. Современные значения их длин волн приведены в таблице.

| Цвет       | Длина волны, нм       |
|------------|-----------------------|
| Красный    | $760 < \lambda < 620$ |
| Оранжевый  | $620 < \lambda < 590$ |
| Желтый     | $590 < \lambda < 560$ |
| Зеленый    | $560 < \lambda < 500$ |
| Голубой    | $500 < \lambda < 480$ |
| Синий      | $480 < \lambda < 450$ |
| Фиолетовый | $450 < \lambda < 380$ |

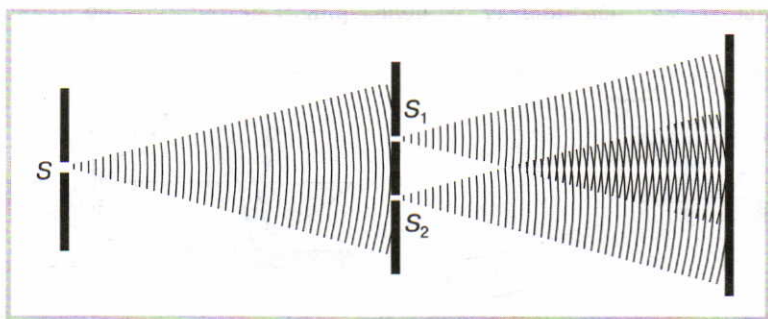


Рис. 21



С помощью своей теории интерференции Юнг впервые сумел объяснить и такое хорошо известное всем явление, как разноцветная окраска тонких пленок (масляные пленки на воде, мыльные пузыри, крылья стрекоз и т. п.).

**Интерференция в тонких пленках** (рис. 22) обусловлена сложением световых волн, которые возникают при отражении от передней и задней поверхностей пленки. При этом у волн разной частоты (и следовательно, разного цвета), входящих в состав падающего белого света, максимумы наблюдаются в разных местах пленки (из-за ее разной толщины), что и придает пленке радужную окраску.

Аналогичным образом объясняются и так называемые **кольца Ньютона** — радужная картина, впервые полученная Ньютоном в 1675 г. Если поместить на плоскую стеклянную пластинку плосковыпуклую стеклянную линзу с большим радиусом кривизны (в опыте Ньютона этот радиус составлял около 10 м), то между стеклами возникнет очень тонкая прослойка воздуха (рис. 23) и темное место соприкосновения линзы с пластинкой окажется окруженным разноцветными интерференционными кольцами.

Интерференция в тонких пленках используется для *просветления оптики*. Так называют уменьшение коэффициента отражения поверхностей линз оптических приборов путем нанесения на них одной или нескольких специальных пленок. В отсутствие такого просветления потери света из-за многократного отражения в сложных объективах могут достигать 70% и более. Для уменьшения этих потерь на каждую линзу наносят очень тонкую пленку (с показателем преломления, меньшим, чем у стекла) такой толщины, что световые волны, отраженные от ее передней и задней поверхностей, оказываются в противофазах и при интерференции гасят друг друга. Гашение отраженного света ведет к увеличению доли энергии света, проходящего через оптическую систему, из-за чего ее и называют просветленной.

Возникает вопрос: если световые волны способны интерферировать друг с другом, то почему же мы тогда не наблюдаем чередование минимумов и максимумов интенсивности света на поверхностях, освещенных светом обычных ламп? Отсутствие интерференционной картины в этом случае объясняется тем, что световые волны от всех обычных (т. е. нелазерных) источников не являются

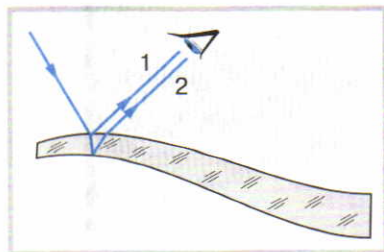


Рис. 22

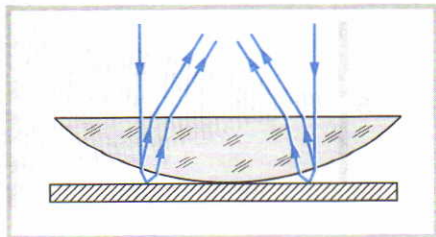


Рис. 23

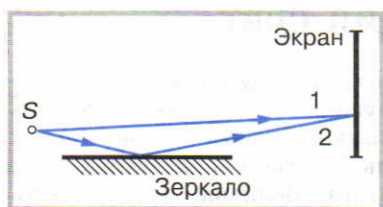
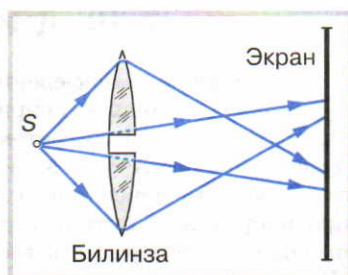


Рис. 24

Рис. 25



когерентными. Свет в этих источниках создается множеством отдельных атомов, переходящих из возбужденного состояния в основное. Во время таких переходов каждый атом излучает дуг (т. е. «порцию») электромагнитных волн длительностью не более  $\tau \sim 10^{-8}$  с и протяженностью  $l = c\tau$ . В результате различных процессов, например столкновений с другими атомами или ударов электронов, атомы снова переходят в возбужденное состояние (т. е. состояние с повышенной энергией), после чего начинают излучать новые дуги волн и т. д. При переходе от одной пары складывающихся дугов к другой, а от нее к следующей и т. д. разность фаз двух световых волн, излучаемых независимыми атомами, будет быстро и беспорядочно изменяться. При этом за 1 с на освещенном этими волнами экране успевает смениться сотня миллионов мгновенных интерференционных картин. Поскольку человеческий глаз не в состоянии проследить за столь быстрой сменой интерференционных минимумов и максимумов, то он зафиксирует лишь некую среднюю равномерную освещенность экрана.

Чтобы наблюдать на опыте интерференцию света, нужно световой пучок от какого-либо одного источника света разделить на два пучка, а затем, заставив их пройти различные пути, снова свести вместе. Если при этом будут складываться пучки, полученные из одного и того же цуга, то на экране можно наблюдать устойчивую интерференционную картину. Именно на этом основаны классические опыты по интерференции, выполненные с помощью зеркала Ллойда (рис. 24), билинзы Бийе (рис. 25) и т. п., включая опыты самого Юнга.



1. Опишите опыт Юнга.
2. Используя значения длин волн красных и фиолетовых лучей, определите соответствующую им частоту.
3. Чем объясняется радужная окраска тонких пленок?
4. Из-за чего возникают кольца Ньютона?
5. Что такое просветление оптики?
6. Почему световые волны от двух обычных источников света не дают устойчивой интерференционной картины?
7. Объясните возникновение интерференционной картины в опытах с билинзой Бийе и зеркалом Ллойда.



## § 10. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Объяснение интерференции света вызвало изумление у одних современников Юнга и неприятие у других. «Кто бы мог подумать, что свет, слагаясь со светом, может вызвать мрак!» — писал французский физик Араго. Между тем большинство английских ученых отрицательно отнеслись к работам Юнга. Волновая теория света, противоречащая оптическим воззрениям Ньютона, не принималась на родине этого ученого всерьез. Работы Юнга стали игнорировать. Не последнюю роль в этом сыграла и публикация ряда анонимных статей, автором которых оказался известный английский политик лорд Бругэм. По словам Бругэма, принцип интерференции — «одно из наиболее непонятных предположений, какое встречается во всей истории человеческих гипотез», а сам Юнг — человек, «лишенный каких-либо следов учености, проницательности и остроумия».

Юнг тяжело переживал появление этих статей, чей оскорбительный тон глубоко задел его. «С этой работой мои занятия наукой будут окончены», — пишет он в порыве отчаяния. А тут еще стали появляться сообщения о новых фактах, которые теория Юнга не всегда могла объяснить. Обращаясь к Малюсу, опубликовавшему свои исследования в области поляризации света, Юнг пробует сопротивляться: «Ваши опыты устанавливают недостаточность теории, которую я выдвигаю, но они не доказывают ее ложности». Но постепенно он начинает сдаваться. В 1815 г. Юнг признается: «Что касается моих основных гипотез о природе света, то я с каждым днем все менее и менее расположен занимать ими свои мысли по мере того, как все большее число фактов, вроде тех, которые открыл Малюс, доходит до моего сознания».

Но так случилось, что именно в этом, 1815 г., в критический для волновой теории момент, во Франции появляются первые оптические работы Огюстена Жана Френеля. В тот год вследствие политических событий, связанных со Ста днями (временным возвращением Наполеона к власти), Френель как сторонник Бурбонов лишился работы дорожного инженера и благодаря этому получил возможность заняться научными исследованиями. Из-за бурных событий, которые переживала в то время Франция, а также незнания английского языка Френель не был осведомлен о работах Юнга. В результате часть его открытий (в том числе интерференция) оказалась повторением того, что уже было открыто его английским коллегой. Когда же сведения о работах Юнга дошли до Франции, нашлись люди, которые поспешили обвинить Френе-



Огюстен Жан Френель



ля в плагиате. Отвечая на это, Френель писал: «Я довольно философски принял неприятности, пришедшие из Англии. Конечно, они оставили несколько горький осадок, но они не могут заставить меня потерять вкус к физике. Я почувствовал, что на упрек в плагиате нужно отвечать новыми открытиями».

Ознакомившись с исследованиями Юнга, Френель послал ему трогательное письмо. «Когда решишь, что сделал открытие, — писал он в письме, — то не без сожаления узнаешь, что кто-то другой сделал его до тебя; и я откровенно Вам признаюсь, месье, что я был сильно расстроен, когда Араго показал мне, что только несколько из тех наблюдений, что описаны в представленном мною Институту мемуаре, являются поистине новыми. Но если что-нибудь и может утешить меня, потерявшего приоритет, то это случай встретить ученого, обогатившего физику таким огромным количеством важных открытий. Вместе с тем происшедший случай значительно усилил мою уверенность в справедливости той теории, которую я принял».

Повторив часть открытий Юнга, Френель пошел дальше. И когда примерно через десять лет научная деятельность Френеля из-за болезни, а затем и смерти прекратилась, вся оптика оказалась преобразованной.

Важнейшей заслугой Френеля явилось объяснение и разработка математической теории дифракции света.

**Определение.** Дифракцией света называется огибание световыми волнами границы непрозрачных тел и проникновение света в область геометрической тени.

По поводу этого явления Ньютон в свое время писал: «Волны на поверхности стоячей воды, обходя с боков широкое препятствие, задерживающее часть волн, после этого загибаются и постоянно расширяются в покоящуюся воду за препятствием. Волны... из которых состоит звук, тоже загибаются, однако не так сильно, как водяные волны. Ибо колокол или пушку можно слышать за холмом, загораживающим вид звучащего тела... Относительно света неизвестно ни одного случая, чтобы он распространялся по извилистым проходам или загибался внутрь тени. Ибо при прохождении одной из планет между Землей и неподвижными звездами последние перестают быть видимыми». Именно потому, что «волны огибают углы, в то время как для света это не наблюдается», Ньютон и счел гипотезу о волновой природе света маловероятной.

Однако огибание светом встречных препятствий было все-таки обнаружено. Открытие этого явления (дифракции света) принадлежит итальянскому священнику, физика и астроному Ф. Гримальди. Его книга, в которой впервые описывалось новое явление, вышла в свет в 1665 г., спустя два года после смерти автора. «Свет, — писал в этой книге Гримальди, — распространяется или рассеивается не только прямолинейно, отражением и преломлением, но также и четвертым способом — дифракцией».

Проделав очень маленькое отверстие в ставне, Гримальди поместил на пути выходящего из этого отверстия конуса света непрозрачный предмет. Измерив ширину тени от предмета, он обнаружил, что она отличается от той, которая должна была бы быть при прямолинейном распространении света. Кроме того, края тени оказались окаймленными несколькими цветными полосками.

Когда Ньютон узнал об опытах Гримальди, то, повторив их, он высказал предположение, что загибание света происходит из-за взаимодействия световых лучей с краями тела, мимо которого проходит свет. Окончательных выводов он не сделал, сославшись на то, что в своих исследованиях этого явления он «был прерван и уже не мог думать о том, чтобы приняться за дальнейшее его рассмотрение».

Через сто с лишним лет Френель установил, что получаемая в результате дифракции картина аналогична интерференционной и также представляет собой чередование минимумов и максимумов интенсивности света. Причем наиболее отчетливо дифракция света проявляется тогда, когда выполняется следующее условие (**условие наблюдения дифракции**):

$$l \geq \frac{D^2}{\lambda}, \quad (10.1)$$

где  $D$  — размер препятствия или отверстия, на котором дифрагирует свет;  $\lambda$  — длина световой волны;  $l$  — расстояние от препятствия до места (экрана), где наблюдается дифракционная картина.

Развивая идеи Гюйгенса и дополняя их новыми соображениями<sup>1</sup>, Френель сформулировал принцип, согласно которому *дифракционная картина является результатом интерференции вторичных световых волн, возникающих в каждой точке поверхности, достигнутой к какому-либо моменту данной световой волной (принцип Гюйгенса — Френеля)*. Таким образом, если, например, свет проходит мимо края какого-либо препятствия, то в области пространства около этого края возникают вторичные волны, которые распространяются по разным направлениям и, интерферируя между собой, дают чередование максимумов и минимумов интенсивности света, в том числе и там, где должна была бы быть тень.

На основе принципа Гюйгенса — Френеля удалось объяснить не только дифракцию света, но и отсутствие так называемой *обратной волны*. До этого было непонятно, почему вторичные сферические волны, о которых говорил Гюйгенс, всегда образуют лишь бегущую вперед волну. Возникал вопрос: почему они не создают волну в

<sup>1</sup> Согласно **принципу Гюйгенса (1678)** каждая точка поверхности, достигнутой в данный момент волной, является центром одной из вторичных сферических волн, огибающая которых становится волновым фронтом в следующий момент времени (рис. 26). Френель объединил этот принцип с представлением о когерентности и интерференции вторичных волн.



противоположном направлении, т. е. распространяющу-ся назад? Теперь это было объяснено тем, что вторичные волны, идущие назад, тут же гасятся интерферирующими с ними встречными прямыми волнами.

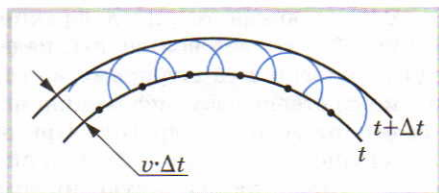


Рис. 26

Свои результаты Френель представил на конкурс во Французскую академию наук. В конкурсную комиссию входили пять человек: сторонники корпускулярной теории Био, Лаплас и Пуассон, приверженец волновой теории Араго и придерживающийся нейтральной точки зрения Гей-Люссак. Во время заседания комиссии Пуассон вывел из теории Френеля следствие, ускользнувшее от внимания самого автора, а именно: если на пути светового пучка поместить круглый непрозрачный диск, то на определенном расстоянии от диска в центре его тени должно появиться светлое пятно. Это показалось комиссии настолько абсурдным, что она уже готова была отклонить работу Френеля. Трудно сказать, что чувствовал в этот момент сам Френель, однако мы можем представить его радость, когда во время проведения контрольного эксперимента все действительно увидели в центре тени светлое пятно (рис. 27). Возражение Пуассона превратилось в свою прямую противоположность, и теория Френеля была признана правильной.

На явлении дифракции основано действие простого оптического прибора, называемого дифракционной решеткой.

**Дифракционная решетка** представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесенных на некоторую поверхность. Существуют отражательные и прозрачные дифракционные решетки. На первых штрихи нанесены на зеркальную (металлическую) поверхность, и наблюдение ведется в отраженном свете. На вторых штрихи нанесены на прозрачную (стеклянную) поверхность (или вырезаются в виде узких щелей в непрозрачном экране), и наблюдение ведется в проходящем свете.

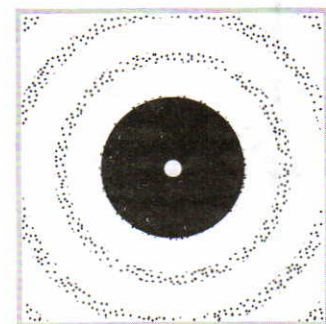


Рис. 27

Расстояние, через которое повторяются штрихи на решетке, называют *постоянной* или *периодом*  $d$  дифракционной решетки. Для работы в различных областях спектра применяют решетки, у которых число штрихов, приходящееся на 1 мм, составляет от 0,25 (в инфракрасном диапазоне) до 6000 (в рентгеновском диапазоне). Если это число  $N$  известно, то период решетки находят по формуле

$$d = \frac{1 \text{ мм}}{N} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{N}.$$



Элементарная теория дифракционной решетки состоит в следующем. Фронт световой волны, падающей на дифракционную решетку, разбивается ее штрихами на отдельные когерентные пучки. Эти пучки претерпевают дифракцию на штрихах и, огибая их края, интерферируют друг с другом. При этом для любой вторичной волны 1, испущенной какой-либо точкой в той или иной щели решетки, всегда можно найти такую (интерферирующую с ней) волну 2, которая будет испущена точкой, отстоящей от данной на расстоянии  $d$  (рис. 28). Найдем условие, при котором эти волны будут усиливать друг друга.

Так как разность хода этих волн  $\Delta r = d \sin \varphi$ , то, подставляя это выражение в формулу (8.6) и учитывая, что интерференционный максимум наблюдается в том случае, когда разность фаз складывающихся волн  $\Delta\phi = 2\pi n$ , получаем

$$2\pi n = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi,$$

откуда

$$d \sin \varphi = n\lambda. \quad (10.2)$$

Полученную формулу называют **формулой дифракционной решетки**. Разным значениям  $n$  в ней соответствуют разные углы  $\varphi$ , определяющие те направления, в которых дифрагировавшие пучки света усиливают друг друга, т. е. дают интерференционные максимумы.

Эти максимумы можно увидеть на экране. Для этого между решеткой и экраном следует поместить собирающую линзу, причем так, чтобы экран находился на фокусном расстоянии от нее (рис. 29).

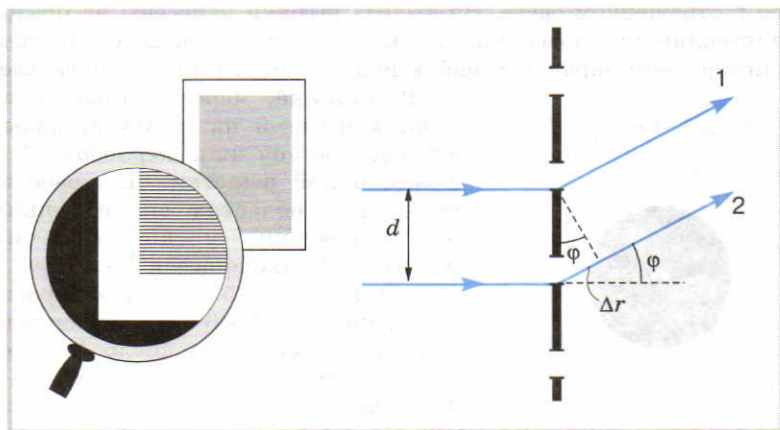


Рис. 28

Целое число  $n$  в формуле дифракционной решетки называют *порядком максимума*. Максимум 0-го порядка ( $n=0$ ) наблюдается под углом  $\varphi=0$ . Поэтому его называют *центральный*.

Максимумы остальных порядков, соответствующие положительным ( $n=1, 2, \dots$ ) и отрицательным ( $n=-1, -2, \dots$ ) значениям  $n$ , располагаются симметрично относительно центрального максимума.

Из формулы дифракционной решетки следует, что положение этих максимумов зависит от длины волны  $\lambda$ : чем больше  $\lambda$ , тем дальше от центра располагается соответствующий максимум. Это позволяет использовать дифракционные решетки для разложения электромагнитного излучения (в частности, света) в спектр и измерения длины световой волны. Последняя может быть определена по формуле

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{n}, \quad (10.3)$$

где  $\varphi$  — угол, под которым наблюдается максимум данного цвета.

Хорошие дифракционные решетки требуют очень высокой точности изготовления. Если хотя бы одна щель из 150 000 окажется смещенной от заданного положения более чем на  $10^{-5}$  мм, то решетка бракуется. Машина для изготовления решеток устанавливается на глубоко врытом в землю массивном фундаменте. Перед тем как вступает в действие алмазный резец, машина от 5 до 20 ч работает на холостом ходу (для стабилизации режима работы всех ее узлов). Само же нарезание всего лишь одной решетки длится до 7 суток, хотя время нанесения одного штриха составляет 3 с.

?

1. Что называют дифракцией света? 2. При каком условии наблюдается дифракция? 3. Свет длиной волны 500 нм направляется на препятствие. На каком расстоянии от него можно увидеть дифракционную картину, если это препятствие представляет собой: а) столб толщиной 1 м; б) проволоку диаметром 0,5 мм? 4. В чем заключается принцип Гюйгенса — Френеля? 5. Для чего используется дифракционная решетка? 6. Выведите формулу дифракционной решетки. 7. Чем отличается дифракционный спектр от дисперсионного (призматического) спектра?

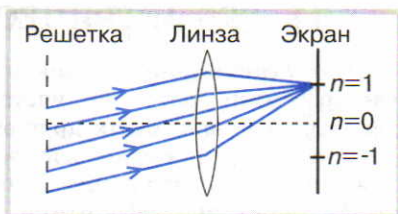


Рис. 29

## § 11. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ЛИНЗЫ

Геометрической оптикой называют раздел оптики, в котором свет рассматривается без учета его природы как совокупность отдельных и независимых друг от друга световых лучей.

С точки зрения волновой теории луч представляет собой нормаль к волновому фронту, проведенную в сторону распространения света. В геометрической оптике под **световым лучом** (в физическом смысле этого слова) понимают достаточно узкий световой пучок, который может быть выделен из светового потока с помощью узкой диафрагмы. Следует иметь в виду, однако, что из-за дифракции на краях отверстия неизбежно угловое отклонение распространения света от своего первоначального направления и, как следствие, уширение светового пучка. Это уширение будет тем больше, чем меньше будет диаметр отверстия, из которого выходит свет. Заметным оно становится тогда, когда начинает выполняться условие наблюдения дифракции, выражаемое неравенством (10.1).

Для того чтобы дифракционным уширением пучка можно было пренебречь, световой пучок следует рассматривать в условиях, когда неравенство (10.1) нарушается. Это происходит тогда, когда

$$l \ll \frac{D^2}{\lambda}. \quad (11.1)$$

Только на таких расстояниях пучок света можно рассматривать как физический световой луч, поведение которого описывается законами геометрической оптики.

Из условия (11.1) видно, что геометрическая оптика является приближенным предельным случаем волновой теории, справедливым, когда длина световой волны стремится к нулю. При  $\lambda \rightarrow 0$  правая часть в соотношении (11.1) становится бесконечно большой, и потому это условие будет справедливым при любых конечных значениях  $l$ .

Законы геометрической оптики<sup>1</sup> имеют важное значение для расчета и конструирования многочисленных оптических приборов, начиная от простейших очков и кончая гигантскими телескопами.

Основным элементом этих приборов во многих случаях является *линза*, т. е. прозрачное (обычно стеклянное) тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.

Различают *выпуклые* линзы (у которых середина толще, чем края) и *вогнутые* линзы (у которых середина тоньше, чем края). Если показатель преломления материала линзы больше, чем окружающей среды, то выпуклые линзы преобразуют параллельный пучок световых лучей в сходящийся, поэтому иначе их называют *со-*

---

<sup>1</sup> К законам геометрической оптики относят закон прямолинейного распространения света (в однородной среде), закон отражения света и закон преломления света. Эти законы можно вывести из принципа Ферма, не опираясь на какие бы то ни было представления о природе света.



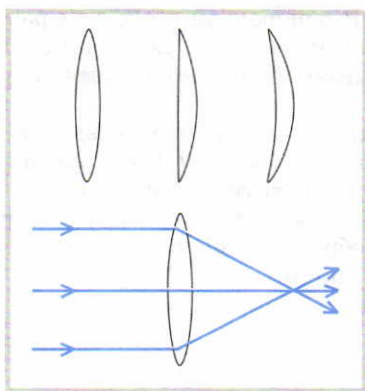


Рис. 30

бирающими (рис. 30). Вогнутые линзы при тех же условиях преобразуют параллельный пучок лучей в расходящийся, поэтому их называют *рассеивающими* (рис. 31).

Линза, у которой толщина пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей и с расстоянием от предмета до линзы, называется *тонкой*. Условные обозначения тонких линз показаны на рисунке 32.

Прямую, проходящую через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют *главной оптической осью* линзы. Все остальные прямые, проходящие через центр линзы, называют *побочными осями*.

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением лишь таких световых лучей, высоты которых, отсчитываемые от главной оптической оси линзы, намного меньше радиусов кривизны ее поверхностей. Такие лучи света называют *параксиальными (приосевыми)*. Удобство их использования, как мы увидим ниже, заключается в том, что углы, которые они образуют с главной оптической осью, ввиду их малости могут быть заменены на синусы, а синусы — на тангенсы.

По отношению к параксиальным лучам тонкие линзы обладают следующими свойствами:

**Свойство 1.** Лучи, падающие на линзу параллельно ее главной оптической оси, после преломления в линзе либо сами (если линза собирающая), либо своими продолжениями в обратную сторону (если линза рассеивающая) проходят через точку, лежащую на этой оси и называемую **главным фокусом** линзы.

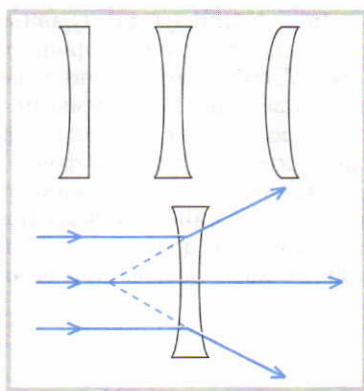


Рис. 31



Рис. 32

У каждой линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны от линзы на одинаковом расстоянии от нее. У собирающих линз фокусы называют действительными, а у рассеивающих — мнимыми.

Расстояние от главного фокуса до центра линзы обозначают той же буквой, что и сам фокус ( $F$ ), и называют *фокусным расстоянием* линзы. Это расстояние определяется показателем преломления материала линзы (относительно окружающей среды) и радиусами кривизны ее поверхностей. Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, называется ее **оптической силой**:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Единицей оптической силы в СИ является *диоптрия* (1 дп), т. е. оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м. У собирающих линз фокусное расстояние и оптическая сила считаются положительными ( $F > 0$ ,  $D > 0$ ), у рассеивающих линз — отрицательными ( $F < 0$ ,  $D < 0$ ).

Через фокусное расстояние может быть выражено угловое отклонение луча от своего первоначального направления. Из рисунка 33 видно, что угол отклонения луча, падающего на линзу параллельно главной оптической оси, определяется выражением

$$\delta \approx \operatorname{tg} \delta = \frac{h}{F}. \quad (11.2)$$

Так как линзу можно представлять в виде эквивалентной тонкой призмы, для которой справедливо соотношение (3.6), то полученное выражение для  $\delta$  будет справедливым и для любых других параксиальных лучей независимо от угла падения их на линзу.

**Свойство 2.** Лучи, падающие на линзу параллельно какой-либо побочной оптической оси, после преломления в линзе либо сами (если линза собирающая), либо своими продолжениями в обратную сторону (если линза рассеивающая) проходят через точку этой оси, находящуюся на фокусном расстоянии от линзы и называемую ее **побочным фокусом** ( $F'$ ).

Это означает, что тонкая линза обладает способностью фокусировать в точку любой параллельный пучок (параксиальных!) лучей незави-

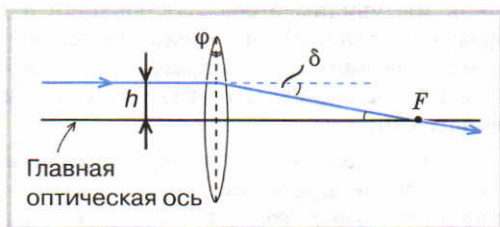


Рис. 33

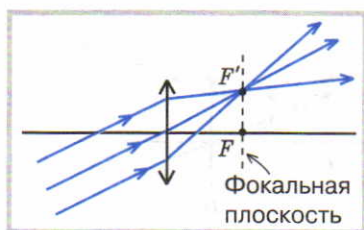


Рис. 34

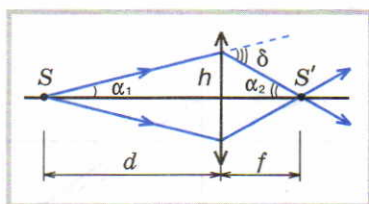


Рис. 35

симо от угла его падения на линзу (рис. 34). Все эти точки (фокусы) лежат в плоскости, расположенной на расстоянии  $F$  от линзы перпендикулярно ее главной оптической оси. Поскольку эта плоскость образована фокусами линзы, ее называют *фокальной*.

Рассмотрим теперь случай, когда падающие на линзу лучи образуют не параллельный, а расходящийся пучок лучей. Пусть источник этих лучей  $S$  находится на главной оптической оси линзы на расстоянии  $d$  от нее (рис. 35). Из рисунка видно, что

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \delta.$$

Но  $\alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 = h/d$ ,  $\alpha_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 = h/f$ , а по формуле (11.2)  $\delta = h/F$ .

Поэтому

$$\frac{h}{d} + \frac{h}{f} = \frac{h}{F},$$

откуда

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (11.3)$$

Полученная формула называется **формулой тонкой линзы**. Из нее следует, что расстояние  $f$ , на котором любой луч, вышедший из  $S$ , после преломления в линзе пересекает главную оптическую ось, не зависит от угла падения луча на линзу и при заданных  $d$  и  $F$  является величиной постоянной. Это утверждение имеет общий характер и остается справедливым и в том случае, когда точки  $S$  и  $S'$  находятся не на главной, а на побочной оптической оси. В любом случае оказывается справедливым

**Свойство 3.** Все лучи, вышедшие из какой-либо точки пространства, после преломления в линзе либо сами, либо своими продолжениями в обратную сторону снова пересекаются в одной точке.

Картина, получаемая в результате действия оптической системы на лучи, распространяющиеся от некоторого объекта, и воспроизводящая контуры и детали этого объекта, называется его **оптическим изображением**. Поскольку любой (видимый) объект представляет собой совокупность светящихся своим или отраженным светом точек, то его полное изображение складывается из изображений всех этих точек. Изображение же каждой точки возникает благодаря свойству 3.



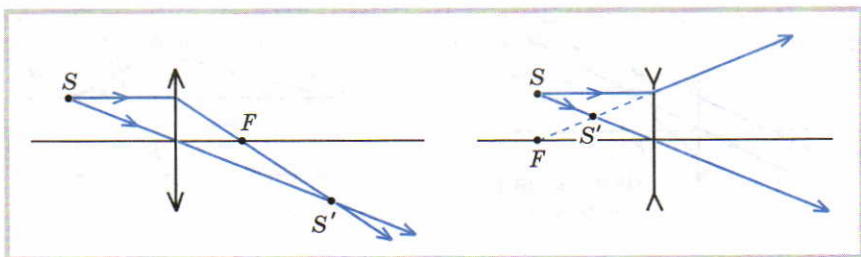


Рис. 36

Различают действительные и мнимые изображения. Если пучок световых лучей, исходящий из какой-либо точки  $S$  объекта, в результате преломлений (или отражений) сходится в некоторой точке  $S'$ , то  $S'$  называют *действительным изображением* точки  $S$ . Если же в точке  $S'$  пересекаются не сами лучи, а их продолжения, проведенные в сторону, противоположную направлению распространения света, то  $S'$  называют *мнимым изображением*.

Для построения изображения точки достаточно использовать два луча. Выбор наиболее удобных для этого лучей зависит от положений данной точки относительно главной оптической оси.

1) Если данная точка находится в стороне от главной оптической оси линзы, то для построения ее изображения удобнее всего использовать луч, который проходит через центр линзы, и луч, который падает на линзу параллельно ее главной оптической оси (рис. 36). Первый из этих лучей не меняет своего направления при прохождении через линзу<sup>1</sup>, а второй после преломления в линзе проходит через ее главный фокус.

2) Если данная точка расположена на главной оптической оси линзы, то для построения ее изображения используют луч, проходящий через центр линзы, и луч, падающий на нее параллельно какой-либо побочной оси и проходящий после преломления в линзе через побочный фокус, лежащий на этой оси (рис. 37).

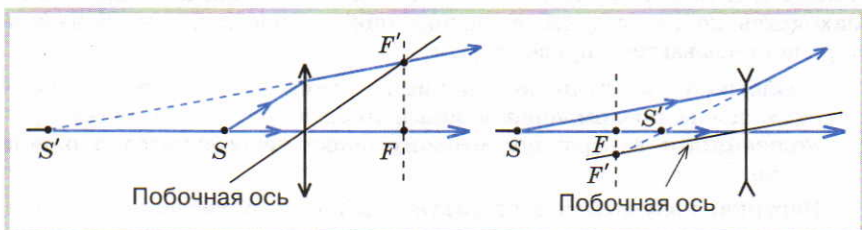


Рис. 37

<sup>1</sup> Этот луч испытывает лишь незначительное параллельное смещение (как в плоскопараллельной пластине), которым в случае тонкой линзы можно пренебречь.

Полное изображение линейного предмета в линзе находится путем построения изображений его крайних точек.

Пусть  $h$  — высота предмета, расположенного перпендикулярно главной оптической оси линзы, а  $h'$  — высота его изображения.

**Определение.** Величина, равная отношению высоты изображения к высоте предмета, называется **поперечным увеличением** линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h}.$$

Из рисунка 38 видно, что для поперечного увеличения линзы справедлива формула

$$\Gamma = \frac{f}{d}, \quad (11.4)$$

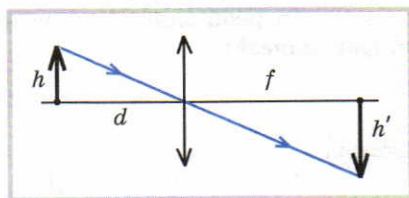


Рис. 38

где  $d$  — расстояние от предмета до линзы, а  $f$  — расстояние от изображения до линзы. Расстояния  $d$  и  $f$  связаны друг с другом формулой тонкой линзы (11.3).

При использовании формул (11.3) и (11.4) следует учитывать **правило знаков**: расстояния до действительных точек считаются положительными, а до мнимых точек — отрицательными. Например, рассеивающая линза всегда дает мнимое изображение, и потому с учетом правила знаков в формулу (11.3) значение расстояния от линзы до изображения  $f$  следует подставлять со знаком «-».

В общем случае изображение предмета, получаемое с помощью линзы, может быть:

- 1) действительным ( $f > 0$ ,  $\Gamma > 0$ ) или мнимым ( $f < 0$ ,  $\Gamma < 0$ );
- 2) увеличенным ( $|\Gamma| > 1$ ), уменьшенным ( $|\Gamma| < 1$ ) или равным самому предмету ( $\Gamma = 1$ );
- 3) прямым или обратным (т. е. перевернутым).

В каждом конкретном случае характер изображения зависит от типа линзы и расстояния  $d$ , на котором расположен предмет.

Различные виды оптических изображений получают в оптических приборах, предназначенных для расширения возможностей глаза человека в восприятии малых или удаленных предметов. Также оптические приборы используют и для того, чтобы сохранять оптические изображения, иметь возможность наблюдать их в любое удобное время, получать изображения заданных размеров, делать изображения хорошо видимыми в разных условиях разным количеством наблюдателей. Например, лупа — собирающая стеклянная линза. Помещая предмет между линзой и ее фокусом, получают мнимое увеличенное прямое изображение предмета. Поэтому она используется для наблюдения малых объектов. Основным элемен-



том фотоаппарата и проекционного аппарата также является собирающая линза. В фотоаппарате, помещая предмет за двойным фокусом, получают действительное уменьшенное изображение, которое сохраняется на пленке. В проекционном аппарате, помещая предмет между двойным фокусом и фокусом, получают действительное увеличенное изображение, которое наблюдается на экране.

Если имеется не одна, а две (сложенные вплотную) линзы, то угловое отклонение лучей, вызванное всей системой и равное  $h/F$ , может быть представлено в виде суммы углового отклонения  $h/F_1$ , вызванного первой линзой, и углового отклонения  $h/F_2$ , вызванного второй линзой:

$$\frac{h}{F} = \frac{h}{F_1} + \frac{h}{F_2}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2},$$

и, следовательно,

$$D = D_1 + D_2.$$

Это означает, что оптическая сила системы близкорасположенных линз равна сумме оптических сил всех линз этой системы.

При построении изображений в оптических системах следует придерживаться правила: изображение, даваемое первым элементом оптической системы, выступает в роли объекта для второго элемента системы и т. д.

Важными оптическими системами, предназначенными для наблюдения малых и удаленных объектов, являются микроскоп и телескоп. В микроскопе первая собирающая линза (объектив) дает действительное увеличенное изображение, с помощью второй собирающей линзы (окуляра) получают мнимое увеличенное изображение первого изображения. В телескоп-рефрактор (линзовый телескоп) наблюдают очень удаленные объекты, т. е. объекты, расположенные практически на бесконечности. Две собирающие линзы в телескопе располагают так, чтобы передний фокус одной из них совпадал с задним фокусом другой. Первая, длиннофокусная линза (объектив) дает изображение удаленного объекта почти в своей фокальной плоскости, а вторая, короткофокусная линза (окуляр) выступает в роли лупы — с ее помощью получают мнимое изображение наблюдаемого объекта. И микроскоп, и телескоп увеличивают угол зрения.

До сих пор лучи, падающие на линзу, считались приосевыми и, кроме того, монохроматическими. При нарушении этих условий изображение искажается, оказывается нерезким и окрашенным по краям. Подобные искажения называют **абберациями** оптических систем.

Для устранения (по крайней мере, частичного) цветной каймы (хроматической абберации) применяют комбинации из нескольких

линз, изготовленных из различных сортов стекла, а для увеличения резкости изображения применяют диафрагмирование.

Возможности оптических приборов ограничены, потому что свет — волновой процесс, и для него характерны явления интерференции и дифракции. Все предыдущие рассуждения об оптических приборах верны только в том случае, если длину волны света можно не учитывать. Изображения, даваемые, например, телескопом и микроскопом, — это интерференционные и дифракционные картины. Благодаря волновым свойствам света с помощью телескопа можно различать две звезды, проецирующиеся рядом одна с другой на небесной сфере, а с помощью микроскопа можно различить два близких малых объекта или две детали одного микроскопического объекта. Увеличение разрешающей способности телескопа достигается увеличением диаметра объектива и уменьшением длины волны регистрируемого излучения (переходом от регистрации инфракрасного излучения к регистрации ультрафиолетового излучения); микроскопа — увеличением показателя преломления среды, заполняющей пространство между исследуемым объектом и объективом микроскопа, а также увеличением угла, под которым виден объектив из центра объекта, наблюдаемого в микроскоп. Однако наблюдать в микроскоп объект или детали объекта, размеры которых меньше половины длины волны света, принципиально невозможно.

?

1. Что такое геометрическая оптика? 2. Перечислите основные законы геометрической оптики. 3. Что такое световой луч? 4. При каком условии можно пользоваться законами геометрической оптики? 5. Какие виды линз существуют? 6. Какой — собирающей или рассеивающей — является: а) выпуклая стеклянная линза в воздухе; б) вогнутая стеклянная ( $n_c = 1,5$ ) линза в воде ( $n_b = 1,3$ ); в) выпуклая стеклянная линза в сероуглероде ( $n = 1,6$ ); г) выпуклая полая (воздушная) линза с тонкими стенками, помещенная в воду? 7. Какие лучи называют параксиальными? 8. Перечислите свойства тонких линз. 9. Используя формулу тонкой линзы, докажите, что изображения, даваемые рассеивающей линзой, всегда являются мнимыми. 10. Используя формулу тонкой линзы и формулу увеличения, установите характер изображения, даваемого собирающей линзой, при: а)  $d > 2F$ ; б)  $d = 2F$ ; в)  $F < d < 2F$ ; г)  $d = F$ ; д)  $d < F$ . 11. Постройте графики зависимости  $\Gamma(d)$  и  $f(d)$  для собирающей линзы. 12. Чему равна оптическая сила системы близкорасположенных линз? 13. Каким образом ослабляются аберрации оптических систем? 14. Расскажите об известных вам оптических приборах по плану: 1) назначение; 2) устройство; 3) ход лучей; 4) применение.



## § 12. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

1. Почему небо голубое? Цвет дневного неба обусловлен рассеянием солнечного света в земной атмосфере. Еще в 1871 г. английский ученый Дж. Рэлей установил закон, согласно которому интенсивность рассеянного света пропорциональна четвертой степени частоты световой волны. Из лучей, входящих в состав белого света, наибольшую частоту имеют фиолетовые, синие и голубые лучи, а наименьшую — красные. Поэтому когда свет от Солнца достигает земной атмосферы и начинает рассеиваться микроскопическими сгущениями и разрежениями воздуха, постоянно возникающими в атмосфере, то наибольшую интенсивность в рассеянном свете будут иметь лучи из сине-фиолетовой части спектра. Результирующий цвет рассеянных лучей при этом оказывается голубым.

2. Почему закат красный? Красный цвет заходящего (и восходящего) Солнца обусловлен тем, что солнечный свет в такие моменты из-за низкого положения Солнца над горизонтом преодолевает значительно большую толщину воздуха, чем днем. В результате этого синеголубые лучи успевают рассеяться и в проходящем от Солнца световом пучке остаются лучи, преобладающими в которых оказываются красные. Именно они и придают закату красноватый оттенок.

3. Почему звезды мерцают? Мерцающий, как бы дрожащий свет звезд на ночном небе не является явлением, присущим самим звездам. Причиной мерцания является постоянное изменение оптических свойств земной атмосферы на пути световых лучей от этих звезд.

В отличие от звезд, каждая из которых (даже в мощный телескоп) выглядит на небе как точка, планеты представляются нам хотя и маленькими, но все-таки кружочками, дисками. Изображение каждой отдельной точки видимого диска планеты тоже мерцает. Но мерцания соседних точек при этом происходят беспорядочно и независимо друг от друга, так что ослабление яркости одной точки совпадает с усилением яркости какой-то другой. Поэтому яркость, которую мы воспринимаем, глядя на планеты, оказывается усредненной и практически не меняющейся. Вот почему планеты в отличие от звезд представляются нам немерцающими. Если, однако, вместо полного диска планеты будет виден ее узкий серп (как это бывает, например, у Венеры) и планета при этом расположена низко над горизонтом, то и ее мерцание станет довольно заметным.

4. Почему возникают миражи? Появление миражей обусловлено особым характером распространения света в неоднородных средах. В среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления световые лучи изгибаются, причем так, что своей выпуклостью они всегда оказываются обращенными в сторону уменьшения показателя преломления среды. В этом легко убедиться, рассмотрев ход луча в воображаемой среде, состоящей из плоскопараллельных



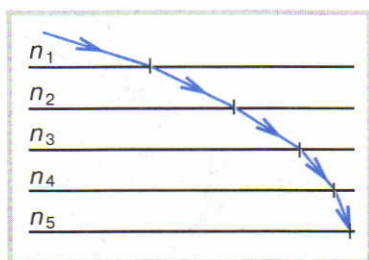


Рис. 39

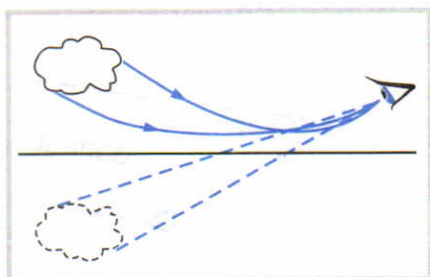


Рис. 40

слоев с постоянными  $n$ , меняющимися скачком от слоя к слою (рис. 39). Световой луч в этом случае преломляется на границах слоев и в результате превращается в ломаную линию. Если теперь толщину слоев и скачки показателя преломления устремить к нулю, то в пределе мы получим среду с непрерывным изменением  $n$ , в которой световые лучи будут иметь вид плавных кривых.

Различают нижние и верхние миражи. *Нижние* миражи возникают над сильно нагретой поверхностью (в пустынях и знойных степях), когда нижний слой воздуха имеет значительную температуру, вследствие чего его плотность и показатель преломления оказываются меньше, чем в более высоких слоях. Наблюдатель при этом видит два изображения одного и того же объекта (например, облака): прямое и обратное. Последнее и есть мираж. При этом создается иллюзия водной поверхности, в которой, как в зеркале, видно изображение неба (рис. 40).

*Верхние* миражи возникают, наоборот, над сильно охлажденной поверхностью (например, холодной водой) и потому наблюдаются в северных широтах. Показатель преломления воздуха при этом убывает с высотой, и из-за соответствующего искривления световых лучей, помимо самих предметов, становятся видны их изображения, расположенные сверху. Эти изображения могут оказаться как прямыми (рис. 41), так и обратными (рис. 42). Первые возникают при относительно медленном уменьшении показателя преломления с высотой, вторые — при быстром.

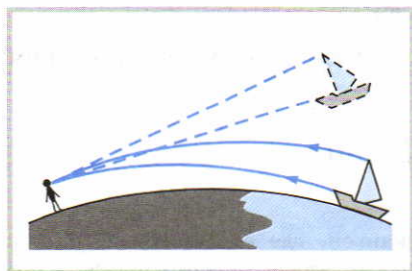


Рис. 41

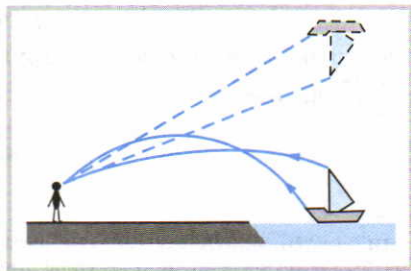


Рис. 42

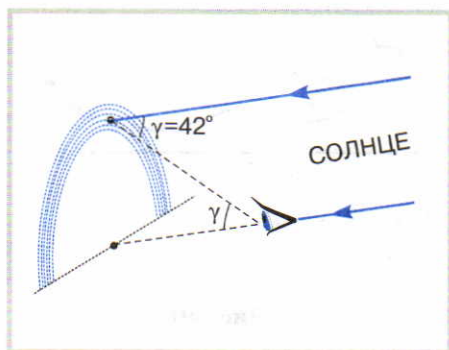


Рис. 43

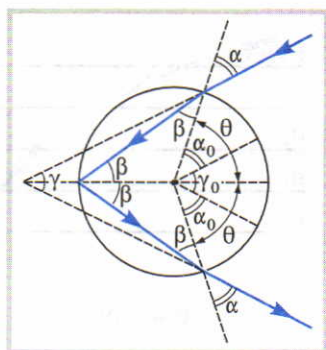


Рис. 44

**5. Почему появляется радуга?** Радуга обычно наблюдается тогда, когда появившееся из-за туч Солнце освещает своими лучами завесу дождя. По мере того как дождь стихает, а затем прекращается, радуга постепенно тускнеет и вскоре исчезает.

По своей форме радуга представляет собой часть кольца, центр которого располагается на одной прямой с Солнцем и глазом наблюдателя, который должен быть обращен спиной к Солнцу (рис. 43). Лучи, идущие от радуги к глазу наблюдателя, образуют угол  $42^\circ$  к этой прямой.

Когда Солнце расположено у горизонта, радуга имеет вид полукруга. Чем выше поднимается Солнце, тем ниже оказывается центр радуги и потому тем меньшую часть ее дуги можно видеть над горизонтом. Когда высота Солнца оказывается больше  $42^\circ$ , радуга исчезает<sup>1</sup>.

Радуга является результатом преломления, дисперсии и отражения солнечных лучей в дождевых каплях. Ее наблюдение под углом  $\gamma = 42^\circ$  может быть объяснено следующим образом.

На рисунке 44 изображена капля и ход одного из лучей, приводящих к образованию радуги. Из этого рисунка видно, что

$$\gamma = \gamma_0 = 2(\theta - \alpha_0) = 2(2\beta - \alpha),$$

т. е.

$$\gamma = 4\beta - 2\alpha,$$

где углы  $\alpha$  и  $\beta$  связаны друг с другом законом преломления:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ , откуда

$$\beta = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \alpha\right).$$

<sup>1</sup> Если, правда, смотреть вниз в каньон, где есть водопад, или на разбрызгивающиеся капли воды при поливе газона, можно увидеть радугу и тогда, когда Солнце стоит высоко в небе.



Угол отклонения луча  $\gamma$ , таким образом, является сложной функцией угла падения  $\alpha$ :

$$\gamma = 4 \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \alpha\right) - 2\alpha.$$

При некотором значении  $\alpha$  угол  $\gamma$  оказывается максимальным. Именно вблизи него и концентрируется большинство рассеянных каплей лучей, которые, попадая в глаз человека, позволяют наблюдать радугу.

Для того чтобы определить максимальное значение угла  $\gamma$ , найдем производную<sup>1</sup>:

$$\gamma'(\alpha) = \frac{4 \frac{1}{n} \cos \alpha}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}} - 2$$

и приравняем ее к нулю:

$$\frac{4 \cos \alpha}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}} - 2 = 0.$$

Полученное уравнение после несложных преобразований дает

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}.$$

Подставляя сюда значение показателя преломления воды (для средней части видимого спектра  $n = 1,33$ ), получаем величину  $\alpha = 59^\circ$ , которой соответствует угол  $\gamma_{\max} = 42^\circ$ .

Радуга может вызываться не только Солнцем, но и Луной. В этом случае ее называют *лунной радугой*. Лунные радуги, естественно, очень слабы. Поэтому их можно наблюдать только в ночь при полной Луне.

?

1. Какого цвета небо на Луне? Почему?
2. Кажутся ли звезды мерцающими для космонавтов, находящихся на орбитальной космической станции?
3. Можно ли увидеть мираж на Луне?
4. Какого цвета внутренняя часть радуги: красного или фиолетового? Почему?
5. Могут ли жители Москвы увидеть радугу в полдень?

<sup>1</sup> Согласно теореме Ферма если функция  $f(x)$  максимальна (или минимальна) в точке  $x_0$ , то  $f'(x_0) = 0$ . Производная функции арксинуса

находится по формуле  $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ .

## § 13. ИНФРАКРАСНОЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Способность вызывать у человека зрительные ощущения (ощущения «света») характерна лишь для электромагнитных волн с частотой от 400 до 800 ТГц ( $1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$ ). Этому соответствует диапазон длин волн от 760 нм (красные лучи) до 380 нм (фиолетовые лучи). Что находится за этими границами?

В 1800 г. английский астроном и оптик В. Гершель, разложив солнечный свет в спектр, поместил за его красный край термометр, у которого нижняя часть резервуара с ртутью была зачернена сажей. Обнаружив повышение температуры, он пришел к выводу, что термометр в этом месте нагревается какими-то невидимыми лучами, присутствующими в спектре излучения Солнца. Сначала эти лучи из-за их повышенной способности нагревать тела были названы тепловыми, а затем (учитывая их место в спектре) — **инфракрасными**.

Дальнейшие исследования показали, что 50% энергии излучения Солнца приходится именно на инфракрасные лучи. Искусственными источниками этого излучения являются лампы накаливания с вольфрамовой нитью (у которых на инфракрасный диапазон приходится от 70 до 80% энергии излучения), угольная электрическая дуга, различные газоразрядные лампы, ртутные лампы высокого давления и некоторые лазеры.

Вообще нагретые твердые тела способны излучать электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот. Однако при температуре ниже  $500^\circ\text{C}$  излучение любого тела почти целиком является инфракрасным. Например, тело человека при  $t = 36,7^\circ\text{C}$  испускает инфракрасные волны, максимум энергии которых приходится на длину волны 9,5 мкм.

Инфракрасные лучи занимают диапазон электромагнитных волн с длиной волны от 760 нм до 1 мм. Многие вещества, прозрачные для видимого света, оказываются непрозрачными для инфракрасных лучей, и наоборот. Например, пластинки германия и кремния, не пропускающие видимый свет, пропускают инфракрасное излучение с  $\lambda > 1-2 \text{ мкм}$ . И наоборот, слой воды толщиной в несколько сантиметров оказывается непрозрачным для инфракрасного излучения с  $\lambda > 1 \text{ мкм}$  (что позволяет использовать воду как теплозащитный фильтр).

Применяя специальную чувствительную пленку и устанавливая на объектив фотоаппарата светофильтр, пропускающий инфракрасное излучение и не пропускающий видимый свет, можно получить инфракрасные фотографии, т. е. фотоснимки в инфракрасных лучах. Другим способом получения таких снимков является использование специальных устройств, преобразующих инфракрасный свет в видимый с одновременным усилением последнего. Такие преобразователи позволяют получать снимки на обычной фотопленке в полной темноте.



Благодаря различию коэффициентов рассеяния, отражения и пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах на инфракрасных фотографиях можно увидеть детали, которые в обычном свете глазу не видны (рис. 45).

Инфракрасная фотография применяется в биологии при изучении болезней растений, в медицине при диагностике кожных и сосудистых заболеваний, в криминалистике при обнаружении подделок, в астрономии при фотографировании холодных звезд и туманностей и т. п.

Инфракрасное излучение используется также при нагреве и сушке овощей, фруктов и различных лакокрасочных покрытий (инфракрасный нагрев), в приборах ночного видения, в системах самонаведения на цель снарядов и ракет и т. п.

В 1801 г. немецкий ученый И. В. Риттер решил заглянуть за другой край видимого спектра. В то время было известно, что видимый свет обладает способностью вызывать почернение хлористого серебра. Риттер решил проверить, будет ли это серебро чернеть, если его поместить за фиолетовый край спектра. Проведя соответствующий опыт, он получил положительный результат, причем более сильный, чем на обычном свете. Невидимые лучи, вызвавшие это почернение, были названы **ультрафиолетовыми**. В том же году независимо от Риттера ультрафиолетовое излучение было обнаружено английским ученым У. Волластоном.

Естественными источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, звезды и другие космические объекты. Заметную долю ультрафиолетового излучения содержит излучение нагретых до 3000 °С твердых тел. Мощным источником этого излучения является также любая высокотемпературная плазма. Для различных применений ультрафиолетовых лучей используются специальные ртутные и другие газоразрядные лампы.

Диапазон длин волн ультрафиолетовых лучей простирается от 380 до 10 нм. Для большинства тел, прозрачных в видимой области спектра, характерно уменьшение прозрачности в ультрафиолетовом диапазоне. Обычное стекло перестает быть прозрачным при  $\lambda = 320$  нм. Ультрафиолетовые лучи с длиной волны  $\lambda < 290$  нм поглощаются озоном, а при  $\lambda < 185$  нм их не пропускает даже обычный воздух (из-за поглощения ультрафиолетового излучения кислородом).

В малых дозах ультрафиолетовое излучение оказывает благотворное влияние на человека, способствуя образованию витаминов группы *D*. Это позволяет использовать ультрафиолетовые лучи в медицине (при светолечении). Эти же лучи вызывают у человека загар. Однако большие дозы ультрафиолетового излучения могут вызвать повреждение глаз и ожог кожи.

Ультрафиолетовое излучение оказывает также бактерицидное действие: под действием этого излучения гибнут болезнетворные бактерии.

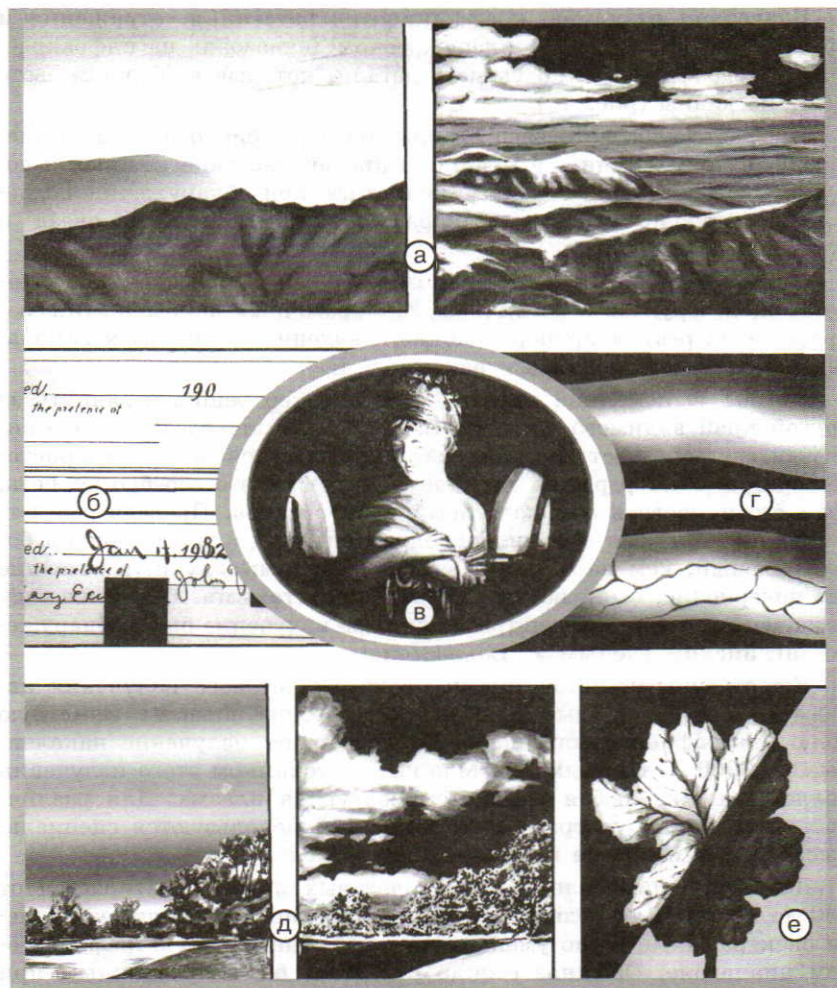


Рис. 45

Инфракрасная фотография: *a* — фотография пейзажа на обыкновенной и инфракрасной пластинках; *б* — фотография части сертификата с обесцвеченной химически подписью и датой; *в* — фотография, полученная в полной темноте при облучении скульптуры инфракрасным излучением от двух нагретых утюгов; *г* — фотография ноги в видимом и инфракрасном излучениях; *д* — фотография ландшафта на обычной и инфракрасной пластинках; *е* — фотография «большого» листа дерева при обычном (слева) и инфракрасном (справа) освещении.



Излучение применяется в люминесцентных лампах, в криминалистике (по снимкам обнаруживают подделки документов), в искусствоведении (с помощью ультрафиолетовых лучей можно обнаружить на картинах не видимые глазом следы реставраций) и т. п.

- ? 1. Когда, как и кем были открыты инфракрасные лучи? 2. Где применяются инфракрасные лучи? 3. Назовите источники инфракрасного излучения. 4. Когда, как и кем были открыты ультрафиолетовые лучи? 5. Где применяются ультрафиолетовые лучи? 6. Что является источником ультрафиолетового излучения?

## § 14. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Вечером 8 ноября 1895 г. немецкий ученый Вильгельм Конрад Рентген, производя в затемненном помещении опыты с электрическими разрядами в вакуумной трубке, обнаружил свечение расположенного рядом с трубкой экрана, покрытого платиносинеродистым барием. Так как сама трубка была покрыта черным чехлом, не пропускающим видимых и ультрафиолетовых лучей, то Рентген предположил, что свечение экрана вызывается какими-то новыми невидимыми лучами. Новое излучение он назвал X-лучами. Впоследствии их стали называть **рентгеновскими**.

Рентген не сразу сообщил о своем открытии. На протяжении семи недель он в одиночестве исследовал свойства новых лучей, рассказывая о них ни коллегам, ни даже жене. Чтобы не нуждаться в перерывах в работе с приборами, он велел поставить у себя в институте кровать и приносить туда же пищу.

В ходе своих опытов Рентген установил, что излучаемые трубкой X-лучи обладают очень сильной проникающей способностью. Лучи проходили через переплетенную книгу в 1000 страниц, через двойную колоду игральных карт, еловые доски до 3 см толщиной и даже алюминиевую пластину толщиной 1,5 см. Но самое большое потрясение ученый испытал тогда, когда поместил между трубкой и экраном свою руку и увидел на экране темные тени костей на фоне слабого очертания своей руки!

Сообщение Рентгена о новом виде лучей, сопровождаемое распространением сделанных им снимков (наборов разновесов, лежащих в закрытом ящике; магнитной стрелки, окруженной со всех сторон металлом, и особенно фотографий левой руки госпожи Рентген), оказалось столь сенсационным, что автор открытия за одну ночь превратился из рядового профессора в самого знаменитого ученого в мире<sup>1</sup>.

О новых лучах говорили повсюду. Способность лучей проникать через различные преграды пугала и настораживала простых обывателей. Открытие Рентгена стало обрести различного рода домыслы и фантазией. Дело дошло до того, что одна лондонская фирма

<sup>1</sup> В 1901 г. он стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике.

стала рекламировать нижнее белье, защищающее якобы от X-лучей, а в сенат одного из американских штатов был внесен законопроект, требующий запретить «употребление X-лучей в театральные бинокля».

В мае 1896 г. Эдисон организовал в Нью-Йорке рентгеновскую выставку, на которой посетители могли разглядывать скелет собственной руки на светящемся экране. Однако повальное увлечение рентгеновскими лучами не прошло даром. Помощник Эдисона, демонстрировавший на выставке свойства X-лучей, умер от тяжелых ожогов. Жертвами лучевого поражения стали сотни исследователей и техников, работавших с новыми лучами. Многие физики также получили медленно заживающие раны и ожоги разной степени.

В настоящее время рентгеновские лучи получают с помощью специальных устройств, называемых **рентгеновскими трубками**. Схема простейшей рентгеновской трубки изображена на рисунке 46. В стеклянном или металлическом баллоне (из которого откачан воздух) находятся катод  $K$ , анод  $A$  и массивная металлическая пластина  $AK$ , называемая антикатодом. Когда через катод пропускают электрический ток, катод нагревается и из него начинают вылетать электроны. С помощью металлического цилиндра  $\zeta$  фокусируется электронный пучок, разгоняемый электрическим полем высокого напряжения. Сталкиваясь с антикатодом, электроны испытывают резкое торможение, при котором начинают излучать электромагнитные волны. Это и есть рентгеновское излучение.

Сам Рентген не смог обнаружить у открытого им излучения волновых свойств, и потому истинная природа новых лучей оставалась для него неясной. Лишь в 1912 г. немецкому физика М. Лауэ пришла в голову мысль использовать для обнаружения дифракции рентгеновских лучей кристаллическую решетку твердых тел. Опыты, проведенные по совету Лауэ его коллегами В. Фридрихом и П. Книппингом, дали положительный результат. Более того, исследо-

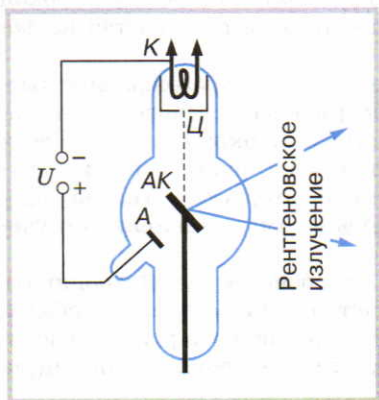


Рис. 46

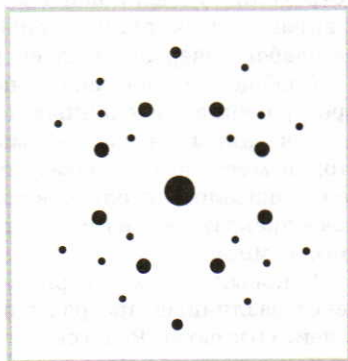


Рис. 47



вание полученной ими дифракционной картины (рис. 47) после создания математической теории этого явления позволило определить длину волны рентгеновских лучей, а также установить особенности расположения атомов внутри кристаллов.

Сегодня известно, что диапазон длин волн рентгеновского излучения составляет от  $10^{-7}$  до  $10^{-14}$  м. Благодаря своим особым свойствам это излучение широко применяется в медицине (рентгеновские снимки (рис. 48), флюорография, лечение раковых заболеваний и др.), в рентгеноструктурном анализе (исследование структуры кристаллических решеток), в дефектоскопии (обнаружение дефектов в отливках, рельсах и т. п.), в искусствоведении (обнаружение старинной живописи, скрытой под слоем поздней росписи), в астрономии (при изучении рентгеновских источников), в криминалистике и т. п.

Рентген открыл X-лучи, когда ему было 50 лет. По мнению Лауэ, впечатление от этого открытия было у его автора настолько сильным, что он уже никогда не мог от него освободиться. Поэтому в течение последующих 25 лет жизни список научных публикаций Рентгена почти не пополнился. Итогом этого периода были слова: «Моя жизнь кажется мне такой бесцельной!», которые он написал за несколько месяцев до своей смерти.



Рис. 48

- ?
1. В каком году родился В. К. Рентген?
  2. Какими свойствами обладает рентгеновское излучение?
  3. Опишите устройство и принцип действия рентгеновской трубки.
  4. Где применяется рентгеновское излучение?

## ИТОГИ И ОБОБЩЕНИЯ

Радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения представляют собой различные виды электромагнитного излучения — свободного электромагнитного поля. Все они имеют единую электромагнитную природу, распространяются в вакууме со скоростью 300 000 км/с, являются волнами поперечными, участвуют в таких явлениях, как отражение от вещественных преград, преломление и поглощение при распространении в веществе, интерференция, дифракция, различные поляризационные явления, обнаруживают дисперсию.

Количественно различные виды электромагнитных излучений отличаются по таким характеристикам, как частота и длина волны. Если мысленно расположить эти виды излучений по возрастанию частоты или убыванию длины волны, то получится широкий непре-

рывный спектр или шкала электромагнитных излучений. Между различными диапазонами этого спектра нет четких границ.

Диапазоны шкалы электромагнитных волн различаются не только количественно, но и качественно. Для них различны источники излучения: это генераторы электромагнитных колебаний и связанные с ними излучающие антенны, нагретые тела, различные источники видимого света, специальные ультрафиолетовые лампы, рентгеновские трубки. Есть множество космических объектов, испускающих разные виды электромагнитных излучений, — радиогалактики, пульсары, звезды, включая наше Солнце. По-разному взаимодействуют виды электромагнитных излучений с вещественными объектами — по-разному отражаются, проникают в вещество, преломляясь и поглощаясь, вызывают химические изменения в вещественных объектах и пр. Поэтому отличаются и способы регистрации (приемники) видов электромагнитных излучений. Это могут быть приемные антенны радиостанций и радиотелескопов, специальные пленки, чувствительные либо к инфракрасному, либо к видимому, либо к ультрафиолетовому, либо к рентгеновскому излучениям. Знания о видах электромагнитных излучений позволяют человеку учитывать различия их свойств и применять их.

## Глава 2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Дата рождения *квантовой теории* известна точно — это 14 декабря 1900 г. В этот день немецкий физик М. Планк выступил на заседании Немецкого физического общества с докладом, посвященным проблеме распределения энергии в спектре излучения *абсолютно черного тела* (т. е. тела, полностью поглощающего любое падающее на его поверхность электромагнитное излучение). Предложенное им решение проблемы стало первым шагом в создании современной *физики микромира*.

### § 15. ГИПОТЕЗА ПЛАНКА

Макс Карл Эрнст Людвиг Планк родился 24 апреля 1858 г. Когда мальчик подрос, его отдали учиться в гимназию. Здесь он проявил себя как усидчивый, прилежный и способный ученик, обладающий к тому же чрезвычайно развитым чувством долга. Обнаружившиеся у него способности и интерес к физико-математическим наукам привели к тому, что у юного Планка появилась «обязанность» — подменять на уроках заболевших учителей математики. С точными науками конкурировала любовь к музыке: он пел в хоре, дирижировал оркестром и научился играть на нескольких музыкальных инструментах. Однако при выборе будущей профессии интерес к точным наукам победил, и Планк решил посвятить себя теоретической физике.



Желая помочь сыну правильно сделать свой выбор, отец Планка посоветовал ему поговорить с одним знакомым профессором физики. Узнав, что Макс Планк решил заняться теоретической физикой, маститый ученый стал его отговаривать. «Он, — вспоминал впоследствии Планк, — изобразил мне физику как высококоразвитую, едва ли не полностью исчерпанную науку, которая теперь, после того как ее увенчало открытие принципа сохранения энергии, близка, по-видимому, к тому, чтобы принять окончательную стабильную форму. Вероятно, в том или ином углу есть еще пылинки или пузырьки, которые можно исследовать и классифицировать, но система как целое построена довольно прочно...» Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?



Макс Планк

Однако беседа с ученым не отпугнула Планка от физики, и он с успехом окончил университет по выбранной специальности. Заинтересовавшись работами Клаузиуса, он увлекся термодинамикой, и в 1879 г., в возрасте 21 года, Макс Планк защитил докторскую диссертацию. Во время присуждения ученой степени он, как и все в то время, принял «клятву-присягу», которую на латинском языке зачитал перед ним декан: «Торжественно вопрошаю тебя! Решился ли ты клятвенно обещать и самым священным образом подтвердить то, что ты желаешь радеть по мере сил своих о благородных искусствах, продвигать их вперед и украшать их; и не ради корысти или стяжания пустой и ничтожной славы ты будешь делиться своими знаниями, но для того, чтобы шире распространил свет божественной истины».

В 1887 г. Макс Планк получил приглашение на работу в Институт теоретической физики в Берлине.

В XIX в. многие ученые и инженеры работали над созданием и совершенствованием тепловых источников света — ламп сначала с угольными, затем с металлическими нитями накала. Свойства этих источников света позволяли надеяться на широкие возможности их массового применения. К середине XIX в. было получено много эмпирических закономерностей, характерных для излучения нагретых тел. Успехи в области создания тепловых источников света и в области экспериментальных исследований теплового излучения привели к необходимости теоретических исследований, которые могли бы объяснить полученные на опыте закономерности.

В 1894 г. Макс Планк был избран членом Прусской академии наук и там заинтересовался теорией *теплового излучения*. Тепловое излучение имеет сплошной (непрерывный) спектр с максимумом, положение которого зависит от температуры излучающего тела. С увеличением температуры общая энергия теплового излучения возрастает, а максимум в спектре перемещается в область более вы-

соких частот. Планк решил установить формулу, которая выражала бы зависимость энергии  $E_\nu$  электромагнитных волн, излучаемых с единицы площади поверхности абсолютно черного тела за 1 с, от частоты волн  $\nu$ . Абсолютно черное тело — тело, полностью поглощающее любое падающее на него излучение.

Абсолютно черное тело представляет собой идеализированный объект, мысленную модель и в природе не существует. Наиболее хорошим приближением к абсолютно черному телу является устройство, имеющее замкнутую полость с отверстием, размеры которого малы по сравнению с размерами самой полости. Узкий световой пучок, попавший в такую полость, испытывает внутри ее многократные отражения, частично поглощаясь при каждом из них. Через некоторое время свет полностью поглощается стенками полости. Это нетрудно понять, вспомнив, как в яркий солнечный день окно дома, если смотреть на него с улицы, кажется черным. Если стенки полости имеют высокую температуру, то они испускают свет. Отверстие в такой полости подобно абсолютно черному телу, поскольку оно поглощает весь падающий на него свет.

К излучению абсолютно черного тела близко излучение костра, лампы накаливания, Солнца.

Экспериментальные исследования показывали, что распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела имеет вид, изображенный на рисунке 49. Однако аналитический вид соответствующей этому графику функции  $E_\nu(\nu)$  никому не был известен. Более того, все попытки ученых получить эту функцию оканчивались неудачей. Летом 1900 г. английский физик Дж. Рэлей пришел к выводу, что  $E_\nu \sim \nu^2 T$ . Этот результат хорошо согласовывался с экспериментальными данными в области малых частот, но совершенно не соответствовал им при больших частотах. По образному выражению Лоренца, «уравнения классической физики оказались неспособными объяснить, почему угасшая печь не испускает желтых лучей наряду с излучением больших длин волн». Сложившуюся ситуацию известный физик-теоретик П. Эренфест назвал «ультрафиолетовой катастрофой».

Осенью 1900 г., сопоставив все полученные к этому времени результаты, Макс Планк сумел наконец «угадать» формулу, которая вроде бы полностью соответствовала экспериментальной кривой (см. рис. 49). О полученных результатах он сообщил на заседании Немецкого физического общества. На следующий день утром его отыскал коллега Рубенс и рассказал, как он после окончания заседания, глубокой ночью, сравнил его формулу и данные своих измерений и «нашел всюду радующее согласие».

Но располагать готовой формулой и уметь ее вывести — разные вещи. Почему ее никак не удастся вывести теоретически? Почему применение законов классической физики все время приводит к неверному результату? Эти вопросы продолжали мучить ученого. «Это было актом отчаяния. Потому что по природе, — вспоминал позже Планк, — я миролюбив и не расположен к рискованным приключе-



ниям. Теоретическое объяснение должно было быть найдено любой ценой, и никакая цена не была бы слишком высока». Неделю за неделей Планк продолжал напряженно думать над этой проблемой. Однажды, гуляя со своим семилетним сыном, он не выдержал и, волнуясь, сказал ему: «Или то, чем я занимаюсь теперь, есть совершенная бессмыслица, или речь идет, быть может, о самом большом открытии в физике со времен Ньютона». Возможно, вспоминая об этом эпизоде много лет спустя, сын Планка несколько преувеличил и его отец на самом деле не выражался столь многозначительно. Но так или иначе, как писал сам Планк, «после нескольких недель напряженнейшей работы» наступил день, когда «темнота рассеялась» и перед ним «забрезжил свет новых идей».

14 декабря 1900 г. на очередном заседании Немецкого физического общества Макс Планк выступил с докладом, в котором привел вывод своей формулы. Для того чтобы вывести эту формулу, ему потребовалось пожертвовать классическими представлениями о непрерывности и бесконечной делимости энергии излучающих частиц и допустить, что она является «величиной дискретной, состоящей из целого числа конечных равных частей». Каждую такую часть он обозначил буквой  $\epsilon$  и назвал «элементом энергии». При этом он показал, что «элемент энергии должен быть пропорционален частоте  $\nu$ », т. е.

$$\epsilon = h\nu, \quad (15.1)$$

где  $h$  — универсальная постоянная.

Впоследствии «элементы энергии» стали называть квантами энергии, а введенную Планком «универсальную постоянную»  $h$  — **постоянной Планка**. По современным данным

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Итак, энергия излучателей в процессе их взаимодействия с электромагнитными волнами может изменяться лишь «скачками», т. е. не непрерывно, а сразу на величину «элемента», или кванта, энергии  $h\nu$ . В этом и состояла **гипотеза Планка**. Несколько иначе ее можно сформулировать следующим образом:

Излучение и поглощение электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. отдельными квантами.

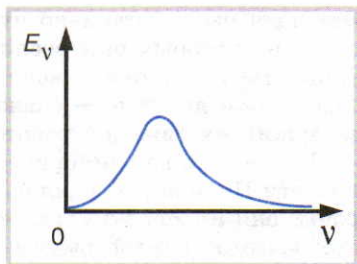


Рис. 49

Эта идея была настолько чужда представлениям классической физики, на которых был воспитан сам Планк, что приходится только удивляться, как она вообще могла прийти ему в голову. «Подобные счастливые догадки, — скажет потом Лоренц, — есть удел тех, кто заслужил их тяжелой работой и глубокими размышлениями».

После того как историческое заседание 14 декабря закончилось, коллеги Планка расходились с двойственным чувством. С одной стороны, они ничего не могли возразить против представленного Планком вывода своей формулы.

Но, с другой стороны, уж очень странная и неестественная гипотеза была положена им в основу этого вывода. Что-то здесь не так, думалось им, скорее всего, искусственная гипотеза Планка имеет «рабочий», частный характер и применима лишь как «особый прием» расчета только в данной задаче. Поэтому большинство физиков того времени в своих дальнейших исследованиях игнорировали идеи Планка, а если и вспоминали о его гипотезе, то только как о некоем «физическом извращении». К тому же таким частным вопросом, как тепловое излучение тел, в то время вообще мало кто интересовался. В результате квантовая идея оказалась «замороженной» и на протяжении нескольких лет никаких новых работ по этой проблеме не выходило.

Сам Планк, конечно, получил огромное моральное удовлетворение от того, что сумел решить проблему, которая была до этого камнем преткновения в теории теплового излучения. Особенную радость у него вызвало одобрение его гипотезы Людвигом Больцманом, которого он очень уважал и от которого получил письмо с положительной оценкой проделанной работы. Между тем ни Больцману, ни самому Планку и в голову тогда не приходило, к каким революционным преобразованиям в будущем приведет его «рабочая» (как в то время считали) гипотеза. Знай он, какого «джинна выпустит из бутылки», может, и вообще не стал бы братья за теорию теплового излучения. Ведь сказал же он о себе: «Я по природе миролюбив и не расположен к рискованным приключениям».

Так или иначе, но дело было сделано, и гипотеза квантов, как заметил потом французский физик Луи де Бройль, «исподтишка вошла в науку».

- ?
1. Какой день считается датой рождения квантовой теории? Почему?
  2. Что такое тепловое излучение?
  3. В чем заключалась ультрафиолетовая катастрофа?
  4. Сформулируйте гипотезу Планка.
  5. По какой формуле находится квант энергии?



## § 16. ФОТОНЫ

«Храм науки, — писал Эйнштейн, — строение многосложное. Различны пребывающие в нем люди и приведшие их туда духовные силы. Некоторые занимаются наукой с гордым чувством своего интеллектуального превосходства; для них наука является тем подходящим спортом, который должен им дать полноту жизни и удовлетворение честолюбия. Можно найти в храме и других: они приносят сюда в жертву продукты своего мозга только в утилитарных целях. Если бы посланный богом ангел пришел и изгнал из храма всех людей, принадлежащих к этим двум категориям, то храм бы катастрофически опустел, но в нем все-таки остались бы еще люди как прошлого, так и нашего времени. К ним принадлежит и наш Планк, и поэтому мы его любим».

Альберт Эйнштейн был первым физиком, всерьез заинтересовавшимся гипотезой Планка. В начале 1905 г. в письме к своему другу Эйнштейн признался, что готовит к печати работу, которая будет «архиреволюционной». Речь шла о статье, посвященной развитию квантовых представлений. 17 марта работа над ней была закончена, и в июне она вышла из печати.

Эйнштейн решил рассмотреть свойства теплового излучения по-новому, не основываясь на «каких-либо представлениях о возникновении и распространении излучения». Сначала он обратил внимание на уже известную к тому времени формулу

$$W_1/W = (V_1/V)^N, \quad (16.1)$$

связывающую термодинамические вероятности нахождения  $N$  молекул идеального газа во всем объеме  $V$  и в некоторой его части  $V_1$ . Затем он вывел аналогичную формулу по отношению к распределению энергии  $E$  теплового излучения, заполняющего некоторую полость объемом  $V$ . В современных обозначениях полученный им результат можно представить в виде

$$W_1/W = (V_1/V)^{E/h\nu}. \quad (16.2)$$

Сравнив обе формулы, он пришел к выводу, что монохроматическое излучение малой плотности ведет себя так, как будто оно состоит из  $N = E/h\nu$  «независимых друг от друга квантов энергии» величиной  $h\nu$  каждый. При этом, писал Эйнштейн, «напрашивается вопрос, не являются ли и законы возникновения и превращения света такими, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии».

Вначале Эйнштейн говорил лишь о «квантах энергии», но постепенно, в результате постоянных размышлений о свойствах света, он все более убеждался в том, что речь должна идти о «световых квантах» — реальных частицах, из которых состоит электромагнитное излучение. Впоследствии эти частицы — кванты электромагнитного излучения (*и, в частности, света*) — стали называть **фотонами**.

По современным представлениям фотоны обладают следующими свойствами:

1. Фотон является электрически нейтральной частицей, т. е. его заряд равен нулю:

$$q=0.$$

2. Во всех системах отсчета скорость фотона равна скорости света в вакууме:

$$v=c. \quad (16.3)$$

3. Энергия фотона пропорциональна частоте электромагнитного излучения, квантом которого он является:

$$\varepsilon=h\nu, \quad (16.4)$$

или

$$\varepsilon=\hbar\omega, \quad (16.5)$$

где  $\omega=2\pi\nu$  — циклическая частота колебаний, а  $\hbar$  — «новая» постоянная Планка (читается «аш с чертой»), связанная со «старой» соотношением

$$\hbar=\frac{h}{2\pi}=1,05\cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

4. Импульс фотона равен отношению его энергии к скорости и обратно пропорционален его длине волны:

$$p=\frac{\varepsilon}{c}=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}. \quad (16.6)$$

Первое из этих соотношений вытекает из релятивистской формулы  $p=(\varepsilon/c^2)v$  после подстановки в нее значения (16.3); последнее получается с помощью формулы  $c=\lambda\nu$ , где  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

5. Фотон является безмассовой частицей, т. е. его масса равна нулю:

$$m=0.$$

Для доказательства этого фундаментального свойства следует обратиться к формуле, связывающей массу, энергию и импульс в специальной теории относительности:

$$\varepsilon^2=(mc^2)^2+(pc)^2,$$

откуда следует, что

$$m=\frac{1}{c}\sqrt{(\varepsilon/c)^2-p^2}. \quad (16.7)$$

Подставляя сюда выражение (16.6), получаем  $m=0$ , что и требовалось доказать.

Заметим, что доказанное свойство касается лишь отдельного фотона и не означает, что свет в целом (как поток фотонов) также не обладает никакой массой. Масса светового излучения определяется по формуле, обобщающей соотношение (16.7):

$$M=\frac{1}{c}\sqrt{(E/c)^2-P^2}, \quad (16.8)$$

где  $E$  и  $P$  — энергия и импульс системы фотонов, образующих данное излучение. Например, для системы из двух фотонов, имеющих одинаковую частоту (и, следовательно, одинаковую энергию  $\varepsilon=h\nu$ )



и летящих под углом  $\theta$  друг к другу (рис. 50), формула (16.8) дает:

$$M = \frac{\varepsilon}{c^2} \sqrt{2(1 - \cos \theta)} = \frac{2\varepsilon}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}. \quad (16.9)$$

Отсюда видно, что масса рассматриваемой системы может быть равна нулю только в том случае, когда  $\cos \theta = 1$  и  $\theta = 0$ , т. е. когда фотоны движутся строго параллельно в одном и том же направлении. Но на практике такого никогда не происходит, и даже лазерный луч не остается все время одинаково узким, а постепенно расширяется. Поэтому во всех реальных случаях собственная масса электромагнитного излучения (в частности, света) оказывается отличной от нуля.

Этот результат может показаться странным, ведь у каждого фотона масса равна нулю, а  $0 + 0 = 0$ . Но дело в том, что масса, согласно законам теории относительности, не является аддитивной. Поэтому складывать массы отдельных фотонов не имеет никакого смысла; полная масса системы не равна сумме масс фотонов.

Перечисленные свойства фотонов были установлены не сразу. В начале XX в. сама идея о существовании световых квантов встречала резкое неприятие. Ведь интерференция, дифракция и поляризация света ясно показывали, что свет — это электромагнитные волны. А теория Эйнштейна этому противоречила.

Существование световых квантов (фотонов) не являлось обязательным следствием гипотезы Планка о дискретном характере процессов излучения и поглощения энергии атомами вещества. Эйнштейн это понимал. Кроме того, он понимал и то, что только его идея о световых квантах проще всего способна объяснить загадочные свойства теплового излучения и превратить казавшуюся до этого неестественной гипотезу Планка в закономерное следствие новой теории. «Теория Планка, — писал Эйнштейн в 1906 г., — в действительности неявно использует... гипотезу световых квантов».

Сам Планк находился в смятении. Идеи Эйнштейна поставили под сомнение волновую теорию, которую с таким трудом отстаивали Юнг, Френель и, наконец, Максвелл. «Введение гипотезы квантов, — предостерегал он, — равносильно крушению классической теории». «Ни один физический закон, — замечает Планк с горечью, — не обеспечен теперь от сомнений, всякая физическая истина считается доступной оспариванию. Дело имеет иногда такой вид, как будто в теоретической физике снова наступила пора первозданного хаоса».

В публичных выступлениях, лекциях и беседах с коллегами Планк настойчиво советует, убеждает, просит своих собратьев-ученых не отказываться от теории Максвелла. Ведь «она так много да-

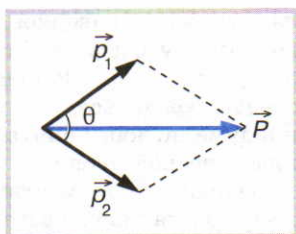


Рис. 50

ла физике и, наверное, еще немало полезного даст в будущем, надо поэтому быть ей благодарным и без крайней необходимости не отступать от нее. Раньше, чем рассматривать другую точку зрения, следует убедиться, что положение старой безвыходно. Лучше бы вы придумали, как понять факты, приведенные Эйнштейном, в рамках классической теории».

Однако со всем этим было очень трудно, и в 1911 г. во время обсуждения идеи световых квантов Эйнштейн публично заявляет: «Я подчеркиваю временный характер этого вспомогательного представления, которое, по-видимому, несовместимо с экспериментально проверенными следствиями волновой теории».

Однако и квантовая гипотеза появилась не на пустом месте; ее появление было обусловлено обнаруженными на опыте закономерностями теплового излучения. Эйнштейн мучительно размышлял над этим противоречием и никак не мог разрешить его. Как-то в письме своему другу он даже признался: «Я уже больше не задаю вопрос, существуют ли эти кванты на самом деле. Я больше не пытаюсь воссоздать их, так как знаю теперь, что мой мозг не в состоянии постичь проблему с этой стороны». Эти слова относятся к 1911 г. Но и много позже, когда квантовая теория получила полное признание и уже никто не сомневался в существовании фотонов, он не переставал размышлять над этой проблемой. В 1951 г., за 4 года до смерти, он снова признался: «После 50 лет раздумий я так и не смог приблизиться к ответу на вопрос, что же такое световой квант».

- ?
1. Что нового внес Эйнштейн в развитие квантовых представлений по сравнению с гипотезой Планка?
  2. Что такое фотоны?
  3. Перечислите свойства фотонов.
  4. Докажите, что масса фотона равна нулю.
  5. Выведите формулу (16.9).
  6. Почему идея Эйнштейна о световых квантах встречала резкое сопротивление со стороны других физиков?

## § 17. ФОТОЭФФЕКТ

Стремление доказать правоту квантовой идеи побудило Эйнштейна поискать в накопленном физиками-экспериментаторами материале такие факты, которые не находили объяснения в рамках классических представлений. Помимо проблем, связанных с тепловым излучением, столь же загадочными оказались и закономерности, проявляющиеся в явлении фотоэффекта.

**Определение.** Фотоэлектрический эффект (или просто фотоэффект) — это испускание электронов веществом под действием света.

Это явление было открыто в 1887 г. Генрихом Герцем, однако его первые экспериментальные исследования были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым, немецким физиком



В. Гальваксом и итальянским ученым А. Риги. Именно Риги и назвал это явление *фотоэффeктом*.

Опыты по исследованию фотоэффeкта А. Г. Столетов проводил с февраля 1888 г. по июнь 1889 г. В своей установке он использовал металлический диск, который освещался через другой диск в виде сетки светом от электрической дуги. Металлический диск и сетка включались в цепь с гальваническим элементом и гальванометром. На сетку подавалось положительное напряжение, а на диск — отрицательное. В этом случае в цепи возникал электрический ток (рис. 51).

Два диска (сплошной и в виде сетки) Столетов назвал сетчатым конденсатором. Сплошной диск, как видно из рисунка, освещался с той стороны, где накапливался электрический заряд, а сетка — с той стороны, где зарядов практически не было. Это позволяло точнее исследовать разряжающее действие световых лучей.

Ток в цепи сплошного диска и сетки даже при очень малых значениях напряжения между ними Столетов обнаружил с помощью чувствительного гальванометра. При этом неизменным условием было то, что к освещаемому диску был присоединен отрицательный полюс гальванического элемента, а к сетке — положительный. При малых напряжениях ток возникал при близком расположении электродов (диска и сетки), при более высоких напряжениях ток был замечен даже на расстоянии, равном 10 см и больше. Если освещаемый диск соединялся с положительным полюсом гальванического элемента, а сетка — с отрицательным, электрический ток в цепи отсутствовал. Столетов назвал это свойство наблюдаемого явления униполярностью «актиноэлектрического действия» (именно так называл Столетов явление, которое он исследовал). Он также обнаружил, что на возникновение тока существенным образом влияет состояние поверхности металлического диска. Если поверхность диска давно не зачищалась или была изготовлена из легкоокисляемых металлов, например цинка, то наблюдать данное явление было практически невозможно.

Источником тока должна быть именно дуговая лампа — электрическая дуга, с другими источниками света проведение опыта оказывалось неосуществимым.

В опытах Столетова было выявлено, что действие света — возникновение электрического тока — зависит от того, насколько



Александр Григорьевич Столетов

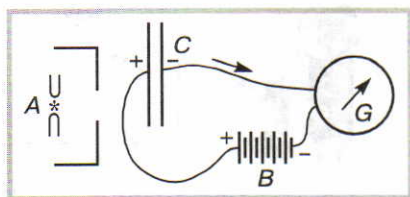


Рис. 51

ко интенсивно освещается электрод, т. е. что сила тока прямо пропорциональна энергии света, падающего на металлический диск.

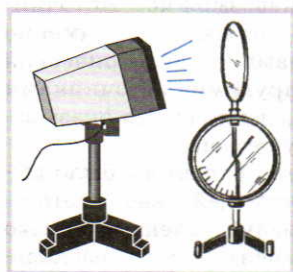
Удивительно, как со столь несложными с точки зрения современной науки установками ученому удалось обнаружить даже безынерционность фотоэффекта! Это было совсем нелегко. С помощью хитроумных приспособлений, позволявших очень быстро изменять освещенность диска и одновременно мгновенно замыкать и размыкать цепь гальванометра, Столетов сделал вывод о том, что электрический ток возникает практически мгновенно после освещения диска. При этом оказалось, что при всех доступных в опытах скоростях прерывания светового потока и электрической цепи пропорциональность силы тока и энергии света не нарушалась. Столетов пришел к заключению о том, что электрический ток «устанавливается мгновенно и в каждый момент соответствует силе освещения».

Для наблюдения фотоэффекта следует соединить с электрометром отрицательно заряженную цинковую пластину и направить на последнюю свет от электрической дуги (рис. 52). При этом будет видно, как пластина из-за потери электронов будет разряжаться.

Выбиваемые светом электроны называют *фотоэлектронами*. Угол, под которым они вылетают из облучаемой пластины, может быть самым разным и по отношению к направлению световых лучей может принимать значения от 0 до 180°.

Нужно сказать, что во времена первых исследований фотоэффекта его природа была неизвестна, так как сами электроны в то время еще не были открыты. Потерю заряда при этом пытались объяснить вырыванием светом мельчайших металлических частичек. Однако в 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл электрон, и через 2 года немецкий физик Филипп Ленард доказал, что выбиваемые светом частицы являются именно электронами.

Изучение фотоэффекта лучше всего проводить с помощью вакуумного *фотоэлемента* — прозрачной колбы с расположенными внутри ее двумя электродами: фотокатодом *K* и анодом *A* (рис. 53). Фотокатодом служит покрытая тонким слоем металла часть внутренней поверхности колбы, а анодом является расположенная в ее центре проволочная петля. При попадании света на фотокатод из него выбиваются электроны и в цепи возникает электрический



←  
Рис. 52

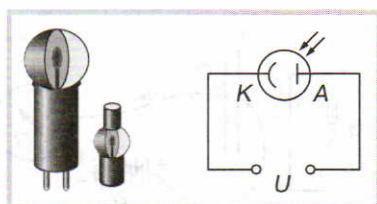


Рис. 53



ток. Меняя напряжение между электродами фотоэлемента, можно изменять и силу возникающего тока.

На рисунке 54 показаны зависимости силы тока от напряжения между анодом и катодом при различных интенсивностях света, падающего на катод.

Еще Столетовым экспериментально была установлена прямо пропорциональная зависимость силы тока насыщения от интенсивности света. Сила тока насыщения определяется числом электронов, вырываемых с поверхности металла под действием света. Учитывая это, можно сформулировать **первый закон фотоэффекта**:

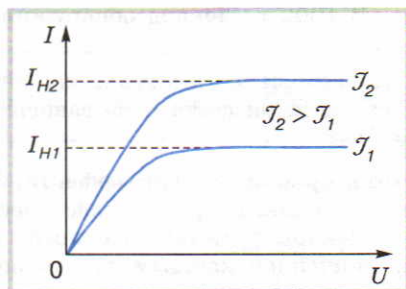


Рис. 54

Число фотоэлектронов, выбиваемых светом за 1 с, пропорционально интенсивности света.

Применяя теорему о кинетической энергии, можно получить уравнение, описывающее движение фотоэлектрона между катодом и анодом фотоэлемента:

$$\frac{mv'^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = -eU. \quad (17.1)$$

В правой части этого уравнения стоит работа электрического поля, совершаемая при перемещении электрона от катода до анода ( $A = qU = -eU$ ); в левой части — изменение кинетической энергии этого электрона ( $v$  — скорость электрона около катода;  $v'$  — скорость того же электрона возле анода). Вообще говоря, вылетающие из катода электроны имеют разную скорость  $v$ ; мы в дальнейшем под  $mv^2/2$  будем понимать *максимальную* кинетическую энергию, которой обладают лишь те электроны, которые были выбиты вблизи поверхности металла, на глубине, не превышающей  $10^{-9}$  м (меньшей кинетической энергией обладают те электроны, которые поглощают свет в более глубоких слоях; двигаясь к поверхности, они часть своей энергии рассеивают при взаимодействии с другими электронами).

Максимальную кинетическую энергию вылетевших электронов можно определить по тому значению напряжения, при котором прекращается ток через фотоэлемент:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3. \quad (17.2)$$

Величину  $U_3$  называют *задерживающим напряжением*. При таком напряжении все выбитые из катода электроны тормозятся у анода ( $v' = 0$ ), после чего возвращаются назад.

В 1902 г. Ленард обнаружил, что

максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

Это **второй закон фотоэффекта**. Этот закон казался очень странным, так как противоречил классической волновой теории.

Ленард понимал, что когда свет выбивает электроны, то часть поглощенной каждым электроном энергии световой волны  $\varepsilon$  должна идти на совершение электроном работы выхода из металла и часть еще должна остаться у электрона в виде кинетической энергии, с которой он вылетает. Последняя согласно уравнению (17.2) определяется задерживающим напряжением. В соответствии с этим Ленард получил уравнение

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + eU_3. \quad (17.3)$$

Это уравнение называется **уравнением Ленарда**. С учетом уравнения (17.2) его можно переписать так:

$$\frac{mv^2}{2} = \varepsilon - A_{\text{вых}}. \quad (17.4)$$

Получив свое уравнение, Ленард, однако, никак не мог понять, почему кинетическая энергия электронов не зависит от интенсивности света: ведь в это уравнение входит поглощенная электроном энергия световой волны  $\varepsilon$ , а последняя согласно классической электродинамике определяется интенсивностью волны. Непонятной была и установленная им на опыте зависимость кинетической энергии электронов от частоты света.

Теоретическое объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном. Он оказался первым, кому стало ясно, что это явление может быть понято лишь с позиций *квантовой теории*. Через 15 лет Планк по этому поводу скажет, что роль кванта энергии в теории фотоэффекта «можно было понять уже из того поразительного факта, что скорость испускаемых электронов зависит не от интенсивности освещения, но только от цвета падающего света». Однако Ленард, который исследовал фотоэффект уже после того, как была высказана квантовая гипотеза, правильного объяснения этому явлению все равно не нашел. Уже одно это говорит о том, насколько эта гипотеза в то время была непопулярна. Впрочем, здесь сказались также и то, что у Ленарда была, по-видимому, плохая интуиция, ибо не понял он не только квантовую теорию, но и несколько позже теорию относительности, против которой он впоследствии яростно боролся.

Согласно Эйнштейну, *каждый электрон при фотоэффекте выбивается одним фотоном*. Поглотив фотон, электрон приобретает его энергию  $\varepsilon$  и, совершая работу выхода, покидает металл. Поскольку энергия фотона  $\varepsilon = h\nu$ , то уравнение (17.3) принимает вид

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_3,$$



или с учетом уравнения (17.2) вид

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}. \quad (17.5)$$

Это уравнение называют **уравнением Эйнштейна** для фотоэффекта. Из него сразу видно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов действительно определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

Из опытов Ленарда следовало только, что кинетическая энергия фотоэлектронов с увеличением частоты света возрастает. По какому закону происходит это возрастание, никто до Эйнштейна не знал. Согласно теории Эйнштейна, зависимость кинетической энергии электронов от частоты должна быть линейной. Так ли это на самом деле? Ответ мог дать только эксперимент. В течение нескольких последующих лет разные экспериментаторы пытались установить истину. Однако окончательно поставить точку в этом вопросе удалось лишь в 1915 г. американскому физика Р. Милликену. «Я потратил десять лет моей жизни, — писал Милликен, — на проверку этого эйнштейновского уравнения 1905 года, и вопреки всем моим ожиданиям я вынужден был в 1915 году безоговорочно признать, что оно экспериментально подтверждено, несмотря на его несуразность, так как казалось, что оно противоречит всему, что мы знаем об интерференции света».

Уравнение Эйнштейна (17.5) позволяет установить **необходимое условие, при котором возможен фотоэффект**, а именно: фотоэффект будет наблюдаться в том случае, когда энергии поглощенного фотона  $h\nu$  хватит, по крайней мере, на совершение электроном работы выхода из металла:

$$h\nu \geq A_{\text{вых}}. \quad (17.6)$$

Отсюда следует, что электроны из металла может выбивать только такой свет, частота которого удовлетворяет неравенству

$$\nu \geq \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (17.7)$$

Минимальную частоту света  $\nu_0$  (или соответствующую ей максимальную длину волны света  $\lambda_0 = c/\nu_0$ ), при которой еще возможен фотоэффект, называют **красной границей** фотоэффекта. Из уравнения (17.7) видно, что красная граница фотоэффекта определяется работой выхода:

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (17.8)$$

Но работа выхода определяется видом вещества и состоянием его поверхности. Поэтому *для каждого вещества существует своя красная граница фотоэффекта*. Этот закон, экспериментально установленный в 1902 г. Ленардом и теоретически объясненный в 1905 г. Эйнштейном, называют **третьим законом фотоэффекта**.

Существование красной границы является типично квантовым эффектом. С позиций классической волновой теории невозможно объяснить, почему в опытах по фотоэффекту самые слабые ультрафиолетовые лучи выбивают электроны, в то время как ослепительно яркие красные лучи в большинстве случаев никакого действия не производят. В квантовой же теории это объясняется очень просто. Увеличивая интенсивность красных лучей, мы увеличиваем количество фотонов, образующих этот свет. Но для возникновения фотоэффекта важна энергия каждого отдельного фотона (так как каждый электрон выбивается одним фотоном), а она при этом будет оставаться неизменной и из-за малости частоты красного света недостаточной для выбивания электронов. По образному сравнению О. Д. Хвольсона, «красные лучи — это поток мелкой дроби; фиолетовые лучи — поток крупной дроби; крайние ультрафиолетовые лучи — поток ружейных пуль; лучи Рентгена — поток пушечных ядер; наконец, лучи гамма — снаряды осадных орудий («чемоданы»)».

С изобретением лазеров появилась возможность экспериментировать с очень интенсивными пучками света. Применяя сверхкороткие импульсы лазерного излучения длительностью  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  с (для устранения эффекта термоэлектронной эмиссии), удалось наблюдать многофотонные процессы, когда электрон, прежде чем покинуть катод, претерпевал столкновение не с одним, а с несколькими ( $N=2, 3, 4, 5$ ) фотонами. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта при этом записывается в виде

$$N h \nu = A_{\text{вых}} + \frac{m v^2}{2},$$

чему соответствует красная граница, в  $N$  раз меньшая по сравнению с однофотонным процессом.

В настоящее время фотоэффект широко используется в технике. С помощью фотоэлементов можно воспроизводить звук на киноплёнке. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество «видящих» автоматов, которые вовремя включают и выключают маяки, уличное освещение, автоматически открывают двери, сортируют и считают детали на конвейере, выдвигают перегородку в турникетах в метро, останавливают мощные прессы при попадании в опасную зону руки работающего с ними человека и т. п.

В 1921 г. «за вклад в теоретическую физику, особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта» Эйнштейн был награжден Нобелевской премией по физике. Незадолго до этого Ленард, как бы оправдывая свое упущение в объяснении фотоэффекта, сказал: «Сущность световых квантов вначале казалась очень темной». В 1905 г. это действительно было так, и потому в существование квантов никто тогда не верил. Никто, кроме Эйнштейна.





1. Что такое фотоэффект? 2. Какие закономерности фотоэффекта невозможно объяснить с позиций классической теории? 3. Согласно классической теории, электрону в поле световой электромагнитной волны требуется время для накопления необходимой для вылета энергии и потому фотоэффект должен протекать с заметным запаздыванием. Опыты же Столетова показали, что никакого запаздывания нет и фотоэффект практически безынерционен, т. е. ток в фотоэлементе появляется одновременно с началом освещения катода. Объясните, почему это так. 4. Напишите уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. 5. Какое напряжение называют задерживающим? Как оно связано с максимальной кинетической энергией фотоэлектронов? 6. Сформулируйте условие, необходимое для возникновения фотоэффекта. 7. Что такое красная граница фотоэффекта? От чего она зависит? 8. Как вы объясните первый закон фотоэффекта, считая свет электромагнитной волной? Как вы объясните первый закон фотоэффекта на «языке фотонов»? 9. Выведите формулу для красной границы фотоэффекта, соответствующую двухфотонному процессу.

### *Для дополнительного чтения*

## **§ 18. ДРУГИЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ**

Летом 1913 г. Эйнштейн был рекомендован к избранию в Прусскую академию наук. Подавляющим большинством голосов («за» — 21 голос, «против» — 1 голос) решение о его избрании было принято и через некоторое время утверждено императором Вильгельмом II. Любопытно, что в рекомендации, подписанной Максом Планком и несколькими другими немецкими учеными, после множества похвал в адрес Эйнштейна была добавлена просьба не ставить ему в упрек то, что он так далеко зашел в своей теории световых квантов, «стреляя мимо цели». В существование фотонов, как видим, в то время по-прежнему не верили; не верил даже автор квантовой гипотезы Макс Планк.

Ситуация осложнялась тем, что данное Эйнштейном объяснение законов фотоэффекта действительно нельзя было считать доказательством существования фотонов, ибо это объяснение можно было построить и используя одну лишь гипотезу Планка, т. е. считая, что свет — это не поток фотонов, а непрерывные электромагнитные волны и лишь процесс поглощения их энергии имеет скачкообразный, квантовый характер. Поэтому неудивительно, что в то время Эйнштейн никого, включая самого Планка, ни в чем не убедил. Убедить не убедил, а задуматься заставил. Уж больно наглядна была предложенная им картина. Мы как бы воочию видим, как летит фотон, как он достигает электрона и поглощается им и как последний, получив энергию кванта, покидает металл.

Так или иначе, но Эйнштейну удалось показать, что квантовая теория имеет право на существование. Применяя ее для объяснения все новых и новых явлений (люминесценция, 1905 г.; ионизация газа ультрафиолетовым светом, 1905 г.; зависимость теплоемкости кристаллов от температуры, 1906 г.; флуктуации энергии и импульса электромагнитного поля, 1909 г., и др.), он непрерывно увеличивал число ее сторонников.

В 1912 г. Эйнштейн применил квантовые представления для объяснения закономерностей химических действий света, т. е. действий света, в результате которых в веществах, поглощающих свет, происходят химические превращения — фотохимические реакции.

К химическим действиям света относятся реакции фотосинтеза в зеленых частях растений, появление загара у человека, выцветание тканей на солнце, разложение на составные части молекул бромистого серебра в светочувствительном слое фотопластинки и т. п. Большую роль фотохимические превращения играют в механизме зрения человека и животных.

В 30-х гг. XX в. советский ученый Сергей Иванович Вавилов провел опыты по исследованию чувствительности глаза человека к слабым световым потокам. Опыты показали, что необходимое для возникновения светового ощущения число световых квантов, попадающих на сетчатку глаза за одну секунду, незначительно.

При слабых световых потоках наблюдаются беспорядочные отклонения интенсивности света от некоторого среднего значения, которые называются флуктуациями.

В опытах Вавилова один экспериментатор, предварительно прищипнув к полной темноте, смотрел в определенном направлении, ориентируясь на очень слабый красный луч света. Другой экспериментатор периодически включал тоже слабый зеленый световой сигнал и фиксировал время включения зеленого света. Первый экспериментатор отмечал момент наблюдения зеленого света. Число отмеченных вспышек зеленого света оказалось меньше числа его включений. Это доказывало наличие флуктуаций световых потоков.

С. И. Вавилов установил, что пороговая чувствительность отдохнувшего глаза при кратковременных световых вспышках в среднем составляет 200 квантов в секунду в области максимальной чувствительности глаза ( $\lambda = 550$  нм). Таково минимальное число квантов света, которое должно попадать в зрачок, чтобы вызывать ощущение света. При этом сетчаткой глаза поглощается примерно в 10 раз меньше квантов света. Именно в этих условиях удастся наблюдать флуктуации (колебания) светового потока, подтверждающие квантовый (прерывистый) характер света.

Согласно Эйнштейну, в любой фотохимической реакции сначала происходит поглощение кванта света, а затем вызванное им превращение в одной какой-либо молекуле. При этом энергия поглощенного фотона  $h\nu$  должна превышать энергию, необходимую для разрыва существующих молекулярных связей (энергию активации). Поэтому для каждой фотохимической реакции существует красная



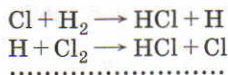
граница, т. е. такая минимальная частота, при которой свет еще химически активен. Именно этим объясняется такой хорошо известный всем факт, как нечувствительность обычной фотобумаги к красному свету.

Количественное исследование фотохимических процессов обычно осложняется тем, что первичный процесс, вызванный светом, сопровождается многочисленными побочными (вторичными) реакциями чисто химического характера. Поглощение кванта света при этом играет роль лишь первичного толчка к началу многочисленных химических реакций, развивающихся уже самостоятельно.

Например, в темноте смесь водорода  $H_2$  с хлором  $Cl_2$  может существовать сколь угодно долго. При малейшем же освещении в этой смеси происходит взрыв. Первичная (фотохимическая) реакция в данном случае сводится к расщеплению молекулы хлора и может быть записана в виде



Однако сам взрыв обусловлен бурным выделением энергии не в этой, а в последующих химических реакциях



причем число звеньев в подобных цепных реакциях может превышать миллион.

Последние сомнения в существовании световых квантов отпали в 1922—1923 гг., когда американский физик Артур Кóмптон открыл и теоретически объяснил явление, названное впоследствии **эффектом Комптона**. Комптон решил выяснить, «что должно произойти, если каждый квант энергии рентгеновских лучей сконцентрирован в одной частице и действует как целое на отдельный электрон». Оказалось, что *при рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах частота излучения уменьшается*; в этом и состоит *эффект Комптона*.

С точки зрения классической волновой теории частота излучения изменяться не должна: под действием периодического электрического поля световой волны электрон должен совершать вынужденные колебания с частотой, равной частоте изменения поля, и потому излучаемые им вторичные (рассеянные) волны должны иметь ту же частоту.

Чтобы объяснить эффект Комптона с позиций квантовой теории, следует рассмотреть столкновение электрона с отдельным фотоном. Если вначале электрон покоился, то после взаимодействия с фотоном он придет в движение. После того как часть энергии будет передана электрону, энергия рассеянного фотона  $\epsilon' = h\nu'$  окажется меньше энергии  $\epsilon = h\nu$  падающего фотона:

$$h\nu' < h\nu.$$

Но это возможно только при уменьшении частоты рассеянного излучения ( $\nu' < \nu$ ), что и наблюдается на опыте.

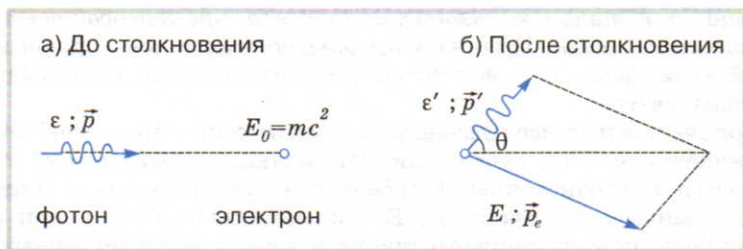


Рис. 55

На рисунке 55 дано условное изображение электрона и фотона до и после их столкновения. Применяя закон сохранения энергии

$$\epsilon + mc^2 = \epsilon' + \sqrt{(p_e c)^2 + (mc^2)^2}$$

и закон сохранения импульса

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e,$$

Артур Комптон и независимо от него Петер Дебай установили, что в процессе рассеяния фотона на электроне длина волны фотона изменяется на величину

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta), \quad (18.1)$$

где  $m$  — масса электрона, а  $\theta$  — угол рассеяния фотона (см. рис. 55).

Из формулы (18.1) видно, что изменение длины волны  $\Delta\lambda$  не зависит от длины волны падающего излучения и определяется лишь углом рассеяния  $\theta$ . Поэтому, как признался потом Комптон, получив данную формулу, он тут же решил проверить именно эту закономерность, а увидев, что опыт подтверждает ее, перестал сомневаться в правильности всей теории.

При  $\theta = 180^\circ$  (т. е. когда фотон «отскакивает» от электрона назад) изменение длины волны согласно формуле (18.1) оказывается максимальным и равным приблизительно  $2,4 \cdot 10^{-3}$  нм. Вот почему данный эффект был замечен в опытах не с видимым или ультрафиолетовым, а именно с рентгеновским излучением. Действительно, для видимого света, например, относительное изменение длины волны  $\Delta\lambda/\lambda$  составляет всего 0,001%, в то время как для рентгеновских лучей эта величина достигает 10%.

В отличие от фотоэффекта при объяснении эффекта Комптона следовало учитывать не только энергию фотона, но и импульс, что уже не давало возможности понять это явление, ограничиваясь одной лишь гипотезой Планка. Поэтому неудивительно, что известный немецкий физик А. Зоммерфельд в письме к Комптону назвал его работу «похоронным звоном по волновой теории излучения».

Тем не менее интерференция и дифракция света по-прежнему указывали на его волновую природу. Поэтому, подводя спустя год итоги, Альберт Эйнштейн был вынужден констатировать: «Итак, теперь мы имеем две теории света, обе необходимые и — как при-



ходится признать сегодня — существующие без всякой логической взаимосвязи, несмотря на 20 лет колоссальных усилий физиков-теоретиков».

?

1. В чем заключаются химические действия света? Приведите примеры. 2. Какая закономерность фотохимических реакций может быть объяснена лишь с позиций квантовой теории? 3. Согласно классическим представлениям при падении световой волны на окрашенную ткань все молекулы покрывающей ее краски (после получения достаточной энергии) должны разложиться на составные части одновременно. На самом деле выцветание ткани на солнце происходит не сразу, а постепенно, т. е. сначала распадается одна молекула, потом другая и т. д. Объясните это явление. 4. В чем заключается эффект Комптона? Объясните этот эффект с позиций квантовой теории. 5. Почему эффект Комптона наблюдается именно для рентгеновских лучей? 6. Учитывая, что энергия и импульс падающего фотона равны соответственно  $\varepsilon = hc/\lambda$ ,  $p = h/\lambda$ , а энергия и импульс рассеянного фотона равны  $\varepsilon' = hc/\lambda'$ ,  $p' = h/\lambda'$ , выведите формулу для изменения длины волны рассеянного фотона в случае, когда  $\theta = 180^\circ$ .

## § 19. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Итак, что же такое свет? Это поток частиц или все-таки волны? Можно ли с единой точки зрения объяснить все наблюдаемые свойства света? Или, как писал У. Брэгг, «мы должны считать свет состоящим из корпускул<sup>1</sup> в понедельник, вторник и среду, пока мы проводим опыты с фотоэффектом и эффектом Комптона, и представлять себе его волнами в четверг, пятницу и субботу, когда мы работаем с явлениями дифракции и интерференции»?

Современная физика отвечает на эти вопросы так: свет — это поток фотонов, а фотоны — это кванты электромагнитного излучения, обладающие одновременно и волновыми и корпускулярными свойствами. Представить эти кванты в виде какого-либо наглядного образа невозможно, так как наш опыт и наше воображение основаны на восприятии лишь макроскопических тел, а среди последних аналогичных объектов нет. Недаром физика макромира всегда четко разграничивала объекты, имеющие волновую природу (например, свет или звук), и объекты, имеющие дискретную (т. е. прерывистую) структуру (например, системы материальных точек). Непрерывность и дискретность при этом считались двумя противоположными свойствами, и всякое их сочетание в одном объекте казалось невозможным.

<sup>1</sup> Корпускула — старое название частицы, подчиняющейся законам классической механики Ньютона.

Но природа оказалась богаче воображения. Изучение света привело к представлению об ошибочности противопоставления корпускулярных и волновых свойств.

Кванты света — это не волны. Но это и не корпускулы в ньютоновском смысле. Это особые частицы, энергия и импульс которых в отличие от обычных материальных точек определяются через волновые характеристики — частоту и длину волны:

$$\varepsilon = h\nu, \quad p = h/\lambda. \quad (19.1)$$

Наличие у фотонов одновременно и корпускулярных и волновых характеристик и приводит к тому, что свету оказываются присущи как свойства непрерывных электромагнитных волн, так и свойства отдельных частиц.

**Определение.** Двойственность свойств материальных объектов, заключающаяся в том, что в поведении одного и того же объекта могут проявляться и корпускулярные и волновые характеристики, называется **корпускулярно-волновым дуализмом**<sup>1</sup>.

Представление о корпускулярно-волновом дуализме лежит в основе всей современной физики. Рассматривая свет как поток фотонов, квантовая физика смогла объединить обе, казавшиеся до этого непримиримыми теории света — корпускулярную и волновую.

Физики XIX в. и представить себе не могли, что такое объединение возможно. Вспомним хотя бы историю с законом преломления света. Волновая теория приводила к соотношению

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (19.2)$$

в то время как корпускулярная теория Ньютона давала совершенно обратное:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (19.3)$$

Формула (19.3) получалась в результате применения закона сохранения импульса к процессу взаимодействия частицы света с границей раздела двух сред (рис. 56):

$$p_{1x} = p_{2x},$$

или

$$p_1 \sin \alpha = p_2 \sin \beta. \quad (19.4)$$

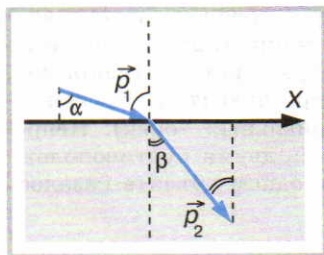


Рис. 56

Если считать, что импульс световой частицы пропорционален скорости света в соответствующей среде, то мы действительно получим соотношение (19.3), опровергнутое в свое время опытами французского ученого Фуко. Но согласно квантовой теории импульс фо-

<sup>1</sup> Дуализм — двойственность (от лат. dualis — двойственный).



тона не прямо, а обратно пропорционален его скорости! В вакууме, как мы видели,  $p = hv/c$ ; если же фотон распространяется в какой-либо среде, то его импульс можно считать равным  $hv/v$ , где  $v$  — скорость света в данной среде<sup>1</sup>. С учетом этого обстоятельства квантовая теория приводит к тому же самому закону преломления, что и волновая теория!

Есть еще одно явление, одинаково хорошо объясняемое с обеих точек зрения. Это давление света.

Дж. Максвелл теоретически доказал, что, с одной стороны, электромагнитные волны должны оказывать давление на поверхность, от которой они могут отражаться. С другой стороны, если рассматривать свет как поток фотонов, каждый из которых обладает импульсом, то также можно прийти к выводу о существовании давления света. При отражении фотонов от поверхности или при их поглощении взаимодействие с преградой приведет к изменению импульса фотона: преграда действует на фотоны, следовательно, фотоны действуют на преграду. Воздействие потока фотонов на поверхность и означает, что свет оказывает давление.

Световое давление было измерено русским физиком П. Н. Лебедевым (1866—1912). На Всемирном конгрессе физиков в Париже летом 1900 г. Лебедев сделал доклад о результатах своих опытов, полный текст которого был опубликован в журнале «Annalen der Physik» в виде статьи под названием «Опытное исследование светового давления». Эта работа ученого сразу получила очень высокую оценку научной общественности, поскольку опыты по определению светового давления были образцом экспериментального искусства.

Существование давления света было предсказано еще Кеплером на основе корпускулярной теории света, но давление света столь незначительно, что долгое время его не удавалось измерить. Поэтому необходимо было устранить все другие действия света, чтобы обнаружить его давление. Например, такие, как тепловое действие света, возникновение конвекционных потоков, так называемый радиометрический эффект, заключающийся во вращательном действии, которое возникает за счет неодинакового поглощения и отражения света от зачерненной и зеркальной поверхностей. Вот почему требовалось



**Петр Николаевич  
Лебедев**

<sup>1</sup> Приведенная формула импульса фотона в среде не означает, что фотон движется со скоростью, отличной от скорости света в вакууме. Уменьшение скорости света в среде объясняется переизлучением фотонов (их поглощением и последующим излучением частицами вещества).

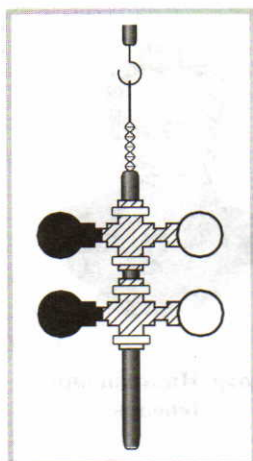


Рис. 57

изготовить очень легкие приборы, чтобы действие сил тяжести или каких-либо сил упругости не превысило действия силы светового давления. Следовало поместить объект, на котором планировалось обнаружить световое давление, в вакуум, предпринять специальные меры для устранения или хотя бы уменьшения других световых эффектов.

Для обнаружения и измерения давления света П. Н. Лебедев использовал три прибора, похожие один на другой: к легким стержням-подвесам прикреплялись крылышки, которые различались некоторыми техническими деталями и которые могли поворачиваться (рис. 57). По углу закручивания нити можно было судить о силе, действующей на крылышки. Таким образом, идея опытов Лебедева была аналогична той, которая лежала в основе опытов Кавендиша по

определению гравитационной постоянной и опытов Кулона по изучению взаимодействия заряженных тел.

Все приборы помещались в сосуд, из которого с помощью насоса откачивался воздух. Каждый прибор по очереди освещался дуговой лампой. Фонарь с дуговой лампой устанавливался на салазки, чтобы его можно было расположить на разных расстояниях от сосуда. Установочные винты и движущаяся лампа на салазках позволяли наводить пучок света на исследуемое крылышко. Опыты проводились с подвесами разной формы (с тремя приборами). Но, как уже отмечалось ранее, прежде всего необходимо было устранить конвекционные потоки и радиометрический эффект. При наклонном положении крылышек конвекционные потоки влияли на них. Эти потоки не зависели от направления падающего светового потока, поэтому Лебедев исключал их влияние, изменяя направление освещения подвесов с помощью системы зеркал. Для уменьшения радиометрического эффекта применялись тонкие крылышки и по возможности полностью откачивался воздух из сосуда. Радиометрический эффект приводит к тому, что давление газа вблизи зачерненного крылышка больше, чем вблизи зеркального, поскольку вблизи зачерненной поверхности температура выше. Из-за разности сил давления (при одинаковой площади поверхностей крылышек) происходит поворот всей системы.

Свет, оказывая давление, поворачивает крылышки в противоположную сторону, так как давление газа на зеркальную поверхность больше, чем на зачерненную.

Опыты Лебедева показали, что большее воздействие испытывает именно зеркальная поверхность. Это означало, что было обнаружено давление света, а радиометрический эффект практически был устранен. Результаты опытов Лебедева отличались от теоретических



значений давления электромагнитных волн, полученных Максвеллом, примерно на 20%.

Дифракция и интерференция света в квантовой теории объясняются наличием у каждого отдельного фотона волновых свойств. Прямым подтверждением этого явились опыты Джоффри Тэйлора в 1909 г., когда наблюдалась дифракция поочередно летящих мимо иглы фотонов. Источником света служило ослабленное с помощью светофильтров пламя газовой горелки. Интенсивность света при этом понижалась настолько, что фотоны следовали друг за другом с интервалом, в 1000 раз превышающим время пролета через всю установку. Чтобы сфотографировать возникающую при этом дифракционную картину, Тэйлору потребовалось довести время экспозиции до 2000 ч, т. е. почти до 3 месяцев!

В опытах Тэйлора фотоны не могли взаимодействовать друг с другом, так как летели поодиночке. И тем не менее дифракционная картина была получена. Если бы фотоны были обычными частицами, движущимися по траекториям, описываемым законами классической механики, то результат был бы иной: мы не обнаружили бы на экране за иглой чередования максимумов и минимумов освещенности. На самом же деле наблюдалась именно такая картина.

Наличие на полученной картине темных и светлых полос означает, что в одни места экрана попало больше фотонов, в другие — меньше, а в иные — вообще ни одного. Возникает вопрос: можно ли предсказать, в какое место попадет тот или иной фотон? Квантовая теория отвечает: нет, нельзя; мы можем рассчитать лишь вероятность соответствующего попадания. В те места экрана, для которых эта вероятность имеет наибольшее значение, и фотонов падает больше; здесь и будет наблюдаться максимум освещенности. Там же, где эта вероятность является наименьшей, и число фотонов, и освещенность экрана окажутся минимальными.

*Вероятностное описание поведения фотонов является отличительной характеристикой квантовой теории света.* Даже в простейшем случае падения света на поверхность стекла мы никогда не сможем предсказать, что будет происходить при этом с каждым отдельным фотоном — будет ли он от этой поверхности отражаться или будет проходить сквозь стекло. Единственное, что мы можем в этом случае утверждать, — это то, что вероятность отражения фотона от стекла (при нормальном падении света) составляет 4%, или из каждых 100 фотонов 4 в среднем будут отражаться.

Но фотон не единственный представитель микромира. Среди элементарных частиц есть электроны, протоны и другие микрочастицы. В 1923 г. французский физик Луи де Бройль высказал гипотезу, согласно которой

корпускулярно-волновой дуализм универсален для материальных объектов, характерен не только для фотонов, но и для любых других микрочастиц.

«В оптике, — писал де Бройль, — в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым; не делалась ли в теории материи обратная ошибка? Не думали ли мы слишком много о картине «частиц» и не пренебрегали ли чрезмерно картиной «волн»?.. После долгих размышлений и раздумий я внезапно понял в 1923 г., что открытие, сделанное Эйнштейном в 1905 г., следует обобщить и распространить на все материальные частицы, в частности электроны».

Согласно де Бройлю, формулы (19.1) следует считать *универсальными*, справедливыми как для фотонов, так и для любых других материальных частиц. В частности, как следует из выражений (19.1), если какая-либо частица обладает импульсом  $p$ , то ей соответствует длина волны

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (19.5)$$

Это так называемая **длина волны де Бройля**. Из-за того что в ее числителе стоит постоянная Планка, для всех реальных частиц она оказывается очень малой. Например, электроны, движущиеся со скоростью  $v = 7,3 \cdot 10^6$  м/с (такую скорость они получают, пройдя разность потенциалов 150 В), имеют длину волны  $\lambda = 0,1$  нм.

Свои идеи Луи де Бройль изложил в докторской диссертации, которую представил к защите в 1924 г. Входящий в состав жюри известный физик Поль Ланжевен по поводу его работы заметил: «Идеи диссертанта, конечно, вздорны, но развиты с таким изяществом и блеском, что я принял диссертацию к защите». На всякий случай Ланжевен решил показать ее Эйнштейну. Ознакомившись с диссертацией де Бройля, Эйнштейн счел ее «очень интересной» и даже назвал «первым робким лучом света, пролитым на самую темную из физических загадок». Позже, рекомендуя ее одному из коллег, Эйнштейн сказал: «Прочтите ее. Хотя и кажется, что ее написал сумасшедший, но написана она солидно».

Сам де Бройль потом признал, что «попытка приписать волновые свойства электрону, когда этому нет никаких экспериментальных доказательств, могла выглядеть как ненаучная фантазия. И тем не менее, как только возникла идея, что электрон, возможно, обладает такими свойствами, и не только электрон, но и вообще материальные частицы, так в голову начали приходить разные беспокойные соображения».

Одновременно с изложением теории Луи де Бройль предложил и направление, на котором следует «искать экспериментального подтверждения наших



Луи де Бройль



идей»: поток электронов, проходящий через отверстие, диаметр которого мал по сравнению с длиной волны электрона, «должен давать дифракционную картину». Спустя несколько лет такая картина действительно была получена!

В 1927 г. Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер, а затем Джордж Томсон наблюдали дифракцию электронов. Поскольку дебройлевская длина волны электрона совпадает с длиной волны рентгеновских лучей, то они применили методы, аналогичные тем, что применяются при изучении дифракции рентгеновского излучения. А именно: в качестве дифракционной решетки они использовали кристаллическую решетку вещества. На рисунке 58 приведена фотография дифракционной картины, полученной в результате пропускания узкого пучка электронов через тонкую пленку золота. То, что изображенные на ней кольца образованы именно электронами, а не возникающими при их столкновении с веществом рентгеновскими лучами, подтверждается тем, что при включении магнитного поля вся картина смещается и искажается. Если бы она была образована рентгеновскими лучами, то включение магнитного поля ее бы не изменило.

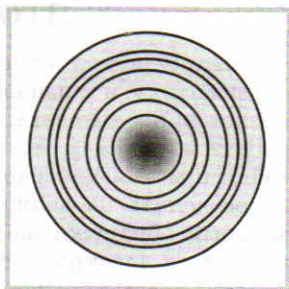


Рис. 58

- ?
1. В каких явлениях проявляются волновые свойства света?
  2. В каких явлениях проявляются корпускулярные свойства света?
  3. Что такое свет?
  4. Что называют корпускулярно-волновым дуализмом?
  5. Можно ли считать фотоны обычными частицами, движущимися по законам классической механики? Почему?
  6. По какой формуле находится импульс фотона в среде?
  7. Объясните существование давления света, считая свет электромагнитной волной. Предположите, что на поверхность проводника падает монохроматическая световая волна. Колебания вектора напряженности электрического поля происходят в плоскости отражающей свет поверхности, а колебания вектора индукции магнитного поля перпендикулярны этой поверхности. Вспомните о действии электрического и магнитного полей на электрический заряд.
  8. В чем состоит гипотеза де Бройля?
  9. Какие экспериментальные факты подтверждают эту гипотезу?
  10. Вычислите дебройлевскую длину волны макроскопического тела, например шара массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, и сделайте вывод, почему мы не наблюдаем волновых свойств окружающих нас тел.

## ИТОГИ И ОБОБЩЕНИЯ

Оптику как учение о свете принято разделять на геометрическую оптику и физическую оптику. Геометрическая оптика не выясняет природы света, а оперирует такими понятиями, как «точечный источник» и «световой луч» — прообразами математической точки и математической прямой. Физическая оптика, которую можно разделить на волновую и квантовую, рассматривает явления, в которых обнаруживаются волновые и квантовые свойства света, и учитывает электромагнитную природу света.

При распространении света выполняются закон прямолинейного распространения света и законы отражения и преломления света.

Прохождение света сквозь стеклянную призму показывает, что белый свет имеет сложный состав и может быть разложен в спектр. Существование дисперсии — зависимости показателя преломления среды от цвета светового пучка — важное свидетельство того, что законов геометрической оптики недостаточно для понимания световых явлений.

При определенных условиях можно получить наложение световых пучков, если разделить один световой пучок на два и более. Тогда наблюдаются интерференционные картины, неопровержимо доказывающие наличие у света волновых свойств. Если свет встречает на своем пути преграду, то при определенном соотношении между длиной волны света, размером преграды и расстоянием от преграды до места наблюдения хорошо видны дифракционные картины. Интерферировать и дифрагировать могут только волны. Поляризация света говорит о поперечности световых волн.

Эксперименты, проведенные в космических и земных условиях, показали, что скорость света равна скорости электромагнитных волн, теоретически предсказанной Максвеллом и экспериментально вычисленной Герцем. Тот факт, что световые волны являются электромагнитными волнами, подтверждается еще и тем, что электромагнитные волны и свет могут распространяться как в вакууме, так и в любой вещественной среде (в отличие от механических волн). Поперечность электромагнитных и световых волн, совпадение значений светового давления, полученных путем теоретических расчетов на основе электромагнитной теории и экспериментальных исследований, также доказывают электромагнитную природу света.

Явления теплового излучения, фотоэффекта, люминесценции и целый ряд других явлений говорят о наличии у света дискретных свойств, приводят к необходимости описывать световые явления на «языке фотонов», обладающих единством свойств волн и частиц, причем это единство, называемое корпускулярно-волновым дуализмом, характерно и для единичных фотонов, и для большой их совокупности в световом пучке.

Чтобы ответить на вопрос «Как возникает свет?», нам придется рассмотреть строение вещества, поскольку именно внутри частиц вещества — атомов и рождается фотон.



# ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

---

Суньте палец в пламя от спички, и вы испытаете ощущение, равного которому нет ни в небе, ни на земле; однако все, что произошло, есть просто следствие соударений молекул.

*Дж. Уилер*

С незапамятных времен люди задумывались над тем, из чего сделан мир. В V в. до н. э. древнегреческими учеными Левкиппом и Демокритом была выдвинута атомистическая гипотеза: все в мире состоит из атомов; между атомами находится пустота. Последователем Левкиппа и Демокрита был Эпикур. Их учение о существовании мельчайших неделимых частиц (слово «атом» в буквальном переводе означает «нерассекаемый», «неразрезаемый») противоречило другой идее — идее Анаксагора о бесконечной делимости материи. Аргументы в пользу учения Левкиппа — Демокрита — Эпикура можно найти в знаменитой поэме древнеримского поэта Лукреция Кара «О природе вещей», написанной в I в. до н. э.: «Так, например, одежда сыреет на морском берегу, а на солнце вися высыхает. Однако видеть нельзя, как влага на ней оседает и как она исчезает. Значит, дробится вода на такие мельчайшие части, что недоступны они совершенно для нашего глаза». Впрочем, рассуждает автор поэмы, не только вода, но и твердые предметы постепенно стираются, теряя не видимые глазом мельчайшие частицы. Так, например, мостовая дорог стирается «ногами толпы» и «правые руки у статуй бронзовых возле ворот городских постепенно хudeют от припадания к ним проходящего мимо народа». Рассматривая далее движение рыб в воде, Лукреций указывает, что между частицами воды должны быть пустоты, иначе никакое движение в ней невозможно. Даже воздух «не смог бы сжаться... без пустоты и свои все части сплотить воедино».

Лишь в XIII и XIV вв. появляются отдельные сторонники атомизма. Так, например, французский ученый Никола́ из Отрекура учил, что в явлениях природы нет ничего, кроме движения, соединения и разъединения атомов. Но и он в 1347 г. был вынужден отречься от своих взглядов, а его сочинение, осужденное церковью, было публично сожжено.

Потребовалось еще триста лет, прежде чем наконец появился учебник физики Иоганна Шперлинга, в котором решительно утверждалось: «Учение об атомах не столь ужасно, как это кажется многим. Позорной язвой нашего века является осмеяние, освясты-



Демокрит

вание, осуждение всего, о чем не сразу можно высказать свое мнение... Ничего не стоит сказать, что Эпикур бредил, что Демокрит безумствовал, что древние были дураками. Истина зависит от вещей, а не от человеческих мозжечков».

В начале XVII в. французский ученый П. Гассенди для обозначения частицы, состоящей из нескольких атомов, впервые вводит термин «молекула», что в переводе с латинского означает «маленькая масса». Атомно-молекулярные представления начинают привлекать внимание химиков. В XVIII в. идеи о мельчайших частицах вещества разви-

вались М. В. Ломоносовым. Различая два вида «нечувствительных частиц» материи, он дает им названия «элементы» (=понятию атома) и «корпускулы» (=понятию молекулы). По Ломоносову, «элемент есть часть тела, не состоящая из каких-либо других меньших и отличных между собою тел»; «корпускула есть собрание элементов в одну небольшую массу».

В начале XIX в. английский ученый Дж. Дальтон ввел в химию представление о «сложных атомах», а итальянский ученый А. Авогадро — понятие об «элементарных молекулах». Возникшая путаница в понятиях и отсутствие единой общепринятой терминологии стали препятствовать дальнейшему развитию химии. Важную роль в уточнении используемых понятий сыграл Международный конгресс химиков в Карлсруэ, собравший в 1860 г. 140 ученых из разных стран. Конгресс путем голосования принял решение о различении понятий «атом» и «молекула», раз и навсегда покончив с существовавшей до этого путаницей.

Между тем многие ученые и после этого продолжали считать атомы и молекулы не реально существующими частицами, а лишь «рабочими гипотезами», придуманными ради удобства. Так, например, немецкий ученый В. Оствальд утверждал, что «атомы будут существовать только в пыли библиотек». Другой известный ученый — Э. Мах на все доводы в пользу существования атомов обычно отвечал: «А вы видели хотя бы один атом?»

Иной точки зрения придерживался австрийский физик-теоретик Л. Больцман. И хотя он дружил с Оствальдом и с огромным уважением относился к Маху, сам он, в отличие от них, был страстным и убежденным сторонником атомно-молекулярного учения и много сделал для его развития. Однажды во время обсуждения атомистической теории в Венской академии он вдруг услышал, как Мах лаконично заметил: «Я не верю в существование атомов». «От этого высказывания, — вспоминал впоследствии Больцман, — у меня голова пошла кругом...»



Больцман не дожид до осуществления тех опытов, которые неопровержимо доказали реальность существования атомов. В 1906 г. он покончил с собой. «То, на что жалуется поэт, — писал Больцман, — верно и для теоретика: творения его написаны кровью его сердца, и высшая мудрость граничит с высшим безумием».

Сегодня уже никто не сомневается в существовании атомов. Однако реально существующие атомы оказались совсем не такими, какими их представлял Демокрит. Уже Больцман по этому поводу писал: «В неделимость атома не верит в настоящее время ни один физик». Однако установить истинную структуру атома удалось лишь спустя пять лет после смерти Больцмана, когда после продолжительных и кропотливых экспериментов английский ученый Э. Резерфорд пришел к выводу, что атом представляет собой положительно заряженное ядро, окруженное электронной оболочкой.

Теперь мы знаем, что все тепловые, химические и биологические процессы в нашем мире обусловлены движением и взаимодействием атомов и молекул. Живший в XVII в. Дж. Холл не обладал этим знанием и потому в одном из своих писем написал:

«Если то, что мы называем Вселенной, зародилось случайно из атомов, которые неутомимы в своем вихревом движении, то как случилось, что ты столь прекрасна, а я влюблен?»

С тех пор прошло триста лет. Но перестали ли мы этому удивляться?

## Глава 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В одной из своих лекций американский физик XX в. Ричард Фейнман заметил: «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — *атомная гипотеза* (можете называть ее не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): *все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому*. В одной этой фразе... содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения».

Теория, объясняющая тепловые свойства макроскопических тел на основе представления об их атомно-молекулярном строении, называется **молекулярно-кинетической теорией** (сокращенно МКТ).

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три важнейших положения:

- 1) все тела состоят из огромного количества частиц (молекул, атомов или ионов), между которыми есть промежутки;
- 2) частицы вещества непрерывно и хаотически движутся;
- 3) частицы вещества взаимодействуют одна с другой: притягиваются и отталкиваются.

Изучению и подробному рассмотрению этих положений и будет посвящена данная глава.

## § 20. ПЕРВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МКТ

Итак, согласно **первому положению МКТ** все тела состоят из огромного количества частиц (молекул, атомов или ионов), между которыми есть промежутки.

**Атом** — это электрически нейтральная микрочастица, состоящая из положительно заряженного ядра и окружающей его электронной оболочки. Совокупность атомов одного вида называют *химическим элементом*. В естественном состоянии в природе встречаются атомы 90 химических элементов, наиболее тяжелым из которых является уран.

При сближении атомы могут объединяться в устойчивые группы. Системы из небольшого<sup>1</sup> числа связанных друг с другом атомов называются **молекулами**. Молекулы являются наименьшими частицами вещества, обладающими его основными химическими свойствами.

Про вещества, состоящие из атомов, не объединенных в молекулы, говорят, что они находятся в *атомарном* состоянии; в противном случае говорят о *молекулярном* состоянии. В первом случае мельчайшей частицей вещества является атом, во втором случае — молекула. Например, гелий (He) состоит из отдельных атомов, а вода (H<sub>2</sub>O) — из трехатомных молекул. Число атомов в молекулах может достигать нескольких десятков (см., например, рисунок 59, на котором изображена структурная формула молекулы «запаха фиалки»), а в некоторых случаях даже сотен и тысяч (у витаминов и белков).

Если два тела состоят из одного и того же числа частиц, то говорят, что эти тела содержат одинаковое количество вещества. Количество вещества обозначается греческой буквой  $\nu$  (ню) и измеряется в *молях*. За 1 моль принимают количество вещества в 12 г углерода. Так как в 12 г углерода содержится приблизительно  $6 \cdot 10^{23}$  атомов, то для количества вещества (т. е. числа молей) в теле, состоящем из  $N$  частиц, можно написать:

$$\nu = \frac{N}{6 \cdot 10^{23}} \text{ моль.} \quad (20.1)$$

<sup>1</sup> По сравнению с полным числом атомов, составляющих тело.



Если ввести обозначение

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

то соотношение (20.1) примет вид следующей простой формулы:

$$\nu = N/N_A. \quad (20.2)$$

Число  $N_A$  называют **постоянной Авогадро**. Так как эта постоянная численно равна количеству атомов в 12 г углерода, то она может быть представлена в виде

$$N_A = \frac{12}{m_{0C}} \frac{\text{г}}{\text{моль}} = \frac{12}{m_{0C}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, \quad (20.3)$$

где через  $m_{0C}$  обозначена масса атома углерода. Физический смысл постоянной Авогадро заключается в том, что ее значение показывает число частиц (атомов в веществе в атомарном состоянии, молекул в веществе в молекулярном состоянии), содержащееся в одном моле любого вещества.

Физическую величину, которая показывает, чему равна масса одного моля вещества, называют **молярной массой**. Если молярную массу вещества обозначить буквой  $M$ , то для количества вещества в теле массой  $m$  можно записать:

$$\nu = m/M. \quad (20.4)$$

Из формул (20.2) и (20.4) следует, что число частиц в любом теле можно определить по формуле

$$N = \frac{m}{M} N_A. \quad (20.5)$$

В любом макроскопическом теле это число всегда велико.

Если массу одного моля вещества ( $M$ ) разделить на число частиц в одном моле ( $N_A$ ), то мы получим массу одной частицы данного вещества:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (20.6)$$

Формулы (20.5) и (20.6) применяются в тех случаях, когда известна молярная масса вещества. Как же ее найти? Очень просто:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}. \quad (20.7)$$

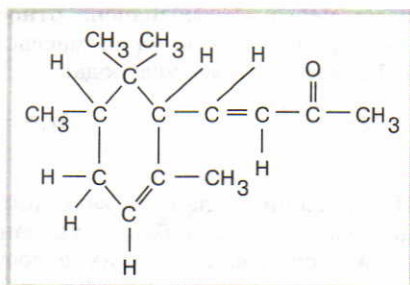


Рис. 59

Здесь через  $M_r$  обозначена **относительная молекулярная масса** вещества, т. е. отношение массы  $m_0$  молекулы данного вещества к  $1/12$  массы атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12m_{0C}}} \quad (20.8)$$

При решении задач эту величину находят с помощью таблицы Менделеева. В этой таблице указаны **относительные атомные массы** элементов. Складывая их в соответствии с химической формулой молекулы данного вещества, и получают  $M_r$ . Например, для воды ( $H_2O$ )  $M_r = 1 \cdot 2 + 16 = 18$ , а для углерода (C)  $M_r = 12$ .

Чтобы убедиться в справедливости соотношения (20.7), достаточно в формулу (20.8) подставить сначала выражение (20.6), а затем выражение (20.3).

Четких границ молекулы (как и атомы) не имеют. Размеры молекул твердых и жидких тел можно ориентировочно оценить следующим образом:

$$d_0 \approx \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{V}{N}} = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho N}} = \sqrt[3]{\frac{m_0}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}, \quad (20.9)$$

где  $V_0 = V/N$  — объем, приходящийся на одну молекулу;  $V = m/\rho$  — объем всего тела;  $m$  и  $\rho$  — его масса и плотность;  $N$  — число молекул в нем.

Рассмотрим в качестве примера воду. Применяя формулы (20.6), (20.9) и (20.5), можно получить следующие результаты:

а) масса одной молекулы воды

$$m_0 = \frac{M}{N_A}; \quad m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг};$$

б) диаметр молекулы воды

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{m_0}{\rho}}; \quad d_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}}{10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

в) число молекул в 1 г воды

$$N = \frac{m}{M} N_A; \quad N = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 3,3 \cdot 10^{22}.$$

Атомы и молекулы нельзя увидеть невооруженным глазом или с помощью оптического микроскопа. Поэтому сомнения некоторых ученых конца XIX в. в реальности их существования понять можно. Однако в XX в. ситуация стала иной. Сейчас с помощью электронного микроскопа, а также средств голографической микроскопии можно наблюдать изображения не только молекул, но и отдельных атомов.



Кроме прямых экспериментов, позволяющих наблюдать атомы и молекулы, в пользу их существования говорит и множество других, косвенных данных. Таковы, например, факты, касающиеся теплового расширения тел, их сжимаемости, растворения одних веществ в других и т. п. Все эти явления могут быть непротиворечиво объяснены, если считать, что все вещества имеют не непрерывную, а дискретную, атомно-молекулярную структуру.

?

1. Какую физическую теорию называют молекулярно-кинетической?
2. Сформулируйте основные положения МКТ.
3. Какие опытные факты подтверждают первое положение МКТ?
4. Что такое атом?
5. Что называют молекулой?
6. Назовите числовое значение, дайте определение и раскройте физический смысл постоянной Авогадро.
7. Что такое молярная масса и как ее можно найти с помощью таблицы Менделеева?
8. Чему равны молярные массы воды, кислорода, углекислого газа и железа?
9. По каким формулам определяются масса, размеры и число молекул в теле?

## § 21. ВТОРОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МКТ

Согласно второму положению МКТ частицы вещества непрерывно и хаотически (беспорядочно) движутся.

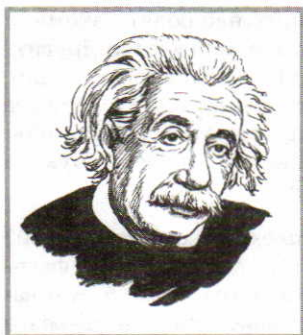
Это положение подтверждается существованием диффузии, испарения, давления газа на стенки сосуда, а также броуновским движением.

Напомним, что *диффузия* — это самопроизвольное перемешивание соприкасающихся веществ. Согласно молекулярно-кинетической теории такое перемешивание происходит в результате того, что беспорядочно движущиеся молекулы одного вещества проникают в промежутки между молекулами другого вещества.

**Броуновским движением** называют беспорядочное движение взвешенных в жидкости или газе мелких частичек другого вещества. Это движение было открыто в 1827 г. английским ботаником Р. Броуном, который наблюдал в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде. Во время наблюдений он обнаружил странное явление: частицы пыльцы непрерывно двигались, описывая самые причудливые траектории. Когда к нему зашел Чарлз Дарвин, Броун предложил ему посмотреть в микроскоп и описать то, что он увидит. Дарвин сделал это и с удивлением спросил, что это за поразительное движение. «Это мой маленький секрет», — ответил Броун.

На самом деле в ту пору ни Дарвин, ни сам Броун не имели представления об истинной природе наблюдавшегося ими явления. Предположение о том, что броуновское движение вызывается движением молекул окружающей жидкости, впервые было высказано лишь в 1874 г. бельгийским физиком И. Карбонеллем.

В ходе изучения броуновского движения было обнаружено, что его интенсивность: а) увеличивается с повышением температуры



Альберт Эйнштейн

среды; б) увеличивается при уменьшении размеров самих броуновских частиц; в) уменьшается в более вязкой жидкости; г) совершенно не зависит от материала (плотности) броуновских частиц. Кроме того, было установлено, что это движение *универсально* (поскольку наблюдалось почти у всех веществ, взвешенных в распыленном состоянии в жидкости), *непрерывно* (например, в закрытой со всех сторон кювете его можно наблюдать неделями, месяцами, годами) и *хаотично* (беспорядочно).

Движения броуновских частиц, расположенных даже близко одна к другой, совершенно независимы, так что не может быть и речи о том, что их причиной служат какие-то потоки в жидкости. Броуновское движение объясняется непрерывным беспорядочным движением молекул среды и отсутствием точной компенсации ударов, испытываемых броуновской частицей со стороны окружающих ее молекул (рис. 60).

Первая количественная теория броуновского движения появилась в 1905 г. Ее автором был Альберт Эйнштейн. Эта работа называлась «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» и была опубликована в том же номере физического журнала, в котором появилась его первая статья по теории относительности. Составив уравнение, описывающее броуновское движение, и решив его, Эйнштейн получил следующее соотношение:

$$\overline{x^2} = b (T/N_A)t, \quad (21.1)$$

где  $\overline{x^2}$  — среднее значение квадрата смещения броуновской частицы вдоль оси  $X$  за время  $t$ ;  $T$  — абсолютная температура жидкости;  $b$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от размера броуновской частицы и вязкости жидкости.

Абсолютная температура отличается от знакомой вам температуры по шкале Цельсия на  $273^\circ$ . Подробно, зачем потребовалось ввести особую шкалу температур с нулем, соответствующим температуре  $-273^\circ\text{C}$ , мы поговорим в главе 4.

Теория Эйнштейна нашла полное подтверждение в экспериментальных исследованиях французского физика Жана Перрена, которые он начал проводить в 1906 г. и продолжал затем в течение нескольких лет. Перрен отмечал через равные промежутки времени ( $\Delta t = 30$  с) последовательные положения броуновской частицы, видимые в поле зрения микроскопа, и соединял затем эти положения отрезками. На рисунке 61 воспроизведен один из оригинальных рисунков Перрена с изображением путей трех броуновских частиц. Длина 16 клеток на этом рисунке составляет 50 мкм, диаметр же



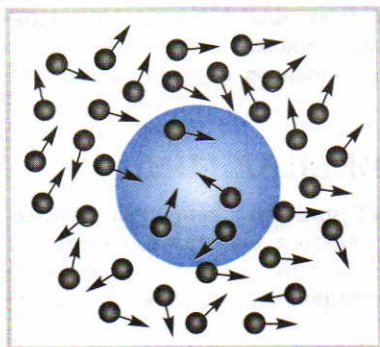


Рис. 60

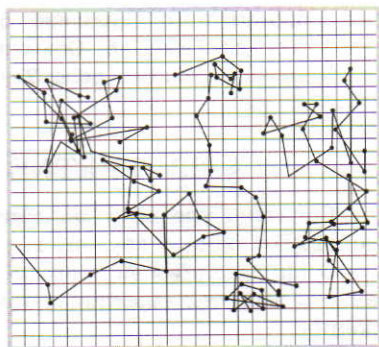


Рис. 61

самых броуновских частиц был равен 0,53 мкм. Не следует думать, что приведенный рисунок изображает точную форму действительных траекторий броуновских частиц. На самом деле он дает лишь отдаленный намек на истинную картину этого беспорядочного движения, и если бы мы отмечали положения частицы через промежутки времени, в 100 раз меньшие тех, которые выбрал Перрен, то каждый отрезок прямой на рисунке заменялся бы соответствующей зигзагообразной ломаной, которая была бы столь же сложна, как и весь данный рисунок.

После своей первой статьи Эйнштейн еще не раз возвращался к теории броуновского движения. Изучение этого явления, как отмечал впоследствии Эйнштейн, имело очень большое значение, так как позволяло точно вычислить постоянную Авогадро, а также «видеть в микроскоп непосредственно часть тепловой энергии в форме механической энергии движущихся частиц»<sup>1</sup>.

Для определения постоянной Авогадро методом Эйнштейна достаточно измерить значения  $\bar{x}^2$ ,  $b$ ,  $T$  и  $t$  и подставить их в формулу (21.1).

Ссылаясь на эксперименты по броуновскому движению, Оствальд был вынужден признать, что они «позволяют даже осторожному ученому говорить об экспериментальном подтверждении атомного строения вещества». Перрен за свои работы по броуновскому движению получил Нобелевскую премию. Подводя итоги, Перрен в 1912 г. заявил: «Атомная теория восторжествовала. некогда многочисленные ее противники повержены и один за другим отрекаются от своих взглядов, в течение столь долгого времени считавшихся обоснованными и полезными».



1. В чем заключается второе положение МКТ? 2. Какие опытные факты подтверждают это положение? 3. Что такое броуновское движение? Почему оно так называется? 4. От чего и как зависит интенсивность

<sup>1</sup> Тепловой энергией раньше называли внутреннюю энергию тела.

броуновского движения? 5. Какими свойствами обладает броуновское движение? 6. Объясните, почему происходит броуновское движение. 7. Какова роль Эйнштейна и Перрена в изучении этого движения?

## § 22. ТРЕТЬЕ ПОЛОЖЕНИЕ МКТ

Согласно **третьему положению МКТ** частицы вещества взаимодействуют одна с другой, т. е. притягиваются и отталкиваются.

О справедливости этого положения свидетельствует сопротивляемость всех тел сжатию, а также (за исключением газов) их растяжению.

Силы взаимодействия молекул имеют электромагнитную природу и возникают в результате взаимодействия заряженных частиц (электронов и атомных ядер), входящих в состав атомов и молекул тел. Результирующую силу межмолекулярного взаимодействия можно рассматривать как разность модулей сил притяжения и отталкивания, одновременно действующих между составными частями молекул. Исследование этого взаимодействия показывает, что и силы притяжения между молекулами (обусловленные взаимодействием электронов одной молекулы с ядрами другой), и силы отталкивания между ними (обусловленные в первую очередь взаимодействием их ядер) с увеличением расстояния  $r$  между центрами молекул очень быстро убывают, стремясь к нулю. Однако у сил притяжения это убывание происходит по закону  $1/r^n$ , где  $n \approx 7$ , а у сил отталкивания — по закону  $1/r^m$ , где  $m \geq 9$ , т. е. значительно быстрее, чем у сил притяжения. Если через  $r_0$  обозначить то расстояние между молекулами, при котором модули сил притяжения и отталкивания совпадают (оно примерно равно сумме радиусов взаимодействующих молекул), то при  $r < r_0$  преобладающими оказываются силы отталкивания, а при  $r > r_0$  — силы притяжения. Этим и объясняется сопротивляемость тел их сжатию и растяжению.

График зависимости сил взаимодействия между частицами вещества от расстояния между центрами частиц, которые можно считать сферически симметричными, представлен на рисунке 62.



Рис. 62

Силы притяжения принято считать отрицательными, силы отталкивания — положительными.

Взаимодействие молекул вещества одна с другой характеризуют потенциальной энергией  $E_p$ , а их движение — кинетической энергией  $E_k$ . Отношение  $\delta = \overline{E_p} / \overline{E_k}$  средних значений этих величин (в расчете на одну молекулу) определяет *агрегатное со-*



стояние, в котором находится вещество. Различают три основных агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное. Молекулярно-кинетическая теория позволяет установить особенности движения и взаимодействия частиц вещества в каждом из этих состояний.

Газ. В газах  $|\delta| \ll 1$ , поэтому силы притяжения недостаточны, чтобы удерживать молекулы вещества друг возле друга. Из-за этого газы не образуют свободной поверхности, не имеют собственной формы и равномерно заполняют весь доступный им объем. При этом сами частицы газа совершают хаотическое и почти свободное движение в пространстве, меняя свою скорость лишь при столкновениях друг с другом или стенками сосуда, в котором находится газ. Время столкновения молекул в газе значительно меньше среднего времени их свободного пробега. При нормальных условиях в  $1 \text{ см}^3$  газа находится  $\approx 10^{19}$  молекул и среднее расстояние между ними составляет  $\approx 10^{-9}$  м. Взаимодействие же молекул существенно лишь на расстояниях меньше 1 нм. Поэтому радиус действия межмолекулярных сил в данном случае оказывается в 10 раз меньше среднего расстояния между молекулами, а общий объем, в котором эти силы могут проявляться (как бы собственный объем всех молекул), в тысячу раз меньше полного объема газа. Именно поэтому взаимодействие молекул в газе несущественно. Вот почему во многих задачах, решаемых молекулярно-кинетической теорией, рассматривается такая модель газа, в которой вообще не учитывается взаимодействие молекул (за исключением сил отталкивания, возникающих при их непосредственном столкновении друг с другом), а сами молекулы (в промежутках между столкновениями) рассматриваются как не имеющие размеров материальные точки. Эта модель была введена в 1857 г. немецким физиком Рудольфом Клаузиусом. Используемое им для нее вначале название «совершенный газ» несколько позже было заменено на термин **идеальный газ**.

При создании теории идеального газа Клаузиус исходил из ошибочного допущения, согласно которому все молекулы газа движутся с одной и той же (средней) скоростью. Эта ошибка была исправлена Дж. Максвеллом.

Для характеристики молекулярного хаоса — беспорядочного непрерывного движения частиц газа — вводятся различные средние скорости.

Прежде всего, если рассмотреть скорости частиц газа в сосуде в системе отсчета, связанной с сосудом, очевидно, что средняя скорость как векторная сумма мгновенных скоростей всех частиц, раз-



Джеймс Клерк  
Максвелл

деленная на их число, окажется равной нулю и не будет представлять никакого интереса, кроме как иллюстрация беспорядочности движения:

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \dots + \vec{v}_N}{N} = \mathbf{0}.$$

Нулю будут равны и средние проекции скоростей частиц газа на любую ось координат:

$$v_{x\text{cp}} = \frac{v_{x1} + v_{x2} + \dots + v_{xN}}{N} = 0.$$

Если усреднить модули всех скоростей частиц газа, то получим значение, отличное от нуля, — среднее значение скорости для большой совокупности молекул:

$$|\vec{v}|_{\text{cp}} = \frac{|\vec{v}_1| + |\vec{v}_2| + \dots + |\vec{v}_N|}{N}.$$

Однако, как будет показано далее, особый интерес представляет такая операция, как возведение в квадрат модулей скоростей всех молекул (или атомов) газа в некоторый момент времени, суммирование полученных значений и усреднение при делении на число молекул. Эта физическая величина называется **средним квадратом скорости**:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Аналогичную операцию можно провести с проекциями скоростей частиц газа на три оси координат:

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N},$$

$$\overline{v_y^2} = \frac{v_{1y}^2 + v_{2y}^2 + \dots + v_{Ny}^2}{N},$$

$$\overline{v_z^2} = \frac{v_{1z}^2 + v_{2z}^2 + \dots + v_{Nz}^2}{N}.$$

Средний квадрат скорости молекул, а также средние квадраты проекций их скоростей на любую координатную ось уже не будут равны нулю. Именно средний квадрат скорости, как вы узнаете в дальнейшем, характеризует интенсивность теплового движения частиц вещества, именно он представляет для нас наибольший интерес. Корень квадратный из среднего квадрата скорости называется **средней квадратичной скоростью**:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{v^2}}.$$

В 1859 г. Максвелл получил *функцию распределения молекул газа по скоростям*, график которой представлен на рисунке 63. На этом рисунке по оси абсцисс отложен модуль скорости молекул, а по оси ординат — доля молекул (от их общего числа), скорость ко-



торых близка к данному значению (т. е. отличается от этого значения не более чем на 0,5 м/с). Максимум этого графика приходится на некоторое значение  $v_n$ , называемое *наивероятнейшей скоростью*. Именно около этого (а не среднего, которое в 1,13 раза больше) значения группируется большинство скоростей, с которыми движутся молекулы газа.

**Твердое тело.** В твердых телах  $|\delta| \gg 1$ , поэтому силы притяжения способны удерживать частицы этих тел рядом друг с другом, что приводит (при отсутствии внешних воздействий) к сохранению твердыми телами своей формы и своего объема.

Различают *кристаллические* и *аморфные* твердые тела. И в тех и в других телах движение частиц носит характер малых колебаний около положений равновесия. Однако в аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек, упорядоченность которых наблюдается лишь на расстояниях, сравнимых с межатомными (так называемый *ближний порядок*); а в кристаллах периодичность в расположении этих точек наблюдается для сколь угодно отдаленных атомов (*дальний порядок*).

Кристаллы обладают периодической структурой, называемой **кристаллической решеткой**. Положения равновесия, около которых происходят колебания частиц кристалла, называют **узлами** кристаллической решетки. В узлах кристаллической решетки могут находиться атомы (например, у алмаза или графита это атомы углерода), молекулы (например, у полимеров или белков), положительные или отрицательные ионы (например, у поваренной соли) либо только положительные ионы (например, у металлов). Обычно кристаллические тела имеют форму правильного симметричного многогранника. Правда, большинство твердых материалов является *полукристаллическими*, т. е. состоит из множества отдельных, беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен (например, многие горные породы, технические металлы, сплавы) и потому подобной симметричной формой не обладают. В противоположность им крупные одиночные кристаллы называют *монокристаллами* (кристаллы кварца, флюорита, полевого шпата, алмаза и др.). Отличительной особенностью всех монокристаллов является их *анизотропия*, т. е. зависимость физических свойств от направления внутри кристалла. Например, по разным направлениям в кристалле могут быть различными механическая прочность, теплопроводность, электропроводность и другие свойства. Причина анизотропии кристаллов — упорядоченное расположение в них частиц, приводящее к различию расстояний и интенсивности взаимодействия этих частиц по разным направлениям внутри кристалли-

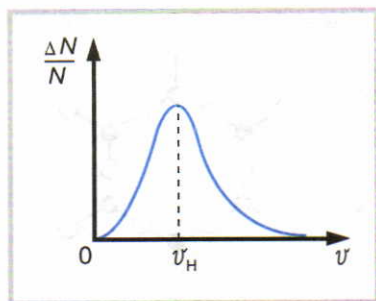


Рис. 63

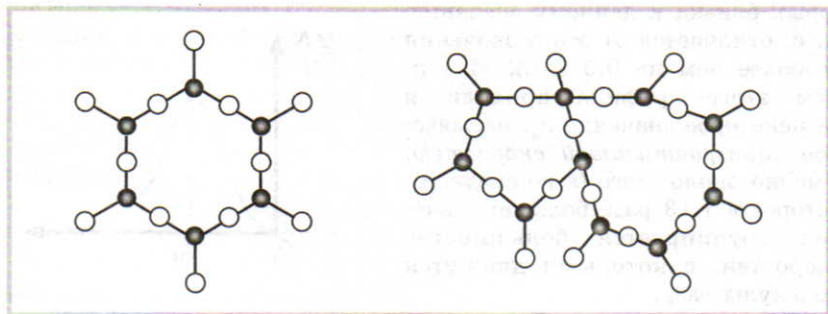


Рис. 64

ческой решетки. Поликристаллические тела в обычных условиях изотропны.

*Аморфные тела* (стекло, многие пластмассы, смола, опал, янтарь, канифоль и др.) также изотропны, но, кроме того, отличаются от кристаллических тел еще и тем, что не имеют определенной температуры плавления. При повышении температуры они размягчаются и постепенно переходят в жидкое состояние.

Многие вещества могут находиться как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии. Различие в расположении частиц вещества в этих двух состояниях иллюстрирует рисунок 64, на котором дано схематическое изображение структуры кварца ( $\text{SiO}_2$ ) в кристаллическом и аморфном (кремнезем) состояниях.

**Жидкость.** В жидкости  $|\delta| \approx 1$ , поэтому по своим свойствам она занимает промежуточное место между двумя другими агрегатными состояниями вещества. Жидкости присущи некоторые свойства и твердого тела (сохраняет свой объем, образует свободную поверхность, обладает определенной прочностью на разрыв), и газа (принимает форму сосуда, в котором находится)<sup>1</sup>.

Молекулы в жидкости расположены почти вплотную друг к другу, а их движение представляет собой сочетание колебательного движения около некоторых положений равновесия и происходящих время от времени перескоков молекул из одних центров колебаний в другие. Частота таких перескоков может быть до  $10^{12}$  в 1 с. При наличии внешней силы, сохраняющей свое направление более длительное время, чем интервалы между скачками, молекулы жидкости начинают перескакивать преимущественно в том направлении, в котором эта сила действует (например, в направлении силы тяжести). Благодаря этому жидкость приобретает свое главное свойство — *текучесть*.

<sup>1</sup> При отсутствии или компенсации внешних сил или при наличии одной лишь силы тяжести жидкость характеризуется своей собственной формой — формой шара.



При определенных условиях вещество может переходить из одного агрегатного состояния в другое: из твердого в жидкое и обратно, из твердого в газообразное и обратно, из жидкого в газообразное и обратно. Соответствующие процессы называются плавлением и отвердеванием или кристаллизацией, возгонкой или сублимацией и десублимацией, парообразованием и конденсацией. Причем парообразование существует в двух формах — это испарение и кипение.

Для плавления кристаллического вещества необходимо сообщать энергию для того, чтобы возрастала амплитуда колебаний частиц кристалла в узлах кристаллической решетки и, как следствие, происходило разрушение упорядоченности в расположении частиц.

Для парообразования в форме испарения необязательно подводить энергию. Испарение жидкости происходит при любой температуре, и если притока энергии к жидкости нет, то температура испаряющейся жидкости понижается.

При парообразовании в форме кипения (когда испарение происходит по всему объему жидкости и сопровождается образованием пузырьков) сообщаемая жидкости энергия расходуется на преодоление сил притяжения частиц жидкости при вылете наиболее энергичных молекул за пределы жидкости.

? 1. В чем заключается третье положение МКТ? 2. Какие опытные факты его подтверждают? 3. Что вы знаете о природе и особенностях молекулярных сил? 4. Опишите особенности движения, расположения и взаимодействия частиц в различных агрегатных состояниях вещества.

## § 23. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

Тела во всех трех агрегатных состояниях находят широкое применение в повседневной жизни и технике. При этом необходимо учитывать свойства тел в разных агрегатных состояниях, т. е. должны быть созданы теории, объясняющие свойства твердых тел, жидкостей и газов.

Самым простым агрегатным состоянием является газ, поскольку можно не учитывать взаимодействие частиц газа. Теорию, объясняющую свойства вещества в газообразном состоянии, мы рассмотрим подробно в главе 5. Самой сложной является теория жидкого состояния вещества, так как в свойствах жидкости сочетаются во многом противоположные свойства твердых тел и газов. Не имея возможности детально обсудить теории строения твердых тел и жидкостей, рассмотрим некоторые практически значимые закономерности, характерные для этих двух состояний вещества.

**Механические свойства твердых тел.** В конструкциях и сооружениях различного рода чрезвычайно важно такое свойство твер-



Рис. 65

несколько увеличатся расстояния между частицами твердого тела и между частицами начнут преобладать силы притяжения. На макроуровне это приведет к тому, что появится сила, действующая со стороны стержня на деформирующий его объект. Это сила электромагнитной природы — **сила упругости**. При деформации сжатия уменьшение расстояний между частицами стержня приведет к возникновению силы упругости, действующей также в сторону, противоположную смещению частиц тела. Это показано на рисунке 65, б. В обоих случаях состояние тела изменится и это изменение можно охарактеризовать особой физической величиной — **механическим напряжением**. Механическое напряжение, показывающее, какая сила упругости возникает при деформации сжатия или растяжения в расчете на единицу площади поперечного сечения стержня, определяется по формуле  $\delta = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$  и выражается в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ).

При деформации сдвига слои стержня смещаются относительно друг друга. При деформации кручения эти слои поворачиваются относительно друг друга (рис. 66). Деформация изгиба представляет собой сочетание деформаций сжатия и растяжения (для разных слоев стержня).

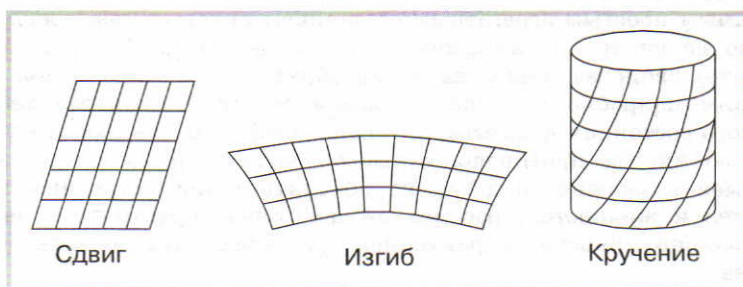


Рис. 66



Существует и другая классификация видов деформаций. Если после прекращения внешнего воздействия тело полностью восстанавливает свою форму и объем, деформация называется **упругой**. Если же и после снятия внешней нагрузки объем и форма тела оказываются измененными, деформация называется **пластической**.

Рассмотрим более подробно деформации сжатия и растяжения. Во многих случаях эти деформации можно считать малыми, поэтому при растяжении или сжатии стержня следует учитывать только увеличение или уменьшение его длины, а не изменение площади поперечного сечения и объема. Для характеристики деформаций в этих случаях вводят физические величины — абсолютное и относительное удлинения.

**Абсолютное удлинение** тела — это изменение длины тела:  $\Delta l = l - l_0$ .

**Относительное удлинение** тела — это отношение абсолютного удлинения к первоначальной длине тела:  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ .

Как вы знаете, малые упругие деформации подчиняются закону, который был экспериментально установлен Робертом Гуком в 1660 г. Этот закон выражает прямую пропорциональную зависимость силы упругости от деформации и для модуля силы упругости записывается так:  $F_{\text{упр}} = k\Delta l$ .

Подставим в эту формулу вместо абсолютного удлинения относительное удлинение и первоначальную длину стержня, разделим обе части равенства на площадь поперечного сечения стержня и коэффициент перед относительным удлинением обозначим через  $E$ . Тогда выражение примет вид  $\delta = E\epsilon$ , и станет ясно, что механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению. Выражение также представляет собой формулировку закона Гука. В такой формулировке не учитывается взаимосвязь направлений силы упругости и деформации тела, но отражается изменение внутреннего состояния деформируемого стержня с увеличением относительного удлинения.

Коэффициент пропорциональности в выражении  $E = \frac{k l_0}{S}$  называется модулем Юнга в честь английского физика Томаса Юнга, о работах которого в области оптики вы уже знаете. Модуль Юнга выражается в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ) и показывает, какое механическое напряжение возникает в стержне при увеличении его длины вдвое. В действительности такие деформации без разрушения не выдерживает ни один материал, кроме резины.

Экспериментальное исследование деформаций твердых тел, в простейшем случае имеющих форму стержней, дает зависимость механического напряжения от относительного удлинения, представленную на рисунке 67.

Участок  $OA$  на графике соответствует малым упругим деформациям. Максимальное значение механического напряжения, при ко-

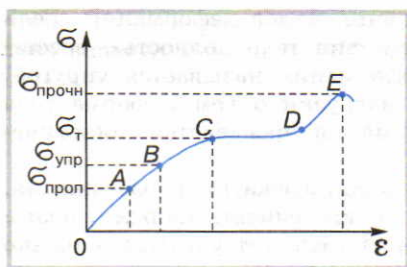


Рис. 67

тором деформации подчиняются закону Гука, называется **пределом пропорциональности** ( $\sigma_{\text{проп}}$ ). С дальнейшим увеличением механического напряжения прямая пропорциональная зависимость между  $\sigma$  и  $\epsilon$  нарушается, но деформации продолжают оставаться упругими вплоть до значения механического напряжения  $\sigma_{\text{упр}}$  (участок  $AB$  графика). Это значение носит название **предела упругости**. Если предел упругости превышен, деформации становятся пластическими (участок  $BC$  графика).

Для многих материалов с дальнейшим увеличением относительного удлинения наступает состояние текучести ( $\sigma_t$  — предел текучести), соответствующее участку  $CD$  графика, при котором относительное удлинение возрастает без увеличения механического напряжения. Материалы, для которых участок  $CD$  четко выражен, являются текучими; телам из таких материалов в состоянии текучести легко придать нужную форму.

С дальнейшим увеличением относительного удлинения механическое напряжение достигает максимального для данного материала значения и стержень разрушается при напряжении, равном пределу прочности ( $\sigma_{\text{проч}}$ ) в точке  $E$  графика.

График на рисунке 67 носит название **диаграммы растяжения**. Форма графика индивидуальна для разных материалов, и в зависимости от протяженности разных участков графика различают упругие и неупругие, пластичные и хрупкие, прочные и непрочные материалы.

**Поверхностное натяжение.** В земных условиях жидкости, как правило, находятся в сосудах, т. е. контактируют с поверхностями твердых тел и образуют свободную поверхность, соприкасаясь с газообразным веществом.

На границе жидкости и твердого тела или газа наблюдаются практически значимые физические явления, называемые **поверхностными явлениями**.

Эти явления объясняются на микроуровне взаимодействием частиц вещества. Поведение частиц на поверхности зависит от соотношения сил взаимодействия частиц жидкости между собой, сил взаимодействия частиц жидкости и твердого тела или частиц жидкости и газа, контактирующих с жидкостью.

Рассмотрим частицы жидкости вблизи поверхности — границы жидкости и газа. Часто это газ, состоящий из тех же частиц, что и сама жидкость, или испарившаяся жидкость. В этом случае возникает равнодействующая сил, действующих на частицы жидкости вблизи поверхности. Она направлена в глубь жидкости, поскольку расстояния между этой частицей и соседними частицами внутри



жидкости меньше, чем расстояние между рассматриваемой частицей и частицей в газе над жидкостью. Эта равнодействующая сила способна совершить работу, с одной стороны, по перемещению частицы с поверхности в глубь жидкости. С другой стороны, для перемещения частицы жидкости на поверхность такая сила совершает работу против сил притяжения со стороны частиц, образующих жидкость. Это означает, что частица вблизи поверхности обладает избыточной энергией по сравнению с энергией частицы в глубине жидкости. Эта энергия получила название **поверхностной энергии**. Под действием сил, стремящихся переместить частицу жидкости с поверхности в глубину, поверхность жидкости сокращается — при данном объеме жидкость принимает такую форму, при которой ее поверхность минимальна. Это соответствует принципу минимальности потенциальной энергии для каждой системы, в том числе для системы частиц, образующих жидкость.

Поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности жидкости  $S$ , сила поверхностного натяжения  $F$  пропорциональна длине  $l$  границы раздела жидкости и газа. Поэтому отношение поверхностной энергии к площади поверхности не зависит от площади поверхности, а отношение силы поверхностного натяжения к длине границы раздела не зависит от длины границы раздела.

Для характеристики поверхностных свойств жидкости вводят физическую величину — **коэффициент поверхностного натяжения** (или **поверхностное натяжение**), равную  $\sigma = \frac{U}{S} = \frac{F}{l}$ . Коэффициент поверхностного натяжения характеризует пару контактирующих поверхностей и зависит от температуры жидкости, изменяется при нанесении на поверхность жидкости каких-либо пленок и выражается в ньютонах на метр (Н/м) или в джоулях на квадратный метр (Дж/м<sup>2</sup>).

Если жидкость граничит с твердым телом, то возникает эффект смачивания или несмачивания. Это зависит от того, какое взаимодействие оказывается более интенсивным — взаимодействие частиц жидкости между собой или частиц жидкости с частицами твердого тела. Жидкость образует капли на несмачиваемой поверхности или растекается по смачиваемой поверхности (рис. 68).

В зависимости от того, смачивает жидкость поверхность сосуда или нет, образуется вогнутый либо выпуклый мениск в сосуде. В тонких сосудах (капиллярах) жидкость устанавливается выше или ниже уровня жидкости в широком сосуде (рис. 69).

Высоту опускания жидкости в несмачиваемом капилляре можно определить. Если погрузить капилляр в сосуд, опускание жидкости прекратится, значит, сила



Рис. 68

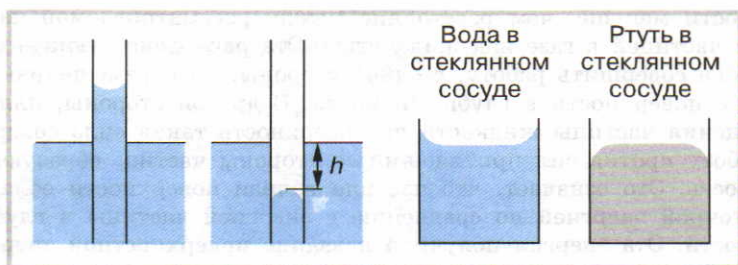


Рис. 69

давления со стороны столба жидкости в широком сосуде, действующая на жидкость в капилляре вертикально вверх, уравновесится силой поверхностного натяжения, действующей вертикально вниз:

$$mg = F_{\text{н}}, \quad mg = \sigma l, \quad \rho Vg = \sigma l, \quad \rho \pi r^2 hg = \sigma \cdot 2\pi r, \quad h = \frac{2\sigma}{\rho r g}.$$

На явлениях, связанных с существованием сил поверхностного натяжения, основано их широкое применение в технике, они играют важную роль и в живой природе.

## ИТОГИ И ОБОБЩЕНИЯ

Итак, согласно молекулярно-кинетической теории все макроскопические тела состоят из огромного количества непрерывно и беспорядочно движущихся частиц.

Беспорядочное движение частиц, составляющих макроскопические тела, называют **тепловым**. Тепловая форма движения качественно отличается от механической. В чем же состоят эти отличия?

Механическое движение отдельных частиц, как известно из курса механики, подчиняется принципу причинности. В соответствии с этим принципом задание совокупности начальных координат и начальных скоростей частично данной системы полностью предопределяет все ее дальнейшее движение. В свое время это дало повод французскому ученому Лапласу гордо заявить: «Дайте мне начальные данные частиц всего мира, и я предскажу вам будущее мира».

«С точки зрения классики, — пишет по этому поводу Р. Фейнман, — узнав местоположение и скорость всех частиц в мире (или в сосуде с газом), можно точно предсказать, что будет дальше... Но представьте теперь, что наша точность ограничена и что мы не знаем точно положение только одного из атомов; зная, скажем, его с ошибкой в одну миллиардную. Тогда, если он столкнется с другим атомом, неопределенность в знании его координат после столкновения возрастет. А следующее столкновение еще сильнее увеличит ошибку. Так что если сначала ошибка и была еле заметной, то все равно вскоре она вырастет до огромнейшей неопределенности». Задача Лапласа, таким образом, на практике оказывается неразрешимой.



Определение будущего реальной макроскопической системы механическим методом становится невозможным еще и потому, что никто и никогда не сможет задать начальное состояние того колоссального числа частиц ( $\approx 10^{23}$ ), которые образуют окружающие нас тела, а затем еще и решить столько же уравнений движения. Даже на простую запись этих уравнений (не говоря уже об их решении) потребовалось бы время, во много раз превышающее возраст как нашей Земли, так и всей Вселенной!

Отличительной особенностью теплового движения по сравнению с механическим движением является то, что ему присуще такое фундаментальное свойство, как способность «забывать» о своем прошлом. Поясним сказанное примером. Предположим, что в чистую прозрачную воду падает капля синих чернил. В начальный момент вещество чернил будет сконцентрировано у места падения (рис. 70, а). Однако со временем оно равномерно распределится по всему объему и окрасит всю воду (рис. 70, б). Теперь представьте, что капля чернил упала в чистую воду в другом месте (рис. 70, в). Изменится ли при этом окончательное состояние системы? Нет, оно и в этом случае будет таким же, как прежде (см. рис. 70, б). Отсюда следует, что по конечному состоянию рассматриваемой системы невозможно определить, из какого начального состояния оно возникло. Это и имеют в виду, когда говорят, что система «забывает» о своем прошлом.

Итак, будущее макроскопической системы частиц перестает определяться ее начальными координатами и скоростями. Поэтому механический подход к описанию свойств систем с большим числом частиц становится не только трудоемким, но и непригодным.

На первый взгляд может показаться, что в столь сложных системах из беспорядочно движущихся частиц невозможно найти и следов какой-либо закономерности. Однако это не так. Оказывается, что при очень большом<sup>1</sup> числе частиц появляются совершенно

<sup>1</sup> Большими называют такие числа  $N$ , сравнимые с числом Авогадро, для которых  $\ln N \gg 1$ .

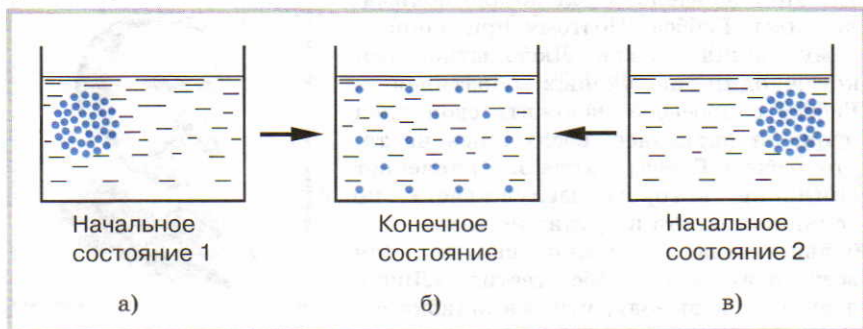


Рис. 70

новые закономерности, которые называют **статистическими**. Их специфичность проявляется в том, что они теряют смысл и перестают выполняться при переходе от макроскопических систем к системам из одной или нескольких частиц. Примерами подобного рода закономерностей являются уже рассмотренные нами распределение Максвелла (см. § 22) и формула Эйнштейна для броуновского движения (см. § 21).

Поскольку основу молекулярно-кинетической теории составляют именно статистические закономерности, то иначе ее называют **статистической механикой** или **статистической физикой**.

### Для дополнительного чтения

Основы статистической физики были заложены во второй половине XIX в. Клаузиусом, Максвеллом и Больцманом. Однако в логически связанную и стройную систему ее превратил американский физик Джозайя Уиллард Гиббс.

Дж. Гиббс родился 11 февраля 1839 г. Окончив в 1863 г. Йельский университет, он через некоторое время переехал в Европу. Здесь он в течение нескольких лет совершенствует свои знания в Парижском, Берлинском и Гейдельбергском университетах. В 1869 г. он возвращается на родину и устраивается работать в свой родной университет в Йеле. Через два года Гиббс становится профессором, и тогда же начинают выходить его первые работы, посвященные теории тепловых явлений.

По своей сжатости изложения и логической строгости работы Гиббса уникальны. По словам одного из биографов Гиббса, «его ум был подобен мощной логической машине, строящей на основании одной-двух аксиом обширные теоретические системы». В то же время используемый Гиббсом *дедуктивный* метод (т. е. такой, при котором изложение теории идет в направлении от общих принципов к частным явлениям) оказался непривычным для многих его современников, работающих в той же области. Это значительно усложняло понимание идей Гиббса. Поэтому признание к нему пришло позже. Любопытно, что, когда один из ученых обратился к Гиббсу с просьбой изложить свои идеи проще и подробнее, сославшись на то, что работа Гиббса «хотя и привлекает внимание, которого заслуживает», но «слишком сжата и трудна не только для большинства, но, можно сказать, для всех читателей», Гиббс ответил: «Лично я пришел к выводу, что вся ошибка состояла в том, что книга вышла чересчур пространной».



Джозайя Уиллард  
Гиббс



Гиббс был скромным человеком и, как это, к сожалению, часто бывает, в своем родном Йеле, где он провел всю свою жизнь, его признали не сразу. Рассказывают, что президент Йельского университета, решив создать новый физический факультет, обратился за помощью к европейским ученым. Те же отослали его к работающему у него в университете Гиббсу, с которым, как оказалось, он не был даже знаком.

Сегодня же имя Гиббса в статистической физике значит столько же, сколько имя Ньютона в механике и Максвелла в электродинамике. По словам «отца кибернетики» Норберта Винера, «Уиллард Гиббс, один из величайших американских ученых, фактически создал новую научную дисциплину, лежащую в промежуточной области между физикой и математикой».

---

## Глава 4. ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

В XIX в., когда существование атомов и молекул ставилось под сомнение, идеи и методы молекулярно-кинетической теории встречали сопротивление со стороны тех физиков, которые отрицательно относились ко всякого рода непроверенным гипотезам и основанным на них теоретическим построениям.

В этих условиях большинство ученых XIX в. предпочитали изучать тепловые явления, не опираясь на какие-либо конкретные представления о строении вещества. Теория, в которой изучаются тепловые свойства макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называется **термодинамикой**.

В термодинамике состояние макроскопических тел описывают такими параметрами, значения которых можно определить с помощью приборов, при этом ничего не надо знать об атомно-молекулярном строении вещества. Подобные параметры называют **термодинамическими** или **макроскопическими** параметрами состояния тел. Таковы, например, давление, объем, температура и некоторые другие величины.

Если термодинамику можно назвать макроскопической теорией, то статистическая физика относится к микроскопическим теориям. В статистической физике учитывается микроскопическое строение вещества и используются параметры состояния отдельных молекул (**микроскопические** параметры).

И термодинамика, и статистическая физика изучают тепловую форму движения материи. Однако статистическая физика позволяет глубже понять и объяснить физическую природу тепловых явлений. В ней устанавливается связь макроскопических параметров тел с микроскопическими характеристиками беспорядочно движущихся молекул и теоретически обосновываются основные законы термоди-

намики, которые в самой термодинамике формулируются как обобщения многочисленных опытных фактов. Раздел статистической физики, посвященный обоснованию термодинамических законов и вычислению макроскопических параметров состояния тел, называют **статистической термодинамикой**.

В основе статистической термодинамики лежит понятие *теплового равновесия*.

**Определение.** **Тепловым равновесием** называют такое состояние макроскопической системы, при котором все ее термодинамические параметры имеют постоянные, не изменяющиеся с течением времени значения.

Один из основных постулатов термодинамики, называемый **общим началом термодинамики**, утверждает, что

любая замкнутая макроскопическая система рано или поздно переходит в состояние теплового равновесия, из которого самопроизвольно выйти уже никогда не сможет.

После наступления теплового равновесия прекращаются все процессы, связанные с изменением термодинамических параметров состояния: не меняются объем и давление, не происходит теплообмен<sup>1</sup>, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей и твердых тел, прекращаются химические реакции, диффузия и т. п. Кроме того, как мы узнаем далее, *отличительной чертой теплового равновесия системы является равенство температур всех ее частей*.

Состояние системы, еще не достигшей теплового равновесия или выведенной из равновесия каким-либо внешним воздействием, называют **неравновесным**. Если система выведена из состояния равновесия и предоставлена самой себе, то согласно общему началу термодинамики через некоторое время она снова перейдет в состояние теплового равновесия. Процесс перехода макросистемы из неравновесного состояния в равновесное называется *релаксацией*, а промежуток времени, требующийся для такого перехода, — *временем релаксации*. Для различных процессов время релаксации может принимать значения от долей секунды (установление равновесного давления в газе) до нескольких лет (выравнивание концентрации в твердых сплавах).

С точки зрения статистической физики суть общего начала термодинамики сводится к тому, что у всякой замкнутой системы из очень большого числа частиц существует такое определенное и единственное макроскопическое состояние, которое чаще всего создается ее непрерывно движущимися частицами; это ее наиболее

---

<sup>1</sup> Излучение и поглощение электромагнитных волн оказываются уравновешенными.



вероятное состояние, и потому именно в него она переходит с течением времени.

Возникновение статистической термодинамики подвело итог длительному спору о природе тепла: гипотеза о существовании «теплорода» (особой жидкости, являющейся носителем теплоты) потерпела полное поражение, уступив место представлению о теплоте как результате беспорядочного движения частиц вещества. Изложению дополнительных сведений из термодинамики, а также молекулярно-кинетическому обоснованию ее основ и посвящена данная глава. При этом мы будем считать, что движение каждой частицы вещества имеет нерелятивистский характер и подчиняется законам классической механики Ньютона.

## § 24. ФАЗОВОЕ ПРОСТРАНСТВО

Ознакомившись с работой Гиббса «Основные принципы статистической механики», вышедшей в 1902 г. (за год до смерти автора), Людвиг Больцман публично заявил, что Гиббс является «одним из величайших американских ученых, быть может, самым великим в области абстрактного мышления и теоретического исследования».

В основе статистической механики лежит представление о молекулярном хаосе: предполагается, что частицы вещества в состоянии теплового равновесия распределяются по всему его объему с равномерной плотностью и число частиц, движущихся в любой момент времени по каждому направлению в нем, одинаково.

Излагая статистическую механику, Гиббс опирался на очень важное в своей теории понятие фазового пространства. Так называют воображаемое математическое пространство, число измерений которого равно количеству переменных, определяющих состояние данной системы. Например, состояние системы, состоящей из одной частицы, определяется шестью переменными: тремя координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и тремя проекциями импульса  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$ <sup>1</sup>. Каждой из этих переменных в фазовом пространстве соответствует своя координатная ось. Число этих осей, таким образом, совпадает с размерностью фазового пространства, которая в данном случае равна 6.

Если система состоит из  $N$  частиц, то ее состояние будет определяться  $6N$  переменными. Такую же размерность будет иметь и фазовое пространство этой системы. В таком  $6N$ -мерном пространстве каждому состоянию системы будет соответствовать одна определенная точка.

Подчеркнем, что в данном случае речь идет о *микросостоянии* системы, т. е. таком состоянии, которое определяется заданием параметров состояния микрочастиц вещества. Наряду с микросостоянием любая термодинамическая система характеризуется своим *ма-*

<sup>1</sup> Раньше мы определяли состояние с помощью координат и скоростей. В середине XIX в. ирландский физик У. Гамильтон показал, что вместо скоростей можно использовать импульсы.

кросостоянием, определяемым небольшим числом таких макроскопических параметров, как давление, температура и др.

Из-за непрерывного движения и столкновения частиц микросостояние системы все время меняется. Предположим, что мы фиксируем микросостояния через малые промежутки времени  $\Delta t$ , отмечая каждый раз соответствующую точку в фазовом пространстве данной системы. Тогда по истечении большого промежутка времени в этом пространстве появится «облако» точек, занимающее некоторый объем. Этот объем называют **фазовым** и в отличие от обычного объема  $V$  тела обозначают греческой буквой  $\Gamma$  (гамма).

Можно доказать, что фазовый объем системы из  $N$  частиц, суммарная кинетическая энергия которых близка к какому-либо значению  $E$ , определяется выражением

$$\Gamma = CV^N E^{3N/2},$$

где  $C$  — некоторый коэффициент пропорциональности;  $V$  — объем, занимаемый системой.

Рассмотрим простой пример. Пусть система состоит только из одной частицы, движущейся внутри какого-либо сосуда объемом  $V$ . Данной системе будет соответствовать шестимерное фазовое пространство с координатами  $x, y, z, p_x, p_y, p_z$ . Если выделить в таком пространстве малый кубик со сторонами  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ , то его объем, называемый *элементом* фазового объема, будет равен произведению всех его сторон ( $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z$ ). Полученное выражение можно рассматривать как произведение двух сомножителей, один из которых равен  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , а другой равен  $\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z$ . Такое рассмотрение эквивалентно разбиению фазового пространства на два подпространства: *пространство координат* с элементом объема  $\Delta x \Delta y \Delta z$  и *пространство импульсов* с элементом объема  $\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z$  (рис. 71). Это разбиение остается в силе и в том случае, если система состоит не из одной, а из многих частиц. Фазовый объем любой системы равен произведению ее объема в пространстве координат на ее объем в пространстве импульсов:

$$\Gamma = \Gamma_{\text{коорд}} \Gamma_{\text{имп}}. \quad (24.1)$$

Если система состоит из одной частицы, то элемент объема в пространстве координат равен  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , а полный объем, получающийся в результате суммирования всех элементов объема, будет, очевидно, равен объему  $V$  сосуда, в котором находится система. Если система состоит из двух частиц, то элемент объема в пространстве координат станет равным  $\Delta x_1 \Delta y_1 \Delta z_1 \Delta x_2 \Delta y_2 \Delta z_2$ , что после суммирования даст уже  $V^2$ . Нетрудно сделать вывод, что для системы, состоящей из  $N$  частиц,

$$\Gamma_{\text{коорд}} = V^N. \quad (24.2)$$

Теперь рассмотрим объем системы в пространстве импульсов. Если система состоит только из одной частицы, кинетическая энергия



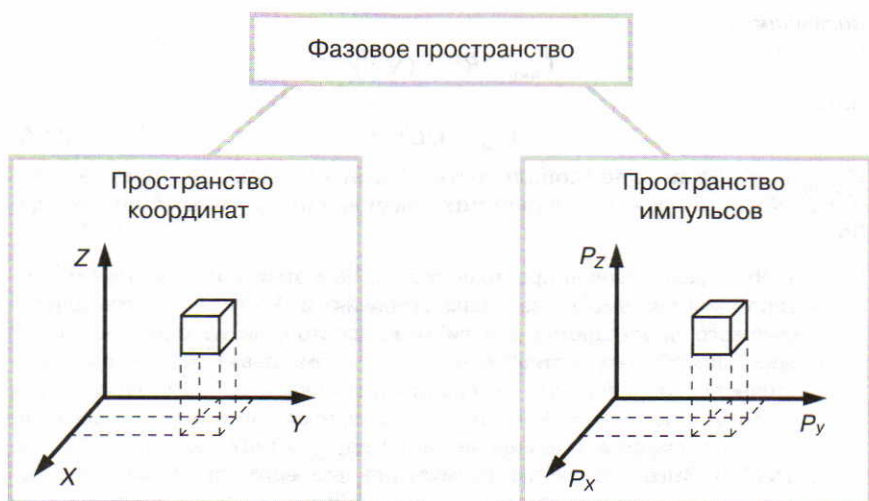


Рис. 71

которой может изменяться в пределах лишь бесконечно малого интервала значений от  $E_k$  до  $(E_k + \Delta E_k)$ , то этому будет соответствовать изменение импульса от  $p = \sqrt{2m_0 E_k}$  до  $(p + \Delta p)$ , и искомый объем в пространстве импульсов окажется равным объему шарового слоя, изображенного на рисунке 72. Радиус  $R$  сферы, на которую опирается этот слой, будет равен импульсу  $p = \sqrt{2m_0 E_k}$ , т. е.  $R \sim \sqrt{E_k}$ , где  $E_k$  — кинетическая энергия частицы.

Если система состоит из  $N$  частиц, общая кинетическая энергия которых близка к некоторому значению  $E$ , то в пространстве импульсов ей будет соответствовать многомерный шаровой слой, радиус которого будет по-прежнему пропорционален квадратному корню из энергии, только теперь общей энергии всей системы:  $R \sim \sqrt{E}$ .

Чтобы найти объем шарового слоя, нужно его толщину умножить на площадь сферы, на которую он опирается. С формулой площади многомерной сферы не знакомы в школе, она нам и не понадобится. Достаточно знать, что эта площадь всегда пропорциональна радиусу сферы в степени, на единицу меньшей размерности  $n$  пространства, в котором она находится, т. е.  $(n - 1)$ . Для системы из  $N$  частиц размерность импульсного пространства равна  $3N$ . Поэтому  $n - 1 = 3N - 1$ . Не учитывая здесь единицу (так как у всех макроскопических тел  $N \gg 1$ ), окончательно

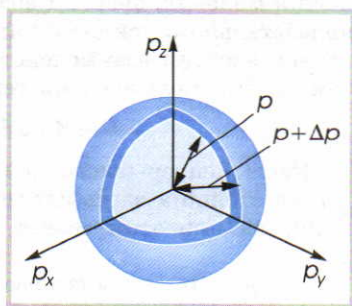


Рис. 72

получаем

$$\Gamma_{\text{имп}} \sim R^{3N} \sim (\sqrt{E})^{3N},$$

или

$$\Gamma_{\text{имп}} = CE^{3N/2}. \quad (24.3)$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  в этом выражении мы не выписываем, так как в дальнейших рассуждениях он нам не понадобится.

?

1. Что такое фазовое пространство? 2. Чем отличается задание микросостояния системы от ее макросостояния? 3. Чему равна размерность фазового пространства для системы, состоящей из одной частицы? двух частиц? трех частиц?  $N$  частиц? 4. Чему равна размерность пространства координат для системы из одной частицы? двух частиц? трех частиц?  $N$  частиц? 5. Чему равна размерность импульсного пространства для системы из одной частицы? двух частиц? трех частиц?  $N$  частиц? 6. Выведите точную формулу для фазового объема системы, состоящей из одной частицы, движущейся в сосуде объемом  $V$  и обладающей импульсом, принадлежащим малому интервалу  $\Delta p$ . 7. Докажите, что импульс частицы связан с ее кинетической энергией формулой  $p = \sqrt{2m_0 E_k}$ . 8. Что означает понятие молекулярного хаоса? 9. Что такое тепловое равновесие? 10. В чем заключается общее начало термодинамики?

## § 25. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Важнейшей характеристикой любого макроскопического тела, находящегося в состоянии теплового равновесия, является его внутренняя энергия. Будем рассматривать тело в системе отсчета, где оно покоится. Тогда справедливо следующее

**Определение.** Внутренней энергией тела  $U$  называется энергия движения и взаимодействия его частиц.

Если тело состоит из  $N$  молекул, то их полная энергия  $E$  в общем случае складывается из кинетических энергий поступательного движения молекул, энергий вращательного движения молекул, энергий колебательного движения атомов внутри молекул, а также потенциальной энергии взаимодействия молекул между собой<sup>1</sup>. Таким образом, внутренняя энергия тела может быть представлена в виде

$$U = E = \Sigma E_k + \Sigma E_{\text{вращ}} + \Sigma E_{\text{кол}} + E_p. \quad (25.1)$$

Из-за непрерывного движения и взаимодействия молекул каждое из стоящих здесь слагаемых с течением времени меняется. Изменяться при этом может и полная энергия  $E$ . Сложность учета

<sup>1</sup> Вообще говоря, в полную энергию тела входит еще и суммарная энергия покоя его частиц. Однако во внутреннюю энергию тела энергию покоя составляющих его частиц обычно не включают.



всех этих изменений очевидна. Поэтому задача об определении внутренней энергии системы может показаться неразрешимой. Однако это не так.

Пусть имеется равновесная система, находящаяся при неизменных внешних условиях. Зададим вопрос: какова вероятность  $w$  того, что данная система находится в таком состоянии, в котором энергия ее частиц имеет величину, близкую к тому или иному конкретному значению  $E$ ? Ответ на этот вопрос дал Дж. Гиббс.

На рисунке 73 изображен график так называемого **распределения Гиббса**, дающего зависимость  $w$  от  $E$ . Из этого графика видно, что при некоторой энергии  $E_n$  распределение Гиббса имеет очень острый максимум. Для макроскопических систем он является столь резким, что изобразить его графически (без искажения масштабов) просто невозможно.

Значение  $E_n$ , которому соответствует максимум распределения Гиббса, называют *наивероятнейшей энергией* системы. Из графика видно, что вероятность нахождения системы в состояниях с энергией, заметно отличающейся от  $E_n$ , ничтожно мала, и потому такие состояния практически не реализуются.

Ничтожно малая ширина пика у распределения Гиббса приводит к тому, что наивероятнейшее значение энергии почти не отличается от ее среднего значения  $\bar{E}$ . Поэтому окончательный вывод, который можно сформулировать на основе анализа распределения Гиббса, состоит в следующем: *в состоянии теплового равновесия частицы тела движутся всегда так, что их полная энергия все время оказывается практически равной своему среднему значению:  $E = \bar{E}$* . Поэтому, определив это среднее значение, мы тем самым найдем и внутреннюю энергию тела.

Рассмотрим пример. Пусть имеется газ, находящийся в атомарном состоянии (такой газ называют *одноатомным*, имея в виду, что он состоит из одноатомных молекул). Частицы этого газа не совершают вращательных и колебательных движений. Поэтому внутренняя энергия такого газа будет определяться выражением

$$U = \bar{E} = \sum \bar{E}_k + \bar{E}_p. \quad (25.2)$$

Если газ состоит из  $N$  частиц, то их суммарную кинетическую энергию можно представить в виде произведения  $N\bar{E}_k$ , где  $\bar{E}_k$  — средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну частицу. С учетом этого формулу (25.2) можно переписать несколько иначе:

$$U = N\bar{E}_k + \bar{E}_p. \quad (25.3)$$

Наконец, совсем простая формула получается в том случае, когда рассматриваемый газ можно считать *идеальным*. В этом случае по-

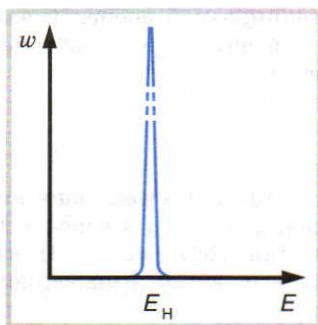


Рис. 73

тенциальной энергией взаимодействия частиц можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией, и формула (25.3) принимает вид

$$U = N\bar{E}_k. \quad (25.4)$$

Так как суммарная кинетическая энергия частиц идеального одноатомного газа совпадает с его внутренней энергией  $U$ , то на основании формулы (24.3) его объем в импульсном пространстве будет определяться выражением

$$\Gamma_{\text{имп}} = CU^{3N/2}. \quad (25.5)$$

*В термодинамике внутренняя энергия тела рассматривается как функция макроскопических параметров его состояния. Например, внутренняя энергия однородных газов и жидкостей определяется их температурой и объемом. Соответствующая формула (для идеального одноатомного газа) будет получена в следующей главе.*

Понятие внутренней энергии было введено в 1850 г. Рудольфом Клаузиусом, хотя свое название эта величина получила позже. Сначала разные ученые называли ее «функция действия», «энергия тела», потом «внутренняя теплота тела», пока, наконец, шотландский ученый Уильям Ранкин не предложил для нее название «внутренняя энергия», которое и утвердилось в науке.

- ? 1. Что называют внутренней энергией тела? 2. Из чего складывается полная энергия молекул газа? 3. Нарисуйте график и расскажите об особенностях распределения Гиббса. 4. Чему равна внутренняя энергия одноатомного газа? 5. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа? 6. Когда и кем было введено понятие внутренней энергии? 7. Почему эту энергию называют внутренней? Какие виды энергии всего тела как целого в ней не учитываются?

## § 26. СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ

Внутренняя энергия системы является функцией ее состояния. При изменениях этого состояния меняется и внутренняя энергия системы. Различают два способа изменения внутренней энергии.

**1. Совершение работы.** Так называют процесс изменения внутренней энергии системы, связанный с перемещением ее макроскопических частей относительно друг друга. Например, ударяя по куску свинца молотком, сгибая и разгибая проволоку, перемещая один предмет по поверхности другого или резко сжимая находящийся под поршнем в цилиндре газ, мы каждый раз совершаем над системой работу и тем самым изменяем ее внутреннюю энергию. Одним из первых, кто обратил на это серьезное внимание, был Бен-



жамен Томпсон, двойной агент эпохи революции в США, который сначала бежал в Англию, а позднее стал военным министром в Баварии, где за свои заслуги получил титул графа Румфорда Священной Римской империи. В конце XVIII в. Румфорд провел классические эксперименты, демонстрирующие нагревание тел при трении. Эти эксперименты привели к отрицанию теории теплорода. В одном из опытов внутрь пушечного ствола вводилось тупое сверло, которое с помощью конного привода заставляли вращаться с частотой 32 об/мин. За короткое время температура внутри ствола поднималась до  $70^{\circ}\text{C}$ . В другом опыте металлический цилиндр массой около 50 кг помещался в ящик с водой. Сверля этот цилиндр тупым сверлом, Румфорд через два с половиной часа довел воду в ящике до кипения. «Изумление окружающих, — вспоминал ученый позже, — увидевших, что такая масса воды закипает без огня, было неопределимым».

Характеристикой изменения внутренней энергии в процессе совершения работы является физическая величина, которая так же, как и процесс изменения внутренней энергии, называется **работой** и обозначается буквой  $A$ . Для установления связи работы с параметрами состояния тела рассмотрим простой пример.

Пусть в цилиндрическом сосуде с подвижным поршнем находится газ, начальное состояние которого характеризуется макроскопическими параметрами  $p$  (давление) и  $V_1$  (объем). Допустим, что в результате небольшого (такого, что давление газа практически не изменилось) перемещения поршня ( $l_1 - l_2$ ) объем газа уменьшился и стал равным  $V_2$  (рис. 74). Тогда внешняя сила, сжимающая газ и равная  $F = p_{\text{внеш}} S$  (где  $S$  — площадь сечения поршня;  $p_{\text{внеш}}$  — внешнее давление на поршень), совершит работу

$$A_{\text{внеш}} = F(l_1 - l_2) = p_{\text{внеш}} S(l_1 - l_2) = p_{\text{внеш}} (V_1 - V_2) = -p_{\text{внеш}} \Delta V.$$

Полученная формула

$$A_{\text{внеш}} = -p_{\text{внеш}} \Delta V \quad (26.1)$$

справедлива не только для газа, но и для любого другого тела, объем которого изменяется при постоянном всестороннем внешнем давлении.

*Работу внешних сил* [см. формулу (26.1)] следует отличать от *работы А самого газа*. В общем случае, когда возникает ускоренное движение поршня и относительное перемещение различных частей газа, никакого простого выражения для работы газа написать невозможно. Но если объем газа изменяется настолько медленно, что давление внутри его во всех точках в каждый момент времени можно считать установившимся и равным

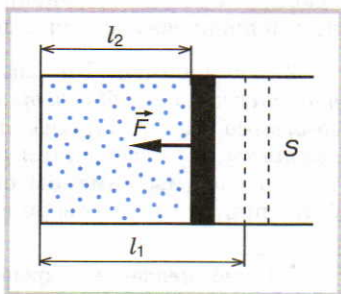


Рис. 74

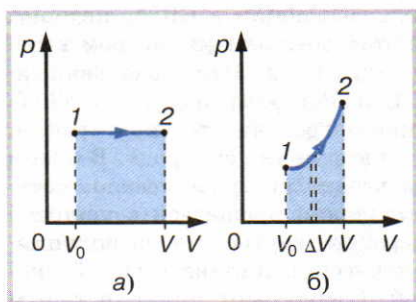


Рис. 75

внешнему давлению на поршень<sup>1</sup>, то с точностью до знака обе работы оказываются одинаковыми. Отличие в знаке обусловлено тем, что сила давления газа направлена в сторону, противоположную направлению действия внешней силы. Итак,

$$A = -A_{\text{внеш}} = p\Delta V. \quad (26.2)$$

Из формулы (26.2) видно, что работа газа положительна при его расширении (когда  $\Delta V > 0$ ) и отрицательна при его сжатии (когда  $\Delta V < 0$ ).

Если  $p \neq \text{const}$ , то для расчета работы газа применяют следующий метод: строят график зависимости давления газа от его объема и находят площадь фигуры под этим графиком (рис. 75). Эта площадь с точностью до знака будет численно равна искомой работе.

Такой способ определения работы газа имеет следующее объяснение. На графике зависимости давления от объема  $p(V)$  работа для процесса при постоянном давлении (рис. 75, а) численно равна площади фигуры, ограниченной графиком, осью  $V$  и перпендикулярами, восстановленными из точек, соответствующих начальному  $V_0$  и конечному  $V$  объемам газа:  $1-2-V-V_0$ . Если давление газа изменяется так, как показано на рисунке 75, б, то площадь фигуры  $1-2-V-V_0$  можно мысленно представить состоящей из множества узких полосок (почти трапеций) с основаниями  $\Delta V$ .

Если представить эти полоски столь узкими, то изменение давления при изменении объема на  $\Delta V$  можно не учитывать. Тогда работу для каждого процесса, соответствующего изменению объема на  $\Delta V$ , можно найти по площади узкой полоски, а работу, характеризующую процесс изменения объема от  $V_0$  до  $V$ , можно определить по площади всей фигуры под графиком давления.

**2. Теплообмен.** Так называют процесс переноса части внутренней энергии от одного тела к другому (или между частями одного и того же тела), обусловленный различием их температур и не связанный с совершением работы. Например, нагревая газ в закрытом сосуде, мы изменим его внутреннюю энергию, но никакой работы при этом не совершим. Напомним, что существуют три вида

<sup>1</sup> Такие (медленные) процессы называют *квазистатическими*. Их можно рассматривать как последовательность сменяющих друг друга состояний равновесия.



теплообмена: теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен (излучение).

**Определение.** Часть внутренней энергии, переданная от одного тела к другому при теплообмене, называется **количеством теплоты**  $Q$ .

Количество теплоты, полученное телом, принято считать положительным, а отданное — отрицательным. Формулы для расчета количества теплоты, полученного или отданного телом при различных процессах, приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Процесс         | Количество теплоты  | Внутренняя энергия |
|-----------------|---|--------------------|
| Нагревание тела | $Q = cm(t_2 - t_1)$ ,<br>где $c$ — удельная теплоемкость тела   | Увеличивается      |
| Охлаждение тела | $Q = cm(t_2 - t_1)$   | Уменьшается        |
| Парообразование | $Q = rm$ ,<br>где $r$ — удельная теплота парообразования        | Увеличивается      |
| Конденсация     | $Q = -rm$   | Уменьшается        |
| Плавление       | $Q = \lambda m$ ,<br>где $\lambda$ — удельная теплота плавления | Увеличивается      |
| Кристаллизация  | $Q = -\lambda m$  | Уменьшается        |

Формулы (26.1) и (26.2) выражают *макроскопическую* работу. С точки зрения молекулярно-кинетической теории теплообмен — это тоже работа, только работа *микроскопическая*; она совершается молекулярными силами при столкновении частиц вещества друг с другом.

В отличие от внутренней энергии, которая является *функцией состояния* тела, количество теплоты такой функцией не является. Количество теплоты зависит не только от параметров состояния тела, но и от того, каким образом это тело перешло из одного состояния в другое. Поэтому принято говорить, что *количество теплоты — это функция процесса*. При разных процессах, связывающих два состояния тела, переданное количество теплоты также будет различным. В каждом состоянии тело будет обладать определенной внутренней энергией, чего нельзя сказать о количестве теплоты. Выражение «тело обладает некоторым количеством теплоты» или «в

теле содержится (запасено) какое-то количество теплоты» не имеет смысла. Количество теплоты можно получить или отдать в каком-либо процессе, но обладать им нельзя!

Работа (физическая величина) тоже является функцией процесса изменения состояния макроскопической системы. Так же как и количеством теплоты, тело не может «обладать работой, содержать работу».

Количество теплоты не следует путать с понятием тепловой энергии и тем более с температурой: тепловая энергия — это просто устаревший синоним внутренней энергии.

До 40-х гг. XIX в. количество теплоты рассматривалось как особая величина, никак не связанная ни с энергией, ни с работой, и потому измерялось в специальных единицах — калориях. *Калория* (от лат. calor — тепло, жар) — исторически первая единица количества теплоты, введенная в XVIII в. шведским физиком И. Вильке и равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 г воды на  $1^\circ$ . Благодаря экспериментальным исследованиям, проведенным немецким врачом Юлиусом Робертом Майером в 1841—1845 гг. и английским промышленником и ученым-физиком Джеймсом Джоулем в 1843 г., было установлено, что количество теплоты, как и работа, является характеристикой изменения внутренней энергии. Поэтому все три величины можно измерять в одних и тех же единицах. В СИ это *джоуль*. Экспериментально было доказано, что  $1 \text{ кал} \approx 4,2 \text{ Дж}$ .



1. Перечислите способы изменения внутренней энергии.
2. Как находится работа газа и работа внешних сил над газом при постоянном давлении?
3. Как находится работа газа при изменяющемся давлении?
4. Докажите, что работа газа в круговом процессе  $1-2-3-4-1$ , изображенном на рисунке 76, численно равна площади фигуры, ограниченной графиком. Какая она по знаку?

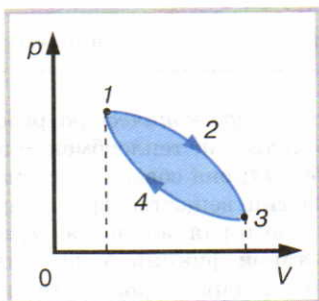


Рис. 76

5. Что такое количество теплоты? В каких единицах оно выражается?
6. По какой формуле находится количество теплоты в случае нагревания вещества? охлаждения? парообразования? конденсации? плавления? кристаллизации?
7. В каких единицах выражается удельная теплоемкость вещества? удельная теплота парообразования? удельная теплота плавления?
8. Чему равна удельная теплоемкость воды?



## § 27. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

В основе термодинамики лежат три закона. Первый закон термодинамики гласит:

Изменение внутренней энергии системы при ее переходе из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе.

Математически первый закон термодинамики выражается уравнением

$$\Delta U = Q + A_{\text{внеш.}} \quad (27.1)$$

Это уравнение впервые было получено Клаузиусом (1854), которого по праву можно считать основателем термодинамики как науки.

Если *работу внешних сил* в уравнении (27.1) заменить на взятую с противоположным знаком *работу самой системы* (например, газа), то первый закон термодинамики можно переписать в следующем виде:

$$Q = \Delta U + A. \quad (27.2)$$

Отсюда видно, что *количество теплоты, полученное системой, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил.*

Из первого закона термодинамики можно получить ряд важных следствий.

1. *В отсутствие теплообмена изменение внутренней энергии системы равно работе внешних сил.*

Действительно, подставляя в уравнение (27.1) значение  $Q=0$ , получаем

$$(\Delta U)_{Q=0} = A_{\text{внеш.}} \quad (27.3)$$

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называют **адиабатным** процессом<sup>1</sup>. На рисунке 77 изображен график этого процесса, называемый *адиабатой*.

Равенство (27.3) позволяет выразить давление через внутреннюю энергию. В самом деле, работа в формуле (27.3) определяется выражением (26.2).

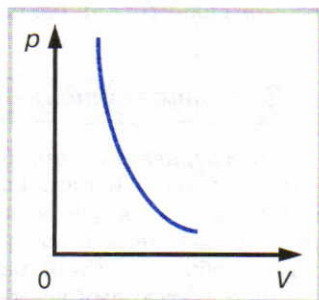


Рис. 77

<sup>1</sup> Для осуществления такого процесса систему помещают в сосуд с теплонепроводящими (или теплоизолирующими) стенками — сосуд Дьюара, или термос.

С учетом этого получаем

$$p = - \left( \frac{\Delta U}{\Delta V} \right)_{Q=0}.$$

При малом  $\Delta V$  (формально при  $\Delta V \rightarrow 0$ ) стоящее здесь отношение можно рассматривать как производную внутренней энергии по объему. Поэтому окончательно мы можем записать:

$$p = - (U)_{Q=0}. \quad (27.4)$$

Это выражение потребуется нам в дальнейшем.

2. При неизменном объеме тела изменение его внутренней энергии равно переданному количеству теплоты:

$$(\Delta U)_{V=\text{const}} = Q. \quad (27.5)$$

Чтобы доказать это утверждение, нужно учесть, что если объем не меняется ( $\Delta V=0$ ), то работа  $A=0$ . Подставив это значение в уравнение (27.2), получим уравнение (27.5).

3. При любых процессах, происходящих в изолированной системе, ее внутренняя энергия остается неизменной, т. е. сохраняется.

Действительно, так как система изолирована, то она не может взаимодействовать ни с какими внешними материальными объектами. Это означает, что окружающие систему тела не способны ни совершить работу над ней ( $A_{\text{внеш}}=0$ ), ни передать ей какое-либо количество теплоты ( $Q=0$ ). Подставляя эти значения в уравнение (27.1), получаем  $\Delta U=0$ , откуда  $U=\text{const}$ , что и требовалось доказать.

Доказанное следствие есть частный случай всеобщего закона сохранения энергии. Важную роль в установлении этого закона сыграли предшествовавшие открытию первого закона термодинамики исследования Майера, Джоуля и Гельмгольца. Все эти ученые шли разными путями, но пришли к одному и тому же выводу — выводу о сохранении полной энергии, несмотря на ее переходы из одной формы в другую. Сегодня этот закон признается одним из самых фундаментальных законов природы, а в то время (40-е гг. XIX в.) он у большинства ученых вызывал явное неприятие. Так, например, доклады Джоуля на съездах ученых просто игнорировались, а работа Гельмгольца была сочтена за «фантастическое умствование».

### Для дополнительного чтения

Но труднее всех пришлось Майеру. Его работы отказывались печатать и высмеивали. Статью Майера 1841 г., в которой впервые формулировался закон сохранения и превращения энергии и которую он направил в авторитетный научный журнал «Анналы физики», вообще не стали печатать, не удостоив автора даже ответом. Вторую статью ему все-таки удалось опубликовать, но лишь в журнале «Анналы химии и фармацевтики», который физиками не читался. Поэтому вскоре, когда появились результаты исследований



Джоуля, а затем и Гельмгольца, начались споры о приоритете. Первенство Майера никто не признавал, а его сочинения стали высмеивать в газете, намекая, что их автор вообще не физик, он никто, просто какой-то лекарь. Написанное ученым опровержение газета опубликовать отказалась. Родные стали смотреть на продолжающего отстаивать свои взгляды Майера как на маньяка. Все это не могло пройти бесследно. В 1850 г., в обстановке травли и одиночества, Майер решил покончить с собой и выбросился из окна. Он остался жив, но, пролежав несколько месяцев в больнице, вышел оттуда хромым. И снова вступил в борьбу со своими противниками! В 1851 г. выходит его работа, про которую Оствальд позже скажет: «Это защитительное сочинение было написано кровью Майера, исчерпав последние его силы». И действительно, вскоре ученый заболевает. Родные объявляют, что у него воспаление мозга, и помещают его сначала в частный сумасшедший дом, а затем в казенную психиатрическую лечебницу, где его систематически подвергают жестоким мучениям. В 1853 г. Майера выписывают, но через некоторое время начинают распространяться слухи, что он умер в сумасшедшем доме. И хотя Майер с 1862 г. возобновляет свою научную деятельность, информация о его «смерти» попадает даже в авторитетный «Биографический словарь» Поггендорфа, поведавший всем, что Майер скончался в 1858 г.

Последняя работа Майера вышла в 1876 г. Через два года Юлиус Роберт Майер умер.

---

4. *Вечный двигатель невозможен.* Это, пожалуй, самое знаменитое следствие первого закона термодинамики. Чтобы доказать его, нужно сначала определить, что следует понимать под вечным двигателем.

**Вечным двигателем** называется воображаемая, периодически действующая машина, которая может неограниченно долго совершать работу, не получая энергии извне. Из первого закона термодинамики в формуле (27.2) следует, что вечный двигатель может совершать работу лишь за счет уменьшения своей внутренней энергии:

$$A_{в.д} = -\Delta U = U_1 - U_2.$$

Но, вследствие периодичности действия двигателя, в каждом цикле его работы начальное и конечное состояния рабочего тела двигателя совпадают, поэтому  $U_1 = U_2$ , и, значит,  $A_{в.д} = 0$ . Равенство этой работы нулю и означает, что работающий вечный двигатель невозможен.

До открытия первого закона термодинамики идея создания вечного двигателя занимала умы многих людей, начиная от фантазеров-самоучек и кончая некоторыми известными учеными. Однако бесплодные попытки построить такой двигатель, которые предпринимались с XIII в., привели ученых к убеждению в его невозможности, и с 1775 г. Парижская академия наук официально отказа-

лась рассматривать соответствующие проекты. Любопытно, что еще за полвека до этого известный французский философ и просветитель Шарль Монтескье в своих «Персидских письмах» заметил: «Я повсюду встречаю людей, которые постоянно говорят о себе... Несколько дней назад один такой человек терзал нас разговорами в течение двух часов... но, поскольку в этом мире вечного движения не существует, он наконец замолчал».

- ? 1. Сформулируйте первый закон термодинамики. 2. Какой процесс называют адиабатным? 3. Как будет изменяться внутренняя энергия газа (увеличиваться или уменьшаться) при его адиабатном сжатии? расширении? 4. Докажите, что в изолированной системе, состоящей из двух тел, всякое увеличение внутренней энергии одного тела всегда равно уменьшению внутренней энергии другого тела ( $\Delta U_1 = -\Delta U_2$ ). 5. Докажите, что в изолированной системе, состоящей из двух тел, не совершающих никакой работы друг над другом, выполняется уравнение теплового баланса:  $Q_{\text{пол}} = |Q_{\text{отд}}|$ , где  $Q_{\text{отд}}$  — количество теплоты, отданное одним телом, а  $Q_{\text{пол}}$  — количество теплоты, полученное другим телом. 6. Докажите, что вечный двигатель невозможен.

## § 28. ЭНТРОПИЯ

«Величайшее счастье заключается в том, чтобы сделать добро другому человеку так, чтобы он не имел никакой возможности отплатить тем же».

Трудно поверить, что столь бескорыстное понимание счастья принадлежит человеку, который, казалось бы, как никто другой, нуждался в ответном внимании, доброжелательном отношении и понимании со стороны окружающих людей. Тем не менее это так. Имя этого человека — Людвиг Больцман.

Через 27 лет после того, как Больцман покончил с собой, община города Вены взяла под свое попечительство его могилу на Центральном венском кладбище. На могиле установили красивый бюст из белого мрамора и на надгробном постаменте выгравировали формулу

$$S = k \ln W.$$

Эта формула — мост, соединяющий мир доступных нашему восприятию явлений с миром невидимых атомов. Мост, открывший человеку дорогу к микроскопическому пониманию тайн макромира. Как было сказано во время открытия монумента, «...даже тогда, когда все памятники будут погребены под мусором тысячелетий, короткая и простая формула Больцмана сохранит свою силу и величие».

В чем же смысл этой формулы? Что скрывается за стоящими в ней символами? Используя современные обозначения, ее можно переписать в следующем виде:

$$S = k \ln \Gamma, \quad (28.1)$$



где символ  $\ln$  означает натуральный логарифм<sup>1</sup>;  $k$  — коэффициент пропорциональности, называемый **постоянной Больцмана**;  $\Gamma$  — фазовый объем, а  $S$  — величина, называемая **энтропией** системы.

**Энтропия** системы представляет собой физическую величину, пропорциональную логарифму объема той области фазового пространства, в которой данная система проводит свое время. Так определяется энтропия в той части статистической физики, в которой изучаются системы, состоящие из частиц, движущихся по законам классической механики Ньютона.

Чтобы выяснить физический смысл энтропии, введем понятие *числа микросостояний*, занимающих данный фазовый объем. Для этого разобьем все фазовое пространство на очень маленькие ячейки и, вместо того чтобы определять каждое микросостояние системы одной точкой фазового пространства, будем определять его указанием той ячейки, в которой находится соответствующая точка. Поскольку нахождения системы в разных точках одной и той же ячейки будут считаться с точки зрения ее микросостояния совершенно эквивалентными, то задание микросостояния системы хотя и будет достаточно приближенным, но зато позволит определить число микросостояний (т. е. число ячеек) в заданном фазовом объеме. Если объем одной ячейки равен  $\Gamma_0$ , то их число в объеме  $\Gamma$  будет, очевидно, равно:

$$W = \Gamma / \Gamma_0. \quad (28.2)$$

Согласно формулам (24.2) и (25.5) фазовый объем системы определяется ее макроскопическими параметрами. Это означает, что каждому макросостоянию системы соответствует определенный объем в фазовом пространстве. Поэтому можно сказать, что величина  $W$  выражает число микросостояний, соответствующих данному макросостоянию, или, несколько иначе, число микроскопических способов, которыми может быть осуществлено данное макросостояние системы. В молекулярной физике эту величину называют **термодинамической вероятностью** рассматриваемого макросостояния.

Для лучшего понимания этого утверждения рассмотрим простую аналогию. Предположим, что у нас имеются две обычные игральные кости, на каждой из которых изображены цифры от 1 до



Людвиг Больцман

<sup>1</sup> *Натуральным логарифмом* числа  $x$  (т. е.  $\ln x$ ) называется показатель степени, в которую нужно возвести число  $e = 2,71828\dots$ , чтобы получить  $x$ . Логарифмическая функция обладает следующими свойствами:  $\ln x^n = n \ln x$ ,  $\ln(x_1 \cdot x_2) = \ln x_1 + \ln x_2$ ,  $(\ln x)' = 1/x$ .

6. Если одновременно бросать обе кости, то в разных случаях будут выпадать различные суммарные числа (от 2 до 12). Какое же из этих чисел можно ожидать с большей вероятностью? Очевидно, то, которому соответствует наибольшее количество комбинаций. Именно оно и будет чаще всего выпадать. В данном случае это число 7, которое можно получить из комбинаций 1+6, 2+5, 3+4, 4+3, 5+2, 6+1. Число этих комбинаций и есть «термодинамическая» вероятность «макросостояния», выражаемого суммарным числом 7. Другим числам соответствует меньшая вероятность, и потому они будут выпадать реже.

Состояния, осуществляемые малым числом способов, называют *упорядоченными*, а состояния, осуществляемые большим числом разных способов, — *беспорядочными*. Поскольку с увеличением числа  $W$  растет и  $\Gamma$ , а вместе с ним и  $S$ , то можно сказать, что *энтропия является мерой беспорядка в системе*. В этом и заключается ее физический смысл.

В качестве примера найдем энтропию идеального одноатомного газа. Пусть этот газ находится в сосуде объемом  $V$  и обладает внутренней энергией  $U$ . Этому состоянию будет соответствовать фазовый объем

$$\Gamma = CV^N U^{3N/2}. \quad (28.3)$$

Это выражение получается при подстановке формул (24.2) и (25.5) в формулу (24.1). По формуле Больцмана (28.1) находим:  $S = k \ln(CV^N U^{3N/2})$ , или окончательно

$$S = S_0 + kN \ln V + \frac{3}{2} Nk \ln U, \quad (28.4)$$

где  $S_0 = k \ln C$  — некоторая постоянная. Последняя не играет никакой роли в тепловых процессах и может быть отброшена.

В данном случае мы сталкиваемся с той ситуацией, которая аналогична при введении понятия потенциальной энергии. Энтропия, как и потенциальная энергия, определяется лишь с точностью до произвольной постоянной. Поэтому реальный смысл имеет не столько сама энтропия, сколько ее приращение в том или ином процессе. Поскольку, как это видно, например, из формулы (28.4), *энтропия системы является функцией ее состояния*, то такое приращение будет определяться лишь параметрами состояния системы в начале и конце процесса.

Можно определять энтропию не через фазовый объем, а через термодинамическую вероятность:

$$S = k \ln W, \quad (28.5)$$

поскольку  $W$  и  $\Gamma$  пропорциональны друг другу. Замена под знаком логарифма в формуле (28.1) одной из этих величин другой приводит лишь к изменению  $S$  на некоторую постоянную, которая, как мы знаем, не имеет значения.



История введения и осмысления понятия энтропии насчитывает полтора века. Впервые величина с таким названием появилась в 1865 г. в одной из работ Рудольфа Клаузиуса. В то время она рассматривалась как чисто термодинамическая величина, связанная с количеством теплоты и температурой, и о ее связи с термодинамической вероятностью никто не подозревал. Лишь приблизительно через 10 лет Больцман ввел понятие о вероятности состояния и пришел к выводу о ее связи с энтропией системы. Говоря об этой связи, он сам, однако, никогда ее в виде формулы (28.5) не выражал. Впервые это было сделано лишь в 1900 г. выдающимся немецким ученым Максом Планком.

- ?
1. Что такое энтропия?
  2. Какую величину называют термодинамической вероятностью?
  3. Почему энтропию можно считать мерой беспорядка в системе?
  4. Как будет изменяться энтропия идеального одноатомного газа, если он начнет расширяться без изменения внутренней энергии?
  5. Какие состояния характеризуются большей вероятностью: состояния системы с малой или большой энтропией?
  6. Энтропию можно определять двумя выражениями: либо как  $k \ln W$ , либо как  $k \ln G$ . На какую величину они отличаются?
  7. Чему равна «термодинамическая» вероятность выпадения в опыте с бросанием двух костей числа 12? числа 2? числа 8? числа 1?

## § 29. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Нам уже не раз встречалось имя замечательного немецкого ученого Рудольфа Клаузиуса. Именно он ввел такие важнейшие понятия, как «идеальный газ», «внутренняя энергия», «энтропия». Им же впервые было получено уравнение первого закона термодинамики.

Он же является автором второго закона термодинамики. Характеризуя Клаузиуса как ученого, Гиббс говорил, что «обнаруженная Клаузиусом конструктивная сила, его умение вносить порядок в путаницу, широта кругозора, позволившая видеть одну истину, не теряя из вида другой, умение тонко отделять истину от заблуждения — все эти качества ставят профессора в первый ряд деятелей науки».

Над формулировкой второго закона термодинамики Клаузиус размышлял 15 лет. Впервые он его сформулировал в 1850 г., когда ему было 28 лет. После этого Клаузиус не раз обращался к этому закону, уточняя его содержание и пытаясь найти наиболее точно выражающие его математические уравнения. Оттачивать формулировку закона приходилось в спорах с теми, кто либо пытался доказать ее несостоятельность, либо вообще отрицал какую-либо научную ценность этого закона.

Для чего же Клаузиусу потребовалось формулировать второй закон термодинамики? Почему нельзя было ограничиться одним? Де-



Рудольф Юлиус  
Клаузиус

ло в том, что первый закон термодинамики не дает никаких указаний относительно направления, в котором могут происходить тепловые процессы. Если, например,  $A$  и  $B$  — два произвольных состояния какой-либо изолированной системы, то на основании первого закона невозможно определить, будет ли система переходить из состояния  $A$  в состояние  $B$  или, наоборот, из состояния  $B$  в состояние  $A$ . Этот закон утверждает лишь то, что внутренняя энергия системы при таком процессе будет оставаться неизменной.

Другой пример. Пусть имеется изолированная система, состоящая из двух тел. В каком направлении будет осуществляться теплообмен между ними? Первый закон термодинамики говорит лишь о том, что количество теплоты, отданное одним из этих тел, будет равно по модулю количеству теплоты, полученному другим из них (уравнение теплового баланса). Но вопрос о том, какое именно тело будет получать при этом энергию, а какое ее отдавать, остается открытым. Первому закону термодинамики не противоречил бы, например, процесс, при котором часть внутренней энергии самопроизвольно переходила бы от холодного тела к горячему, но в действительности такое никогда не происходит. Возникает вопрос: почему?

**Второй закон термодинамики** как раз и есть тот закон, который указывает направление протекания реальных тепловых процессов.

После появления первой формулировки второго закона термодинамики, данной Клаузиусом, в работу над этим законом включились другие физики. Второй закон оказался труднее для понимания, чем первый, и потому разные ученые (У. Томсон, В. Оствальд, М. Планк) стали предлагать свои формулировки закона, которые, как им казалось, являются более точными и ясными.

Не останавливаясь на них, приведем ту, к которой пришел сам Клаузиус в 1865 г.

Все самопроизвольные процессы в любой неравновесной системе происходят в таком направлении, при котором энтропия системы возрастает, пока наконец не достигнет своего максимального значения, соответствующего состоянию теплового равновесия.

Подчеркнем, что речь в этом законе идет лишь о самопроизвольных процессах. В идеале такие процессы могут происходить только в изолированных системах. В неизолированных системах неизбежны внешние влияния, которые могут приводить и к убыванию энтропии.



Чтобы выразить второй закон термодинамики математически, учтем, что увеличение энтропии соответствует тому, что ее приращение  $\Delta S$  все время оказывается положительным. Объединяя это с тем случаем, когда система уже достигла теплового равновесия и ее энтропия перестала изменяться, окончательно получаем

$$\Delta S \geq 0. \quad (29.1)$$

Это и есть математическая форма записи **второго закона термодинамики**.

Итак, второй закон термодинамики утверждает, что в неравновесных системах допустимы лишь такие самопроизвольные процессы, которые происходят в направлении увеличения энтропии. Все эти процессы не обратимы. Обратные процессы должны были бы сопровождаться уменьшением энтропии, что согласно второму закону термодинамики невозможно. Так, например, капля чернил, упавшая в стакан с водой, распределяется по всему объему воды и, сколько бы мы ни ждали, не собирается обратно в каплю, взлетающую вверх. Два разных газа, находящиеся в двух разделенных перегородкой частях сосуда, после удаления перегородки перемешиваются друг с другом и самопроизвольно потом уже никогда не разделяются. Маятник, выведенный из положения равновесия, постепенно перестает качаться и останавливается; обратного процесса, когда покоящийся маятник начинает вдруг сам раскачиваться, никогда не происходит. Наконец, человеческая жизнь происходит всегда в направлении к старости и смерти и никогда — наоборот.

Во всех этих примерах обратные процессы не противоречат первому закону термодинамики. И казалось бы, ничто не мешает тому же маятнику получить энергию от окружающей среды и после этого самопроизвольно прийти в движение. Во всяком случае, закон сохранения энергии при этом не нарушится. И тем не менее подобное никогда не происходит, ибо это противоречит второму закону термодинамики.

Энтропия является мерой беспорядка в системе. С ростом энтропии растет и степень неупорядоченности или хаоса в системе. Поэтому смысл второго закона термодинамики заключается в утверждении того, что *порядок в макроскопических системах всегда стремится уступить место беспорядку*.

Два газа в приведенном выше примере не разделяются сами собой, так как это привело бы к появлению более упорядоченного состояния системы. Маятник не начинает сам раскачиваться, так как использование им для этого внутренней энергии окружающей среды означало бы превращение энергии беспорядочного движения молекул этой среды в энергию упорядоченного движения маятника как целого, т. е. переход беспорядка в порядок, что как раз и запрещается вторым законом термодинамики.

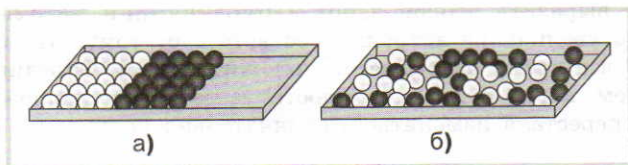


Рис. 78

Таким образом, *всякий естественный процесс всегда протекает в таком направлении, при котором система переходит в состояние с большим беспорядком*. То, что превратить порядок в беспорядок намного легче, чем осуществить обратный процесс, вытекает хотя бы из следующего простого опыта. Пусть имеется ящик с уложенными в строгом порядке черными и белыми шарами (рис. 78, а). Чтобы эти шары перемешались и расположились в полном беспорядке (рис. 78, б), достаточно просто несколько раз встряхнуть этот ящик. Если, однако, вы снова захотите вернуть шары в строго упорядоченное состояние, то, сколько бы вы ни трясли ящик, первоначального порядка вы не получите.

Ясно, что в системах, состоящих из молекул, число которых во много раз превышает число шаров в рассмотренном опыте, подобная необратимость будет проявляться намного сильнее. Непрерывные столкновения молекул будут все время «встряхивать» систему, поддерживая в ней молекулярный хаос и разрушая любой порядок, если он в какой-то момент случайно возникнет.

Вместе с тем существуют системы, в которых идут процессы, на первый взгляд противоречащие второму закону термодинамики. Например, у биологических систем по мере их развития и совершенствования степени организации или у вырастающих в жидкости кристаллов, содержащих более упорядоченные ряды атомов, чем жидкость, энтропия убывает. Однако при внимательном анализе таких процессов обнаруживается, что во всех этих случаях полная энтропия системы вместе с окружающей средой всегда возрастает. И если, например, растение или животное поместить в закрытое помещение, образовав замкнутую систему, то вскоре оно погибнет, подтверждая и в этом случае закон о переходе порядка в беспорядок.

Второй закон термодинамики, утверждая необратимость естественных макроскопических процессов, обуславливает качественное отличие будущих событий от прошлых. События, ставшие прошлым, уже никогда не наступят. Жизнь не повернешь назад. Такое качественное различие прошлого и будущего воспринимается нами как необратимо направленное течение самого *времени*. Поэтому действие второго закона термодинамики связывается в современной науке с существованием в природе так называемой «термодинамической стрелы времени».

В 1870-х гг. Больцман на основе установленной им же связи энтропии с вероятностью дал статистическое обоснование второго закона термодинамики. Стало ясно, что необратимость тепловых процес-



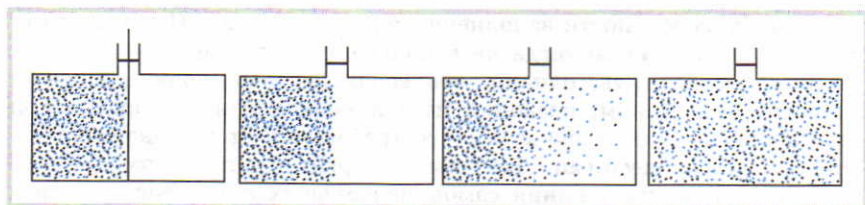


Рис. 79

сов обусловлена переходом макроскопических систем из менее в более вероятные состояния; обратные процессы характеризуются чрезвычайно малой вероятностью и потому не реализуются в природе.

Рассмотрим простой пример. Пусть имеется замкнутая система, представляющая собой сосуд, в одной половине которого находится газ, а в другой — пустота, отделенная тонкой перегородкой. После быстрого удаления перегородки все молекулы газа в первое мгновение останутся в левой половине сосуда. Оказавшись в неравновесном состоянии, газ начнет расширяться и через некоторое время заполнит весь сосуд (рис. 79). График, иллюстрирующий этот процесс, показан на рисунке 80 (через  $N_1$  на нем обозначено число частиц, находящихся в данный момент времени в левой половине сосуда;  $N$  — полное число всех частиц;  $\tau$  — время релаксации). Из формулы (28.4) видно, что данный процесс из-за увеличения объема газа действительно будет сопровождаться увеличением энтропии. А поскольку с увеличением энтропии растет и термодинамическая вероятность состояния, то газ в результате расширения окажется в более вероятном состоянии, чем был. Обратный процесс, при котором газ снова собрался бы в левой половине сосуда, мы никогда не увидим, так как такой процесс соответствовал бы переходу в состояние, которое является наименее вероятным. Для количественной оценки вероятности воспользуемся формулами (28.2) и (28.3). Если термодинамическую вероятность нахождения всех молекул газа в сосуде объемом  $V$  обозначить через  $W$ , а вероятность их нахождения в какой-либо части сосуда объемом  $V_1$  — через  $W_1$ , то их отношение будет равно:

$$\frac{W_1}{W} = \frac{\Gamma_1}{\Gamma} = \frac{CV_1^N U^{3N/2}}{CV^N U^{3N/2}} = \left(\frac{V_1}{V}\right)^N. \quad (29.2)$$

Для одного моля газа при  $V_1 = V/2$  это отношение выразится числом

$$(1/2)^{6 \cdot 10^{23}}.$$

Как видим, вероятность того, что газ в какой-то момент будет заполнять лишь половину доступного ему объема, в необозримое число

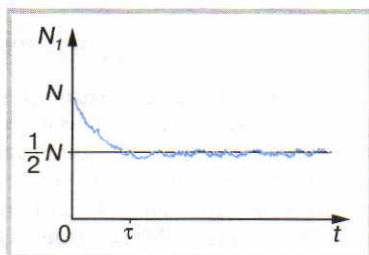


Рис. 80

раз меньше вероятности заполнения им всего сосуда. Именно поэтому такое состояние никогда не наблюдается в природе.

Следует отметить, однако, что вероятностный подход, предложенный Больцманом, позволил не только объяснить второй закон термодинамики, но и показать, что требования этого закона не являются категорическими. Диктуемое вторым законом термодинамики направление протекания самопроизвольных процессов на самом деле не является строго обязательным; оно является лишь наиболее вероятным. С учетом этого второй закон термодинамики можно переформулировать следующим образом:

если имеется изолированная система, которая в данный момент времени находится в неравновесном состоянии, то наиболее вероятным следствием этого будет такое изменение состояния этой системы, которое сопровождается увеличением ее энтропии.

Самопроизвольные процессы, сопровождающиеся уменьшением энтропии, в принципе допустимы. Их вероятность, как это видно из соотношения (29.2), зависит от числа частиц в системе и для макроскопических тел ничтожно мала. Если, однако, число частиц, составляющих систему, невелико, то обратные процессы могут наблюдаться, и в этом уже не будет ничего странного. *Необратимость характерна лишь для макроскопических систем.* Если бы мы увидели, как реальный газ самопроизвольно сжимается и начинает заполнять лишь нижнюю половину сосуда, то нам показалось бы это чудом. Но если бы этот газ состоял только из 2—3 молекул, то нас совсем не удивило бы, что в какой-то момент времени все эти молекулы оказались внизу.



1. В чем заключается недостаточность первого закона термодинамики?
2. Сформулируйте второй закон термодинамики.
3. Приведите примеры необратимых процессов.
4. Что происходит с порядком и беспорядком в ходе этих процессов?
5. Что делает с энтропией учебного кабинета дежурный, наводящий в нем порядок? Противоречит ли это второму закону термодинамики?
6. Чем обусловлена необратимость самопроизвольных процессов с точки зрения вероятностного подхода?

## § 30. ТЕМПЕРАТУРА

Представление о температуре как *мере нагретости тел* вошло в науку через наши субъективные ощущения теплого, холодного и горячего. Однако количественная мера нагретости, пригодная для науки, не может быть установлена с помощью одних лишь чувственных восприятий. Наши ощущения субъективны и могут ввести в заблуждение. Металлический предмет нам может показаться холоднее деревянного даже тогда, когда оба они находятся в тепловом равновесии друг с другом. Определить же на ощупь нагретость рас-



плавленной стали или жидкого азота лучше вообще не пытаться. И уж тем более нам не удастся это сделать с Солнцем и другими звездами.

Что же такое температура? В конце XIX в. было установлено, что *температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы и интенсивность теплового движения ее частиц*. При этом было доказано, что:

- 1) при контакте тел с разной температурой энергия всегда переходит от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой;
- 2) все тела, находящиеся в тепловом равновесии друг с другом, имеют одинаковую температуру.

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений эти свойства могут быть обоснованы следующим образом. Пусть имеются два тела с температурами  $T_1$  и  $T_2$ . Поскольку температура характеризует интенсивность теплового движения, то у тела с большей температурой средняя кинетическая энергия частиц больше, а у тела с меньшей температурой она меньше. Если привести эти тела в соприкосновение, то частицы одного тела начнут сталкиваться с частицами другого тела. В процессе этих столкновений средняя кинетическая энергия частиц станет постепенно выравниваться, так как у частиц с большей энергией она будет уменьшаться, а у частиц с меньшей энергией — увеличиваться. Когда средняя кинетическая энергия частиц в обоих телах станет одинаковой, наступит тепловое равновесие и тела окажутся в состоянии с одинаковой температурой.

Нужно сказать, что измерять температуру люди научились задолго до того, как поняли, что это такое. Первый прообраз термометра (термоскоп) был продемонстрирован в 1592 г. Галилеем. Его прибор состоял из стеклянного шара с присоединенной к нему тонкой трубкой, открытый конец которой опускался в сосуд с водой (рис. 81). При нагревании шара (например, теплыми руками) находящийся в нем воздух расширялся и уровень воды в трубке понижался. При охлаждении наблюдалось обратное явление. Впоследствии воздух в термометрах стали заменять подкрашенной водой, вином и спиртом. Однако каждый исследователь при этом пользовался своей шкалой. Поэтому разные приборы при измерении температуры одного и того же тела давали разные показания, что не позволяло проводить сопоставления данных и накапливать



Рис. 81

факты для их научной обработки. Не было даже ясно, например, кипит ли вода всегда при одной и той же «степени теплоты».

Первые практически удобные термометры были изготовлены в Амстердаме немецким физиком-любителем и стеклодувом Д. Г. Фаренгейтом. В 1709 г. он начал изготавливать спиртовые термометры, за нуль температуры в которых он принял самую низкую из известных ему температур — температуру смеси воды и льда с нашатырем (это было сделано, по-видимому, для того, чтобы избежать использования отрицательных температур). За другую опорную точку своей шкалы Фаренгейт принял температуру тела своей жены. Интервал между этими точками он разделил на 100 равных частей, каждую из которых он назвал градусом ( $1^\circ$  по Фаренгейту, или  $1^\circ\text{F}$ , как принято писать сейчас). Несколько позже он перешел от спиртовых к ртутным термометрам, выбрав в качестве верхней опорной точки температуру кипения воды, для которой им было установлено значение  $212^\circ\text{F}$ .

Термометры со шкалой Фаренгейта до сих пор применяют в Соединенных Штатах Америки. Однако большее распространение в мире получили термометры со шкалой Цельсия. В 1742 г. шведский астроном и физик А. Цельсий ввел стоградусную шкалу температур, в которой за температуру плавления льда он принял значение  $100^\circ$ , а за температуру кипения воды —  $0^\circ$ . Через 8 лет Штрёмер переменил местами эти числа, и стоградусная шкала приняла современный вид.

Связь температуры по Цельсию ( $t$ ) с температурой по Фаренгейту ( $t_F$ ) выражается следующей формулой:

$$t_F = (9/5)t + 32^\circ.$$

В России начиная с первой половины XVIII в. использовались ртутные термометры со 150-градусной шкалой, изготовленные петербургским академиком О. Н. Делилем. В дальнейшем они были заменены термометрами, сделанными французским ученым Р. Реомюром. Для температуры по Реомюру справедливо соотношение

$$t_R = (4/5)t.$$

Термометры со шкалой Реомюра применялись в нашей стране вплоть до 20-х гг. нашего века, когда были вытеснены термометрами Цельсия, которые используются и поныне.

Общим в температурных шкалах, предложенных Фаренгейтом, Реомюром и Цельсием, было то, что на каждой из них были нанесены как положительные, так и отрицательные значения температур. Между тем в 1848 г. английскому ученому У. Томсону удалось ввести такую температурную шкалу, которая содержала лишь положительные значения. За свои научные заслуги У. Томсон получил титул лорда Кельвина. Поэтому введенную им шкалу температур стали называть **шкалой Кельвина**, а соответствующую единицу температуры — **кельвином (К)**. С температурой по Цельсию  $t$  температура по Кельвину  $T$  связана соотношением



$$T = (t + 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ K}/^\circ\text{C}.$$

Иначе температуру по Кельвину называют **абсолютной** (или **термодинамической**) температурой. Абсолютная температура всех обычных тел положительна:

$$T > 0.$$

Среди окружающих нас тел нет тел с отрицательной абсолютной температурой.

Путь к современному определению температуры был долгим и трудным. Не останавливаясь на устаревших и ошибочных формулировках, приведем сразу окончательное и наиболее общее определение этого важнейшего понятия. Оказалось, что перечисленным выше свойствам удовлетворяет величина, обратная производной энтропии по внутренней энергии тела, взятой при постоянном объеме. Поэтому именно эту величину и было решено назвать температурой:

$$T = 1/S'. \quad (30.1)$$

Поскольку стоящую здесь производную можно представить в виде отношения очень малых приращений энтропии и внутренней энергии:

$$S' = \left( \frac{\Delta S}{\Delta U} \right)_{V = \text{const}},$$

то определение температуры можно записать так:

$$T = \left( \frac{\Delta U}{\Delta S} \right)_{V = \text{const}}. \quad (30.2)$$

Именно так определяется в современной физике **абсолютная, или термодинамическая, температура**.

У всех обычных тел с ростом внутренней энергии (при постоянном объеме) энтропия увеличивается. Поэтому *абсолютная температура этих тел всегда положительна:  $T > 0$ .*

Покажем, что абсолютная температура соответствует сформулированным выше двум свойствам.

Для доказательства первого утверждения рассмотрим изолированную систему, состоящую из двух тел (рис. 82). В результате теплообмена внутренняя энергия и энтропия каждого из этих тел будут изменяться, но так, что  $\Delta U_1 = -\Delta U_2$  (см. задание 4 к § 27), а энтропия всей системы будет расти:  $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 > 0$ . Из определения температуры [см. формулу (30.2)] следует, что  $\Delta S_1 = \Delta U_1/T_1$ , а  $\Delta S_2 = \Delta U_2/T_2 = -\Delta U_1/T_2$ .

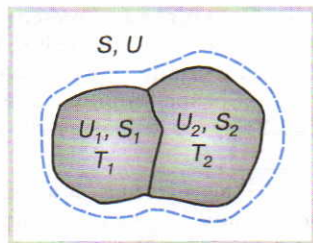


Рис. 82

В результате получаем

$$\Delta S = \frac{\Delta U_1}{T_1} - \frac{\Delta U_1}{T_2} = \Delta U_1 \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right). \quad (30.3)$$

Так как  $\Delta S > 0$ , то  $\Delta U_1(T_2 - T_1) > 0$ . Поэтому если, например, первое тело имеет меньшую температуру, чем второе ( $T_2 > T_1$ ), то в процессе теплообмена первое тело будет получать энергию (так как в этом случае  $\Delta U_1 > 0$ ), а второе тело будет ее отдавать (так как при этом  $\Delta U_2 < 0$ ), и, наоборот, если  $T_2 < T_1$ , то  $\Delta U_1 < 0$ , а  $\Delta U_2 > 0$ , что и требовалось доказать.

Тело, которое при теплообмене теряет энергию, называют *более нагретым*, а тело, к которому она переходит, — *менее нагретым*. Поэтому из доказанного выше свойства следует, что более нагретое тело имеет и более высокую температуру. Таким образом, введенная на основании соотношения (30.1) величина действительно может считаться мерой нагретости тел.

Для доказательства второго утверждения снова рассмотрим замкнутую систему из двух тел. При тепловом равновесии энтропия системы остается неизменной:  $\Delta S = 0$ . Подставляя это значение в выражение (30.3), получаем  $T_1 = T_2$ , что и требовалось доказать.

Доказанное свойство позволяет считать температуру *основной характеристикой теплового равновесия*. Все другие параметры (например, давление и объем) в состоянии теплового равновесия у разных частей системы могут иметь разные (хотя и постоянные) значения, и лишь температура у них при этом будет обязательно одинаковой.

Следует помнить, что температура является *макроскопическим* параметром состояния тел и не имеет смысла для систем, состоящих из одной или нескольких молекул.

Подставляя выражение (27.5) в формулу (30.2), можно получить формулу Клаузиуса<sup>1</sup>:

$$Q = T \Delta S. \quad (30.4)$$

Соотношение (30.1) определяет абсолютную температуру лишь с точностью до некоторого множителя  $k$ , который фигурирует в определении энтропии [см. формулу (28.5)] и носит название *постоянной Больцмана*. Разным значениям  $k$  будут соответствовать и разные шкалы температур. На какой же из них следует остановиться?

Если, например, принять, что  $k = 1$ , то энтропия окажется величиной безразмерной и абсолютная температура согласно формуле (30.2) будет выражаться в тех же единицах, что и внутренняя энер-

<sup>1</sup> Следует иметь в виду, что эта формула справедлива лишь для изолированных систем, энтропия которых изменяется в результате квазистатического получения количества теплоты извне. Для изолированных неравновесных систем эту формулу применять нельзя.



гия, т. е. в джоулях. Такую («энергетическую») температуру иногда используют в теоретических исследованиях (обозначая ее  $\theta$ ), однако на практике она оказывается очень неудобной. Например, среднюю температуру воздуха в Москве пришлось бы в этом случае выражать числом порядка  $10^{-21}$  Дж. Поэтому обычно поступают иначе.

В следующей главе будет доказано, что при постоянном давлении объем, занимаемый данной массой идеального газа, всегда пропорционален его абсолютной температуре:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}, \quad (30.5)$$

где через  $V$  обозначен объем газа при произвольной температуре  $T$ , а через  $V_0$  — его объем при любой другой температуре  $T_0$ . Экспериментальные же исследования, выполненные с помощью термометра Цельсия, показали, что все газы (в условиях, когда их можно считать идеальными) при нагревании на  $1^\circ$  расширяются на  $1/273,15$  долю своего первоначального объема. Это число обозначают греческой буквой  $\alpha$  и называют **термическим коэффициентом объемного расширения**. Если при  $0^\circ\text{C}$  объем газа равен  $V_0$ , а при температуре  $t$  он равен  $V$ , то по определению

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 T},$$

и, следовательно,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{t + 273,15^\circ}{273,15^\circ}. \quad (30.6)$$

Сравнивая теоретический результат [см. формулу (30.5)] с экспериментально полученным выражением (30.6), мы видим, что абсолютная температура  $T$  пропорциональна величине  $(t + 273,15^\circ)$ . Можно доказать, что коэффициент пропорциональности между ними будет равен 1, если постоянную Больцмана выбрать равной:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

При этом связь между абсолютной (или термодинамической) температурой  $T$  с температурой  $t$  по шкале Цельсия принимает вид

$$T = (t + 273,15^\circ\text{C}) \text{ К}/^\circ\text{C}. \quad (30.7)$$

Температурную шкалу, определяемую этим соотношением, называют **шкалой Кельвина**. Точке плавления льда ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ) на этой шкале соответствует значение  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ , а температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении ( $t = 100^\circ\text{C}$ ) — значение  $T = 373,15 \text{ К}$ .

При таком подходе термодинамическая температура оказывается не основной, а производной величиной, зависящей от температуры по шкале Цельсия и экспериментально определяемого значения  $\alpha$ . Поскольку при разных измерениях значение  $\alpha$  оказыва-

лось несколько различным, до 1954 г. температуре  $T_0$  приписывалось значение от 273,14 до 273,18 К.

В 1954 г. на X Генеральной конференции по мерам и весам было решено выбрать в качестве основной именно термодинамическую температуру и определять ее шкалу на основе одной опорной точки — так называемой **тройной точки воды**, которой приписывалось точное значение 273,16 К. В соответствии с этим основная единица температуры в СИ — *кельвин* — определяется в настоящее время как  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Тройной точкой воды называют такую температуру, при которой в тепловом равновесии могут находиться сразу три ее агрегатных состояния (вода, лед и пар). В отличие от температур кипения и плавления, которые могут быть разными в зависимости от давления, тройной точке соответствует единственное значение температуры. По шкале Цельсия это  $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому после нового определения шкалы Кельвина соотношение (30.7) не изменилось. Зато температура по шкале Цельсия теперь стала производной, и ее значения  $0\text{ }^\circ\text{C}$  и  $100\text{ }^\circ\text{C}$  утратили смысл ее опорных точек. Теперь это не точные, а лишь приближенные значения температур плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении.

- ?
1. Что характеризует температура? 2. Как называется единица абсолютной температуры? 3. Сформулируйте и докажите основные свойства температуры. 4. Как называется прибор, предназначенный для измерения температуры? Что вы знаете об истории его изобретения? 5. Взглянув на медицинский термометр, скажите, у какого вещества — стекла или ртути — коэффициент теплового расширения больше. 6. Воспользовавшись справочником по физике, назовите интервалы температур, в которых можно использовать ртутный, спиртовой и пентановый термометры. 7. Напишите формулу, связывающую термодинамическую температуру  $T$ , определяемую по шкале Кельвина, с «энергетической» температурой  $\theta$ , выражаемой в джоулях. Какие значения  $\theta$  соответствуют температурам 373,15 К и  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ? 8. Заполните таблицу.

|                             |   |   |   |    |     |     |      |
|-----------------------------|---|---|---|----|-----|-----|------|
| $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | 0 |   |   | 20 |     |     |      |
| $t, \text{ }^\circ\text{F}$ |   | 0 |   |    | 100 |     |      |
| $t, \text{ }^\circ\text{R}$ |   |   | 0 |    |     | 100 |      |
| $T, \text{ K}$              |   |   | 0 |    |     |     | 6000 |

9. Докажите, что приращение температуры по шкале Кельвина совпадает с приращением температуры по шкале Цельсия ( $\Delta T = \Delta t$ ). 10. В квантовой статистике допускается существование «необычных» систем, у которых абсолютная температура отрицательна (экспериментально



открыты в 1951 г.). Воспользовавшись соотношением (30.3), определите, какая из двух данных систем является более нагретой — система с температурой  $T_1 = 100$  К или система с температурой  $T_2 = -100$  К.

## § 31. ТРЕТИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Третий закон термодинамики был открыт значительно позже первых двух. Когда Клаузиус сформулировал свой принцип возрастания энтропии, будущему автору третьего закона термодинамики был только 1 год. Звали его Вальтер Нернст.

Первая формулировка нового закона термодинамики появилась в год смерти Больцмана, когда сам Нернст уже занимал почетную должность профессора Берлинского университета. Впоследствии он не раз обращался к термодинамическим проблемам, связанным с этим законом, уточняя каждый раз его формулировку. Рассказывают, что однажды, когда ему посоветовали разводить кур, Нернст, предпочитавший карпов, ответил: «Я развожу таких животных, которые находятся в тепловом равновесии с окружающей средой. Разводить теплокровных — это значит обогревать на свои деньги мировое пространство».

В 1912 г. Нернст дал следующую формулировку **третьего закона термодинамики**:

Абсолютный нуль температуры недостижим; к нему лишь можно асимптотически приближаться.

*Абсолютным нулем* называют температуру  $T = 0$  К, чему по шкале Цельсия соответствует значение  $t = -273,15^\circ\text{C}$ . Согласно третьему закону термодинамики никаким охлаждением достичь этой температуры никогда не удастся. И это не потому, что у нас недостаточно для этого технических возможностей, а потому, что так устроен Мир, таков закон природы.

Теоретически, однако, можно представить себе Мир при абсолютном нуле. При атмосферном давлении все вещества при этом (за исключением жидкого гелия) находились бы в твердом кристаллическом состоянии, т. е. в максимально упорядоченном состоянии с минимальной энтропией. Хаотическое тепловое движение частиц вещества при 0 К прекратилось бы. Однако внутриатомные движения электронов, а также так называемые «нулевые колебания» атомов, описываемые квантовой механикой, остались бы и в этом случае. Именно из-за этих колебаний (при малой массе атомов гелия и слабом взаимодействии между ними) гелий не кристаллизуется.

Температуры, лежащие ниже точки кипения жидкого воздуха (около 80 К), называют *низкими*, а ниже 0,3 К — *сверхнизкими* температурами. В настоящее время при охлаждении вещества удается достигнуть температуры в тысячные доли кельвина; в системах же атомных ядер — еще более низкие ( $10^{-6}$  К).

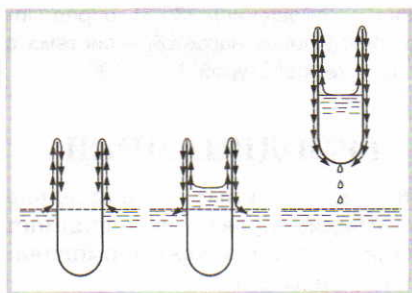


Рис. 83

да, содержащего жидкий гелий, образуется тонкая (в 100 атомных слоев) гелиевая пленка, по которой сверхтекучая жидкость способна сама выливаться из сосуда (рис. 83). Само по себе образование пленки жидкости на стенках сосуда не является исключительным свойством жидкого гелия. В результате притяжения частиц жидкости к частицам твердой стенки пленку могут образовывать и другие жидкости (например, керосин). Однако из-за трения внутри обычных жидкостей образование и распространение их пленок происходит очень медленно и может быть вообще незаметно. В гелии же благодаря сверхтекучести пленка возникает очень легко, и гелий начинает двигаться по ней со скоростью, достигающей десятков сантиметров в секунду.

Сверхтекучесть жидкого гелия — квантовое явление, которое невозможно объяснить в рамках классической физики. Впервые теория сверхтекучести была разработана в 1941 г. советским физиком Л. Д. Ландау.

### Для дополнительного чтения

Лев Давидович Ландау родился 22 января 1908 г. в Баку. К 5 годам он научился читать и писать, в 12 лет — дифференцировать, в 13 лет — интегрировать. В 1921 г. Ландау поступил в экономический техникум, а через год (в четырнадцатилетнем возрасте!) — на физико-математический факультет Бакинского университета. Но не только математика и физика интересовали юного Ландау. Он много читал, и литература стала частью его жизни. Его любимым поэтом в то время был Некрасов. Однажды его застали плачущим над раскрытой книгой. Оказалось, причиной слез были стихи:

От ликующих, праздно болтающих,  
 Обагривших руки в крови,  
 Уведи меня в стан погибающих  
 За великое дело любви!

Еще до поступления в университет на вопрос о том, кем он хочет стать, когда вырастет, Ландау ответил: «Революционером». Потом



его настольной книгой стал роман Стендаля «Красное и черное», из которого он любил повторять слова Жюльена Сореля: «Жизнь слишком коротка, и не следует проводить ее, пресмыкаясь перед жалкими негодьями». Эта принципиальная позиция сохранилась в Ландау на всю жизнь.

В 1924 г. Ландау переехал в Ленинград, где поступил на физико-математический факультет Ленинградского университета. Здесь (с легкой руки своего однокурсника Д. Иваненко) он получил прозвище Дау. Пользуясь славой не только талантливого, но и остроумного и доброго студента, Дау часто развлекал своих товарищей различными шутками, придумывая всевозможные классификации. Например, все науки он делил на естественные, неестественные и противоестественные.

Первая научная работа Ландау (она называлась «К теории спектров двухатомных молекул») появилась в 1926 г., когда самому автору было всего лишь 18 лет. В этом же году он поступает в аспирантуру и принимает участие в работе съезда русских физиков в Москве. Через три года Ландау отправляется в полугодовую научную командировку за границу, где посещает семинары лучших физиков мира. Находясь в Берлине, он познакомился с Альбертом Эйнштейном.

В Дании Ландау учился у знаменитого ученого Нильса Бора, который основал в Копенгагене известную всему миру школу физиков. Здесь же Ландау узнал и запомнил на всю жизнь слова Андерсена: «Просто быть живым недостаточно. Чтобы жить, нужны солнце, свобода и маленький цветок».

Возвратившись на родину, Ландау сначала продолжает работать в Ленинграде, а затем переводится в Харьков. Здесь он разрабатывает знаменитый «теорминимум» — специальную программу для выявления и обучения особо одаренных молодых физиков. Сдавать ему экзамены мог любой желающий, для этого не требовалось никаких документов. Все, кто сумел сдать этот «теоретический минимум» (43 человека за 30 лет), стали впоследствии известными учеными.

В 1934 г. Ландау присваивают степень доктора физико-математических наук без защиты диссертации. Через три года он переезжает в Москву, где начинает работать в Институте физических проблем. В 1946 г. он становится академиком. Совместно со своим учеником Е. М. Лифшицем он создает многотомный курс «Теоретическая физика».

Несмотря на большую занятость, Ландау всегда отвечал на письма тех, кто обращался к нему за советом или помощью. Однажды



Лев Давидович  
Ландау

он получил письмо от школьников, которые писали, что «хочут» объяснить своим одноклассникам, зачем человеку нужно образование. Лев Давидович ответил:

«Дорогие ребята!

Очень трудно писать об очевидных вещах. Вы ведь все сами прекрасно знаете, что образование необходимо в настоящее время для всякой профессии. Необразованный человек всегда будет чем-то второго сорта.

В этом смысле меня очень огорчило, что вы написали в своем письме «хочем» вместо «хотим». Это показывает, что вы, ребята, очень мало читаете, так что не привыкли по-настоящему даже к своему родному языку. Поэтому читайте побольше — ведь это так интересно! — и помните, что образование вам нужно не для школы, а для самих себя и что быть образованным совсем не скучно, а наоборот — интересно.

С наилучшими пожеланиями  
Л. Ландау».

Ландау всегда подчеркивал, что физику-теоретика «в первую голову необходимо знание математики. При этом нужны не всякие теоремы существования, на которые так щедрый математики, а математическая техника, т. е. умение решать конкретные математические задачи». Сюда Ландау относил умение правильно (и по возможности быстро) дифференцировать, интегрировать, решать обыкновенные дифференциальные уравнения, а также знание векторного и тензорного анализа.

Научная и педагогическая деятельность академика Л. Д. Ландау прервалась 7 января 1962 г., когда по дороге в Дубну Ландау попал в автомобильную катастрофу. Когда машина «скорой помощи» доставила ученого в больницу, врачи поставили жесточайший в своей беспощадности диагноз: «Множественные ушибы мозга, ушибленно-рваная рана в лобно-височной области, перелом свода и основания черепа, сдавлена грудная клетка, повреждено легкое, сломано семь ребер, перелом таза. Шок». По мнению нейрохирурга С. Н. Федорова, это был «совершенно безнадежный больной. Агонизирующий больной. Такие больные только с переломами ребер погибают в 90 процентах случаев оттого, что перестают дышать: им невыносимо больно дышать, они не могут дышать». Ландау умирал... Но героическая борьба за его жизнь, которую повели врачи совместно с его друзьями и учениками, увенчалась успехом: через три месяца к нему вернулась речь и он смог произнести первое слово. Это было «спасибо». А еще через несколько месяцев в больницу к Ландау доставили телеграмму:

«Москва, Академия наук, профессору Льву Ландау.  
1 ноября 1962 года.

Королевская академия наук Швеции сегодня решила присудить Вам Нобелевскую премию по физике за пионерские работы в области теории конденсированных сред, в особенности жидкого гелия...



- ?
1. В каком году появилась первая формулировка третьего закона термодинамики? 2. В чем заключается третий закон термодинамики? 3. Какую температуру называют абсолютным нулем? Что происходит при этой температуре? 4. Что вы знаете о сверхтекучести жидкого гелия? Кто и когда открыл это явление? Кто создал его теорию?

## § 32. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Тепловыми двигателями называют устройства, совершающие механическую работу за счет использования внутренней энергии топлива. Сюда относятся двигатели внутреннего сгорания, паровые и газовые турбины, реактивные двигатели и др.

Первый универсальный тепловой двигатель (паровую машину) создал в 1774 г. английский изобретатель Джеймс Уатт. Этому, правда, предшествовало изобретение пароатмосферной машины русским механиком И. И. Ползуновым, однако его машина после нескольких месяцев работы была остановлена, а затем и вообще разобрана, в результате чего дело Ползунова на десятки лет было предано забвению. Машина же Уатта получила широкое распространение и сыграла огромную роль в переходе к машинному производству. Позже, желая увековечить имя английского изобретателя, было решено назвать единицу мощности *ваттом*.

Изобретение паровой машины способствовало созданию паровозов, пароходов и первых (паровых) автомобилей. Первые паровозы были созданы в Англии Р. Тревитиком (1803) и Дж. Стефенсоном (1814). Изобретателем парохода считается американец Р. Фултон. Свои первые испытания он проводил на реке Сене в Париже. Однако когда он в 1804 г. обратился к Наполеону Бонапарту с предложением перевести французские корабли на использование паровой тяги, то, как это ни странно, получил отказ. А ведь какие возможности в борьбе с английским флотом открывало предложение Фултона, если бы Наполеон принял его предложение! Однако этот шанс французским императором был упущен. Через некоторое время Фултон вернулся на родину, и в 1807 г. по реке Гудзон отправился в свой первый рейс пароход «Клермонт».

По мере развития и внедрения в практику тепловых машин возникла необходимость в создании такой теории, которая объясняла бы принципы их действия. Создать такую теорию удалось двадцативосьмилетнему французскому ученому и военному инженеру Сади Карно. В 1824 г. им было опубликовано сочинение «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

«Тепловая машина, — писал Карно, — уже обслуживает наши шахты, двигает наши корабли, углубляет гавани и реки, кует железо... Отнять у Англии в настоящее время ее паровые машины означало бы разом отнять у нее железо и уголь, отнять у нее все источники богатства...» Однако, продолжает Карно, «явление



Никола Сади Карно

получения движения из тепла не было рассмотрено с достаточно общей точки зрения... Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него не производилось воздействие».

Любой тепловой двигатель включает в себя три основных элемента: 1) *рабочее тело*, т. е. тело, которое в тепловом двигателе совершает работу (им является газ или пар); 2) *нагреватель*, т. е. устройство, от которого рабочее тело получает энергию, часть которой идет затем на совершение работы, и 3) *холодильник* — тело, поглощающее часть энергии рабочего тела; холодильником могут служить окружающая среда (атмосфера) или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара (конденсаторы).

Работа любого теплового двигателя состоит из повторяющихся циклов, каждый из которых включает в себя получение рабочим телом энергии от нагревателя, расширение рабочего тела и совершение им работы, передачу неиспользованной части энергии холодильнику и возвращение рабочего тела в исходное состояние.

Работа, совершаемая рабочим телом за один полный цикл, складывается из работы, совершенной им при расширении, и работы, совершенной им при сжатии:  $A = A_{\text{расш}} + A_{\text{ск}}$ . Учитывая, что при сжатии газ совершает отрицательную работу, последнее равенство можно переписать так:

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{ск}}|.$$

Для того чтобы эта работа была положительной, нужен холодильник. При наличии холодильника газ перед сжатием или в процессе сжатия охлаждается, и потому процесс совершения им работы при сжатии протекает в среднем при меньшем давлении, чем при расширении. Из-за этого  $|A_{\text{ск}}| < A_{\text{расш}}$ , и, следовательно,  $A > 0$ .

В процессе действия теплового двигателя его рабочее тело периодически получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ , совершает работу  $A$  и передает холодильнику количество теплоты  $Q_2$  (так как это количество теплоты отдается, то оно имеет отрицательный знак:  $Q_2 < 0$ ).

**Определение.** Отношение работы, совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия** теплового двигателя:

$$\eta = A/Q_1. \quad (32.1)$$



Выразим КПД теплового двигателя через  $Q_1$  и  $Q_2$ . На основании первого закона термодинамики (27.2) мы можем записать:  $A = Q - \Delta U$ . Но в конце каждого цикла рабочее тело возвращается в исходное состояние с прежним значением внутренней энергии, так что  $\Delta U = 0$ . Количество же теплоты  $Q$ , полученное рабочим телом за весь цикл, равно разности между тем количеством теплоты, которое было им получено от нагревателя, и модулем того количества теплоты, которое было им отдано холодильнику:  $Q = Q_1 - |Q_2|$ . Таким образом,  $A = Q_1 - |Q_2|$  и коэффициент полезного действия оказывается равным:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (32.2)$$

Так как  $Q_2 \neq 0$ , то у любого теплового двигателя  $\eta < 1$ .

Пусть  $T_1$  — температура нагревателя, а  $T_2$  — температура холодильника. Согласно **теореме Карно** из всех мыслимых тепловых двигателей с данными температурами нагревателя и холодильника **максимальным** КПД будет обладать такой двигатель, каждый цикл работы которого представляет собой замкнутый процесс, графически изображенный на рисунке 84 (так называемый *цикл Карно*)<sup>1</sup>.

Карно установил, что КПД этого цикла  $\eta_{\max}$  определяется лишь температурами нагревателя и холодильника и не зависит от устройства двигателя и природы используемого в нем рабочего тела. Однако формулу этого КПД впервые сумел получить лишь Клаузиус. Оказалось, что

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (32.3)$$

Для вывода этой формулы применим к отдельным участкам цикла Карно (см. рис. 84) формулу Клаузиуса (30.4). На участке 1—2 рабочее тело двигателя получает от нагревателя количество теплоты

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1).$$

На участке 3—4 рабочее тело отдает холодильнику количество теплоты

$$Q_2 = T_2(S_1 - S_2).$$

Формула (32.3) получается после подстановки этих выражений в соотношение (32.2).

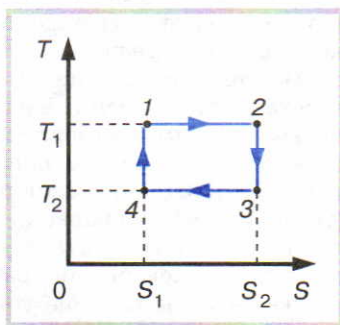


Рис. 84

<sup>1</sup> Графическое представление цикла Карно в координатах  $S, T$  впервые было дано Дж. Гиббсом в 1873 г.

Заметим, что так как абсолютная температура  $T_2$  не может быть равна нулю, то (как это видно из формулы (32.3)) даже максимальное значение КПД оказывается меньше единицы.

Для повышения КПД теплового двигателя следует понижать температуру холодильника  $T_2$  и увеличивать температуру нагревателя  $T_1$ . Но первому из этих путей мешает то, что температура холодильника практически не может быть ниже температуры окружающего воздуха, а второму — то, что любой материал обладает ограниченной теплостойкостью или жаропрочностью. Поэтому на практике КПД тепловых двигателей повышают за счет уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. п.

- ?
1. Какие устройства называют тепловыми двигателями? Приведите примеры.
  2. Кто изобрел первую паровую машину?
  3. Из каких трех основных элементов состоит тепловой двигатель?
  4. Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник? Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
  5. Какую величину называют коэффициентом полезного действия теплового двигателя?
  6. В чем заключается теорема Карно?
  7. Выведите формулу КПД цикла Карно.
  8. Чему равно количество теплоты, получаемое рабочим телом в цикле Карно на участках 2—3 и 4—1 (см. рис. 84)?
  9. Какие вы знаете пути повышения КПД тепловых двигателей?
  10. Докажите, что КПД тепловых двигателей всегда меньше единицы.

## § 33. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Тепловые двигатели, о которых говорилось в предыдущем параграфе, — это один из видов тепловых машин. Другим видом являются холодильники.

Тепловые двигатели преобразуют внутреннюю энергию топлива в механическую энергию. Холодильник за счет совершения механической работы охлаждает тело, получая некоторое количество теплоты от менее нагретого тела и передавая количество теплоты более нагретому телу.

Все тепловые машины (и тепловые двигатели, и холодильники) работают циклически. Вернемся к циклу Карно (цикл с максимальным возможным коэффициентом полезного действия) и рассмотрим процессы, графически представленные на рисунке 84, в координатах ( $p, V$ ). Это два изотермических ( $T = \text{const}$ ) и два адиабатных ( $Q = 0, S = \text{const}$ ) процесса. В цикле Карно между телами с разной температурой контакта нет, поскольку происходят изотермические процессы, и совершение работы не сопровождается передачей количества теплоты (в адиабатных процессах). Именно этим объясняется максимальный КПД для теплового двигателя, работающего по циклу Карно.



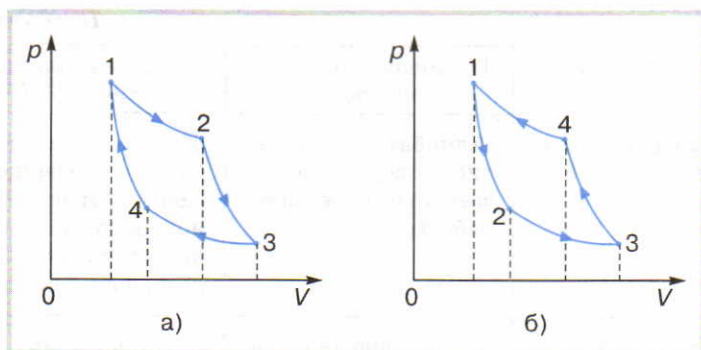


Рис. 85

На рисунке 85, *a* представлен цикл Карно теплового двигателя, а на рисунке 85, *б* — холодильника. Опишем работу каждого из них (табл. 2).

Таблица 2

| Процесс в газе                  | Тепловой двигатель<br>Рис. 85, <i>a</i>   | Холодильник<br>Рис. 85, <i>б</i>   |
|---------------------------------|---|--|
| 1. Начало и завершение процесса | Точка 1   | Точка 1  |
| 2. Первый процесс цикла 1—2     | Изотермическое расширение, совершение газом положительной работы, получение количества теплоты от нагревателя | Адиабатное расширение и охлаждение, совершение газом положительной работы                                      |
| 3. Второй процесс цикла 2—3     | Адиабатное расширение и охлаждение, совершение газом положительной работы                                     | Изотермическое расширение, совершение газом положительной работы, получение количества теплоты от холодильника |
| 4. Третий процесс цикла 3—4     | Изотермическое сжатие, совершение газом отрицательной работы, передача количества теплоты холодильнику        | Адиабатное сжатие и нагревание, совершение газом отрицательной работы  |

| Процесс в газе                                 | Тепловой двигатель<br>Рис. 85, а   | Холодильник<br>Рис. 85, б   |
|--|--|---|
| 5. Четвертый процесс цикла 4—1                 | Адиабатное сжатие, совершение газом отрицательной работы   | Изотермическое сжатие, совершение газом отрицательной работы, передача количества теплоты нагревателю |
| 6. Работа газа                                 | $A > 0$ , численно равна площади фигуры 1—2—3—4  | $A < 0$ , численно равна площади фигуры 1—2—3—4   |
| 7. Количество теплоты                          | $Q_1$ — получено от нагревателя,<br>$Q_2$ — отдано холодильнику  | $Q_1$ — отдано нагревателю,<br>$Q_2$ — получено от холодильника                                       |
| 8. Характеристика «полезности» тепловой машины | Коэффициент полезного действия<br>$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ | Холодильный коэффициент<br>$\xi = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{ Q_1  - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$    |

Холодильник работает по так называемому обратному циклу Карно. Сжатие рабочего тела происходит при более высокой температуре  $T_1$ , чем расширение. Работа внешних сил за цикл Карно  $A_{\text{внеш}} > 0$ . В результате такого цикла некоторое количество теплоты переходит от холодильника к нагревателю, энтропия при этом уменьшается:  $\Delta S < 0$ . Согласно второму началу термодинамики такой процесс невозможен, если этот процесс единственный. Но в обратном цикле Карно происходит процесс превращения механической энергии окружающих тел во внутреннюю энергию нагревателя, он сопровождается убыванием энтропии. Холодильник и воздух в помещении не являются изолированной системой тел. Электродвигатель холодильника совершает механическую работу за счет энергии электрического тока. Поэтому передача количества теплоты к горячему телу — это не единственный результат работы холодильника.

Широкое использование тепловых двигателей в энергетике и транспорте не проходит бесследно для окружающей среды: постепенно уменьшается содержание кислорода и увеличивается количество углекислого газа в атмосфере, воздух загрязняется вредными



для здоровья человека химическими соединениями. Возникает угроза изменения климата. Поэтому нахождение путей уменьшения загрязнения окружающей среды является сегодня одной из наиболее актуальных научно-технических проблем.

## Глава 5. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

«Я не был бы настоящим теоретиком, — заметил как-то Больцман, — если бы не спросил сперва: что такое теория? Профану бросается в глаза прежде всего то, что она мало понятна, что она окружена целой грудой формул, ничего не говорящих непосвященному. Но эти формулы не являются ее существом... Ее колыбель — фантазия, ее воспитатель — наблюдающий разум. Какими детскими были первые теории вселенной от Пифагора и Платона до Гегеля и Шеллинга! Фантазия была тогда слишком продуктивна, а самопроверки посредством эксперимента недоставало. Неудивительно, что эти теории были осмеяны эмпириками и практиками. Но все-таки они содержали в себе зародыши всех позднейших великих теорий...

Один из моих друзей определил практика как человека, ничего не понимающего в теории, а теоретика — как мечтателя, вообще не понимающего ничего. Я возражу на это...

Несмотря на все насмешки, стремление создавать теоретическое воззрение на вещи внешнего мира было непреодолимо в груди человека; из этого стремления непрестанно рождались все новые цветы. Как Колумб направлял свои корабли все время на запад, так и это стремление направляло нас к великой цели.

Когда затем вступили в свои права трезвый экспериментирующий рассудок и умение обращаться со множеством изобретенных аппаратов и машин, старые пестрые образы фантазии были очищены и выправлены; они поразительно быстро выиграли в значении и точном отображении природы, и теперь можно сказать, что теория покорила мир.

Кто не замечает с изумлением, как рабски склоняются вечные созвездия перед законами, которые человеческий разум хотя и не дал им, но подсмотрел у них? И чем абстрактнее теоретическое исследование, тем оно могущественнее...

Но даже и тот, кто ценит теорию только как дойную корову, не может сомневаться в ее мощи... Колоссальное сооружение — Бруклинский мост, необозримо простирающийся в длину, и Эйфелева башня, беспредельно возвышающаяся к небу, покоятся не только на твердом фундаменте из чугуна, но еще и на более твердом — на теории упругости.

Теоретические исследования могут быть очень изящны. «Изящны?» — слышу я вопрос; разве не разбегутся грации оттуда, где интегралы вытягивают шеи, да и может ли быть что-нибудь изящное

там, где автору не хватает времени даже на самые небольшие внешние украшения? — И все-таки простотой, необходимостью именно этого слова, каждой буквы, каждой черточки математик более всех художников подобен творцу миров... Весьма высокое внешнее изящество, при подчас довольно слабом обосновании выводов, характеризует французов, чрезвычайная драматическая напористость — англичан, и прежде всего Максвелла. Кто не знает его динамической теории газов? Сначала величественно развиваются вариации скоростей, затем, с одной стороны, выступают уравнения состояний, с другой — уравнения центрального движения, все выше и выше вздымается хаос формул; но вот раздаются известные четыре слова... и злой демон... исчезает так же внезапно, как иногда в музыке неожиданно замолкает дикая, до сих пор всё подавляющая партия басов; как бы по мановению волшебной палочки упорядочивается то, что раньше казалось неукротимым. Тогда не время объяснять, почему сделана та или иная подстановка; кто этого не чувствует, пусть отложит книгу; Максвелл — не сочинитель программной музыки, который поверх нот должен писать их объяснение. Стремительно раскрывают перед нами формулы результат за результатом, пока нас не ошеломит заключительный эффект — тепловое равновесие тяжелого газа, и занавес падает»<sup>1</sup>.

Теории идеального газа и будет посвящена данная глава. Напомним (см. § 22), что **идеальный газ** представляет собой теоретическую модель газа и потому в природе не существует. Однако во многих случаях реальные газы по своим свойствам очень близки к идеальному. Пусть  $L$  и  $V$  — линейный размер и объем сосуда, в котором находится газ;  $V_0$  — объем одной молекулы;  $N$  — число молекул в газе;  $l$  и  $\tau$  — средняя длина и среднее время свободного пробега молекул;  $\tau_{ст}$  — время столкновения двух молекул, т. е. промежуток времени, в течение которого молекулы взаимодействуют, изменяя скорость движения друг друга. Тогда за **идеальный газ** можно принять такой газ, для которого справедливы следующие условия:

$$\tau_{ст} \ll \tau, NV_0 \ll V, l \ll L.$$

При не очень низких температурах и небольших давлениях (близких к атмосферному) первые два из этих условий достаточно хорошо выполняются для газов, молекулы которых имеют простое строение (кислород, водород, углекислый газ и т. п.). Например, при нормальных условиях ( $T_0 = 273$  К,  $p_0 = 101\,325$  Па = 760 мм рт. ст.) отношение  $\tau_{ст}/\tau$  составляет для них величину порядка  $10^{-3}$ . При этих условиях потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией и считать справедливым выражение (25.4). Последнее из приведенных выше условий означает, что газ находится в не настолько разреженном состоянии, чтобы его можно было принять за вакуум.

<sup>1</sup> Больцман Л. Статьи и речи. — М.: Наука, 1970.



## § 34. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Однажды известный французский писатель Бернарден де Сен-Пьер пожаловался Наполеону Бонапарту на то, что в институте, членами которого они оба состояли, к нему относятся без должного уважения. Подумав немного, Наполеон ответил: «Скажите, а вы знакомы с дифференциальным исчислением?» «Нет», — честно признался писатель. «Так что же вы жалуетесь?» — удивился император.

Знание дифференциального исчисления (т. е. правил нахождения производной) позволяет установить зависимость внутренней энергии идеального газа от его температуры. Оказывается, что

$$U = \frac{3}{2} NkT, \quad (34.1)$$

где  $N$  — число частиц в газе.

Докажем это. В § 28 мы получили формулу, выражающую зависимость энтропии идеального одноатомного газа от его внутренней энергии:

$$S = S_0 + kN \ln V + (3/2)kN \ln U.$$

Если мы найдем производную энтропии по этой энергии, считая объем газа величиной постоянной, то мы получим согласно выражению (30.1) величину, обратную абсолютной температуре газа. Таким образом,

$$\frac{1}{T} = S' = \frac{3}{2} \frac{kN}{U},$$

и, следовательно,

$$U = \frac{3}{2} NkT.$$

Итак, внутренняя энергия идеального одноатомного газа *прямо пропорциональна* его абсолютной температуре. Это утверждение остается в силе и в том случае, когда газ является многоатомным; при этом меняется лишь коэффициент пропорциональности в соответствующей формуле. Итак,

Внутренняя энергия любого идеального газа не зависит от занимаемого им объема и определяется лишь одним термодинамическим параметром состояния — его температурой.

Это утверждение называется **законом Джоуля**. То, что внутренняя энергия идеального газа оказалась не зависящей от объема, обусловлено тем, что в модели идеального газа не учитывается потенциальная энергия взаимодействия молекул<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Именно эта энергия зависит от расстояния между частицами газа и, следовательно, изменяется с изменением его объема.

Если выражение (34.1) разделить на число частиц в газе, то в соответствии с формулой (25.4) мы получим среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной частицы:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (34.2)$$

Полученное соотношение показывает, что *абсолютную температуру тела (в данном случае газа) можно считать характеристикой средней кинетической энергии поступательного движения его частиц*: чем быстрее движутся частицы вещества, тем выше его температура.

Получим формулу, связывающую скорость теплового движения частиц газа с его абсолютной температурой. Для этого учтем, что средняя кинетическая энергия молекулы с массой  $m_0$  определяется выражением

$$\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}, \quad (34.3)$$

где  $\bar{v}^2$  — средний квадрат ее скорости. Подставляя это выражение в формулу (34.2), получаем

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

откуда

$$v_T = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (34.4)$$

**Определение.** Физическая величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата скорости молекулы, называется *средней квадратичной* или *тепловой скоростью* ее движения.

Из выражения (34.4) видно, что тепловая скорость движения молекул увеличивается при нагревании газа и уменьшается при его охлаждении. Формула (34.4) показывает также, что при одной и той же температуре быстрее движутся те молекулы, у которых масса  $m_0$  меньше. Напомним, однако, что речь идет о средней квадратичной скорости. Не следует забывать, что при любой температуре в газе имеются как медленно движущиеся молекулы, скорости которых близки к нулю, так и быстрые молекулы, скорости которых в несколько раз превосходят среднюю квадратичную скорость, определяемую выражением (34.4). То, какая доля общего числа всех молекул газа имеет скорость, близкую к тому или иному конкретному значению, определяется **распределением Максвелла**, график которого был приведен в § 22. Скорость  $v_n$ , на которую приходится максимум этого распределения (т. е. *наивероятнейшая скорость*), связана со средней квадратичной скоростью движения молекул соотношением



$$v_{\text{н}} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{\text{т}}$$

Прямое измерение скоростей частиц вещества впервые было выполнено в 1920 г. немецким физиком-экспериментатором Отто Штерном. Упрощенная схема его установки изображена на рисунке 86. Платиновая нить *A*, покрытая снаружи тонким слоем серебра, располагалась вдоль оси системы, состоящей из двух жестко связанных цилиндров *1* и *2*. Воздух из цилиндров был откачан. Платиновая нить нагревалась электрическим током до температуры около  $1200^{\circ}\text{C}$ . При этом серебро с ее поверхности интенсивно испарялось, и его атомы заполняли пространство внутри цилиндра *1*. Часть атомов газообразного серебра пролетала через узкую щель в этом цилиндре и попадала на внутреннюю поверхность цилиндра *2*. Стенки последнего охлаждались, чтобы серебро могло конденсироваться на них. Когда вся система была неподвижна, на специальной пластинке, помещенной в точке *B*, появлялась узкая полоска серебра. Когда же система приводилась во вращение с некоторой частотой  $\nu$ , полоска серебра на внутренней поверхности второго цилиндра смещалась на расстояние  $l$  и оказывалась в точке *C*. Измерив радиусы цилиндров  $R_1$  и  $R_2$ , а также  $l$  и  $\nu$ , можно определить скорость теплового движения атомов:

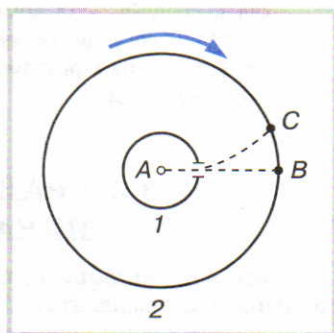


Рис. 86

$$v = 2\pi\nu R_2(R_2 - R_1)/l. \quad (34.5)$$

В опыте Штерна полоска из серебра в точке *B* оказывалась узкой и резкой, тогда как в точке *C* она всегда оказывалась размытой. Это подтверждало, что атомы серебра в используемом пучке движутся с различными скоростями, как это и должно быть в соответствии с распределением Максвелла. Полученные Штерном значения скоростей (от 560 до 640 м/с) оказались близкими к теоретически рассчитанному значению тепловой скорости атомов, что явилось еще одним экспериментальным подтверждением основных положений молекулярно-кинетической теории вещества.

- ?
1. Что такое идеальный газ? 2. Сформулируйте закон Джоуля. 3. По какой формуле находится внутренняя энергия идеального одноатомного газа? 4. Что характеризует абсолютная температура тела? Какая формула это доказывает? 5. Что называют средней квадратичной или тепловой скоростью движения молекул? 6. Чему равны наивероятнейшая и средняя скорости (см. § 22) молекул газа, если их тепловая скорость равна 500 м/с? 7. Какие молекулы в атмосфере движутся быстрее: молекулы углекислого газа или молекулы азота? 8. Расскажите об опыте Штерна. 9. Тепловая скорость движения моле-

кул в воздухе при комнатной температуре составляет несколько сот метров в секунду. Почему же для распространения запаха от одного конца комнаты к другому требуется значительное время? 10. Выведите формулу (34.5).

## § 35. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Состояние жидких и газообразных тел определяется их объемом, давлением и температурой. Поэтому  $p$ ,  $V$  и  $T$  называют их *макроскопическими параметрами состояния*. Эти параметры не являются независимыми. Например, при изменении температуры газа  $T$  может измениться как его давление  $p$ , так и его объем  $V$ . Это свидетельствует о том, что между тремя данными параметрами существует связь.

**Определение.** Уравнение, выражающее связь между макроскопическими параметрами состояния вещества, называется **уравнением состояния** этого вещества.

Установление вида этой связи, т. е. нахождение уравнения состояния того или иного тела, является основной задачей молекулярно-кинетической теории вещества. В общем случае эта задача является чрезвычайно сложной и до сих пор не решена. Правда, для некоторых случаев известны ее приближенные решения. Точное решение этой задачи получено лишь для единственной системы — идеального газа.

Уравнение состояния идеального газа имеет вид

$$p = \frac{N}{V} kT. \quad (35.1)$$

Это уравнение можно получить на основе сопоставления наименований единиц физических величин (упрощенного варианта метода размерностей, весьма продуктивного в физике). Если ввести понятие плотности энергии идеального газа как отношение  $\frac{U}{V}$ , то нетрудно убедиться, что эта величина выражается в тех же единицах, что и давление газа:

$$[p] = \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \quad \left[ \frac{U}{V} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Отсюда можно предположить, что  $p \sim \frac{U}{V}$ , или  $p = \alpha \frac{U}{V}$ .

Допустим, что  $\alpha = \frac{2}{3}$ . (Правомерность этого обоснуем позже.)

Тогда 
$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{U}{V} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2} \frac{NkT}{V} = \frac{N}{V} kT,$$



т. е.  $p = \frac{N}{V} kT$ , или  $p = nkT$ , где  $n = \frac{N}{V}$  — концентрация частиц газа, что и требовалось доказать.

### Для дополнительного чтения

Рассмотрим более строго, как решается основная задача МКТ применительно к идеальному газу, т. е. найдем такое уравнение, которое будет связывать три его параметра состояния ( $p$ ,  $V$  и  $T$ ) между собой.

Для решения этой задачи воспользуемся формулой (27.4), согласно которой давление идеального газа равно взятой с противоположным знаком производной его внутренней энергии по объему:

$$p = -(U)'_{Q=0}.$$

Обратим внимание на то, что эта производная должна находиться при обязательном условии:  $Q = 0$ . Согласно формуле (30.4) этому условию соответствует постоянство энтропии и, как следствие, фазового объема  $\Gamma$ . Этот объем определяется выражением (28.3):

$$\Gamma = CV^N U^{3N/2}. \quad (35.2)$$

Таким образом, для нахождения давления газа мы должны выразить отсюда внутреннюю энергию и найти ее производную по объему при постоянном  $\Gamma$ . Имеем

$$U = (\Gamma/C)^{2/3N} V^{-2/3},$$

$$p = -U' = \frac{2}{3} (\Gamma/C)^{2/3N} V^{-5/3}.$$

Чтобы избавиться от  $\Gamma$ , подставим в последнее выражение значение (35.2). В результате получим

$$p = \frac{2}{3} \frac{U}{V}. \quad (35.3)$$

Это уравнение связывает пока лишь два параметра из трех:  $p$  и  $V$ . Осталось ввести сюда третий параметр —  $T$ . Для этого воспользуемся выражением (34.1). Подставляя его в уравнении (35.3), получаем уравнение (35.1).

Перепишем уравнение состояния идеального газа в классическом виде. Для этого все три параметра состояния газа поместим в левую часть этого уравнения, а все остальные величины оставим справа. Учитывая, кроме того, что  $N = (m/M)N_A$ , окончательно получаем

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R, \quad (35.4)$$

где  $R = kN_A = 8,31$  Дж/(моль·К) — постоянная для всех газов величина, называемая **универсальной газовой постоянной**. Записанное в



**Дмитрий Иванович  
Менделеев**

Действительно, согласно уравнению (35.1) для числа молекул в газе справедливо выражение  $N = pV/kT$ . Отсюда видно, что при одинаковых  $p$ ,  $V$  и  $T$  одинаковым у газов будет и число молекул  $N$ .

Закон Авогадро впервые был сформулирован в 1811 г. итальянским ученым Амедео Авогадро. В то время молекулярно-кинетической теории еще не существовало, и потому этот закон представлял собой лишь гипотезу провинциального профессора, в которую мало кто верил. О гениальной догадке Авогадро, как и о самом ученом, надолго забыли, и его имя нельзя было найти даже в знаменитом «Биографическом словаре» Поггендорфа, изданном в 1863 г. Гипотеза Авогадро превратилась в «закон Авогадро» лишь после того, как была доказана Клаузиусом, который вернул имя забытого итальянского ученого в историю науки.

2. Давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме парциальных<sup>1</sup> давлений этих газов (**закон Дальтона**):

$$p = p_1 + \dots + p_n. \quad (35.5)$$

Действительно, так как общее число молекул в смеси равно сумме чисел молекул каждого газа этой смеси:  $N = N_1 + \dots + N_n$ , то, применяя к каждому газу, а также к смеси в целом уравнение состояния (35.1), получаем

$$p = \frac{N_1 + \dots + N_n}{V} kT = \frac{N_1}{V} kT + \dots + \frac{N_n}{V} kT = p_1 + \dots + p_n.$$

Закон (35.5) впервые был установлен в 1801 г. английским ученым Джоном Дальтоном и поэтому носит его имя.

<sup>1</sup> *Парциальным* (от лат. *partialis* — частичный) называют давление, которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.



3. Отношение произведения давления и объема идеального газа к его абсолютной температуре есть величина постоянная для данной массы данного газа (**объединенный газовый закон**):

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (35.6)$$

Справедливость этого закона вытекает из уравнения (35.4): если правая часть этого уравнения в каком-либо процессе остается неизменной (при  $m = \text{const}$ ,  $M = \text{const}$ ), то постоянной будет и его левая часть.

Объединенный газовый закон впервые был получен в 1824 г. французским ученым Сади Карно. Однако книга, в которой приводилось его уравнение, быстро стала библиографической редкостью и оказалась не замеченной физиками того времени. Первым ученым, обратившим внимание на сочинение Карно, был Б. П. Клапейрон. В 1834 г. им была опубликована работа, в которой он широко использовал объединенный газовый закон, нигде не говоря, однако, что его автором является Карно. Этот закон Клапейрон впервые представил в виде

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}, \quad (35.7)$$

где через  $p_0$ ,  $V_0$ ,  $T_0$  обозначены параметры начального состояния газа, а через  $p$ ,  $V$ ,  $T$  — параметры его конечного состояния<sup>1</sup>. После выхода в свет работы Клапейрона уравнение, выражающее объединенный газовый закон в виде (35.7), стали называть **уравнением Клапейрона**.

- ?
1. Перечислите макроскопические параметры состояния идеального газа.
  2. Какое уравнение называют уравнением состояния?
  3. В чем заключается основная задача МКТ?
  4. Выведите уравнение Менделеева—Клапейрона.
  5. Сформулируйте и докажите закон Авогадро.
  6. Сформулируйте и докажите закон Дальтона.
  7. В чем заключается объединенный газовый закон?
  8. При каких условиях справедливо уравнение Клапейрона?

## § 36. ИЗОПРОЦЕССЫ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ

При переходе данной массы газа из одного состояния (характеризуемого параметрами  $p_0$ ,  $V_0$ ,  $T_0$ ) в другое (характеризуемое параметрами  $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) в общем случае могут меняться все перечисленные величины. Однако так бывает не всегда. Иногда меняются какие-либо два из этих параметров, а третий остается неизменным.

<sup>1</sup> Вместо абсолютной температуры  $T$  Клапейрон, как и Карно, использовал в своих уравнениях обозначение  $(t + 267)$ , в котором число 267 впоследствии было заменено на число 273.

Процессы, при которых один из параметров состояния газа остается неизменным, называют *изопроцессами*<sup>1</sup>. Если неизменным параметром является температура, то соответствующий изопроецесс называют **изотермическим** (от греч. «терме» — теплота), если объем, то **изохорным** (от греч. «хора» — занимаемый объем), а если давление, то **изобарным** (от греч. «барос» — тяжесть). Рассмотрим каждый из этих процессов по отдельности.

### 1. Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ )

Для осуществления изотермического процесса необходимо, чтобы газ расширялся или сжимался очень медленно, а теплообмен с окружающей средой, имеющей на протяжении всего процесса постоянную температуру, происходил достаточно быстро.

Из первого закона термодинамики (27.2) следует, что при изотермическом процессе в идеальном газе (когда  $T = \text{const}$  и, следовательно,  $\Delta U = 0$ ) вся совершаемая им работа должна быть равна количеству теплоты, полученному от внешней среды:

$$A = Q. \quad (36.1)$$

Если бы сжатие или расширение газа происходило очень быстро, так что теплообмен газа с окружающей средой не успевал бы произойти, то в соответствии с уравнением (27.3) совершаемая над газом работа полностью шла бы на изменение внутренней энергии и, следовательно, температуры газа: газ нагревался бы при сжатии и охлаждался бы при расширении. Но при медленных процессах, когда теплообменом пренебречь уже нельзя и он начинает играть существенную роль, газ получает некоторое количество теплоты при расширении и отдает его при сжатии. Из-за этого температура газа не успевает заметно измениться, и процесс становится изотермическим.

При изотермическом процессе температура газа  $T$  остается постоянной, а давление  $p$  и объем  $V$  изменяются. Для установления связи между давлением и объемом идеального газа при изотермическом процессе воспользуемся уравнением Клапейрона (35.7). Учитывая, что в данном случае  $T = T_0$ , находим:

$$pV = p_0V_0. \quad (36.2)$$

Это равенство выражает **первый газовый закон**:

при неизменной температуре произведение давления данной массы идеального газа на его объем является величиной постоянной, т. е.

$$pV = \text{const} \quad (\text{при } T = \text{const} \text{ и } m = \text{const}).$$

<sup>1</sup> От греч. «изос» — равный.



В Англии этот закон называют законом Бойля, во Франции — законом Мариотта, а в России — законом Бойля—Мариотта. Открыт он был экспериментальным путем задолго до создания статистической термодинамики. Впервые гипотеза о постоянстве произведения  $pV$  была высказана в 1661 г. английским любителем физики Р. Тоунли. В том же году опыты по проверке этой гипотезы были проведены лордом Броункером и врачом Генри Пауэром. Однако в наиболее широких пределах эта гипотеза была подтверждена приблизительно в это же время экспериментами английского физика Роберта Бойля. Он первым опубликовал свои результаты (1662), причем по полноте и точности они намного превосходили данные других исследователей, среди которых был и Роберт Гук, который, по свидетельству самого Бойля, уже в 1660 г. располагал данными, согласующимися с гипотезой Тоунли. Имя французского аббата Эдма Мариотта в названии закона появилось благодаря его работе «Речь о природе воздуха» (1676), в которой были описаны опыты, аналогичные экспериментам Бойля, и при этом без ссылок на работы последнего.

Для графического представления изопроцессов Клапейрон предложил использовать системы координат, по осям которых откладываются параметры состояния газа. Графики изотермического процесса получили название **изотерм**. В координатах  $(p, T)$  и  $(V, T)$  изотермы представляют собой прямые линии, перпендикулярные оси температур (рис. 87, а, б).

Из закона Бойля — Мариотта следует, что при постоянной температуре газа его давление обратно пропорционально объему:

$$p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (36.3)$$

Поэтому графиком изотермического процесса в координатах  $(p, V)$  является *гипербола* (рис. 87, в), причем, чем дальше от начала координат она находится, тем большая температура газа ей соответствует.

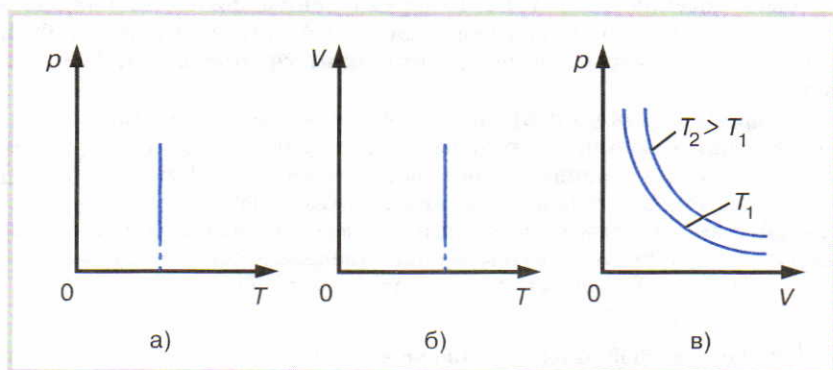


Рис. 87

## 2. Изохорный процесс ( $V = \text{const}$ )

Для осуществления изохорного процесса газ помещают в герметический сосуд, не меняющий своего объема. Поскольку работа при постоянном объеме газа совершаться не может, то первый закон термодинамики в этом случае имеет вид уравнения (27.5):

$$\Delta U = Q.$$

Это уравнение показывает, что при изохорном процессе все полученное газом количество теплоты идет на изменение его внутренней энергии.

Для установления связи между давлением идеального газа и его температурой при постоянном объеме воспользуемся уравнением Клапейрона (35.7). Учитывая, что в данном случае  $V = V_0$ , находим:

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}. \quad (36.4)$$

Мы получили **второй газовый закон**:

при неизменном объеме отношение давления данной массы идеального газа к его абсолютной температуре является величиной постоянной, т. е.

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (\text{при } V = \text{const} \text{ и } m = \text{const}).$$

Иначе этот закон можно представить в виде

$$p = \text{const} \cdot T. \quad (36.5)$$

Это означает, что *давление идеального газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре газа.*

Впервые гипотеза о пропорциональности давления и температуры была высказана в 1702 г. французским физиком Гильомом Амонтонем. Однако точная формула соответствующего закона была получена лишь через сто лет французским ученым Ж. Л. Гей-Люссаком<sup>1</sup>.

Графики изохорного процесса называют **изохорами** (рис. 88). В соответствии с законом (36.5) изохоры в координатах ( $p$ ,  $T$ ) имеют вид прямых, проходящих через начало координат (см. рис. 88, в). В области низких температур эти прямые проводятся штриховой линией, так как при охлаждении газ все сильнее и сильнее отличается от идеального, а затем вообще превращается в жидкость, для которой рассматриваемый закон, разумеется, не выполняется.

<sup>1</sup> В отечественной литературе (но не в западной!) этот закон иногда ошибочно называют законом Шарля. На самом деле французский ученый Шарль никакого отношения к этому закону не имеет.



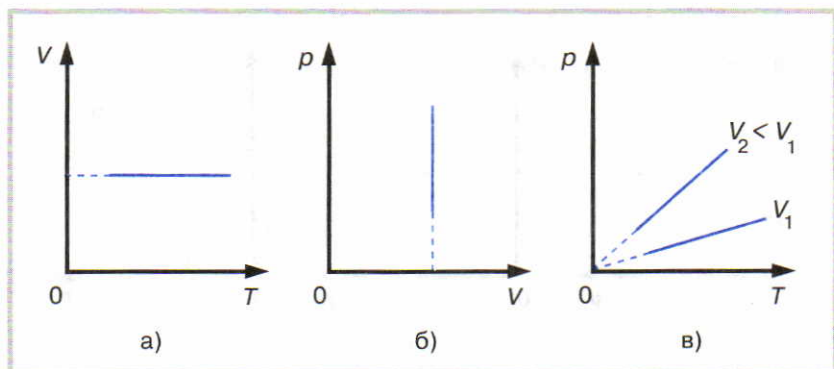


Рис. 88

### 3. Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ )

Простейшим примером изобарного процесса является расширение нагреваемого газа в цилиндре со свободно ходящим поршнем. Наблюдаемое при этом расширение газа называют *тепловым расширением*.

Первый закон термодинамики применительно к изобарному процессу может быть записан в виде

$$U_2 - U_1 = Q - p(V_2 - V_1), \quad (36.6)$$

где  $A_{\text{внеш}} = -p(V_2 - V_1)$  — работа внешних сил над газом.

Если в уравнении Клапейрона (35.7) учесть, что  $p = p_0$ , то в результате мы получим

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}. \quad (36.7)$$

Это равенство выражает **третий газовый закон**:

при неизменном давлении отношение объема данной массы идеального газа к его абсолютной температуре является величиной постоянной, т. е.

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (\text{при } p = \text{const} \text{ и } m = \text{const}).$$

Этот закон можно представить и в таком виде:

$$V = \text{const} \cdot T. \quad (36.8)$$

Данное уравнение показывает, что *объем идеального газа при постоянном давлении прямо пропорционален его абсолютной температуре*.

Третий газовый закон был открыт в 1787 г. французским физиком Жаком Шарлем. Однако результаты своих экспериментов Шарль не опубликовал. Через 15 лет к тому же выводу независимо от Шарля пришли английский ученый Джон Дальтон и фран-

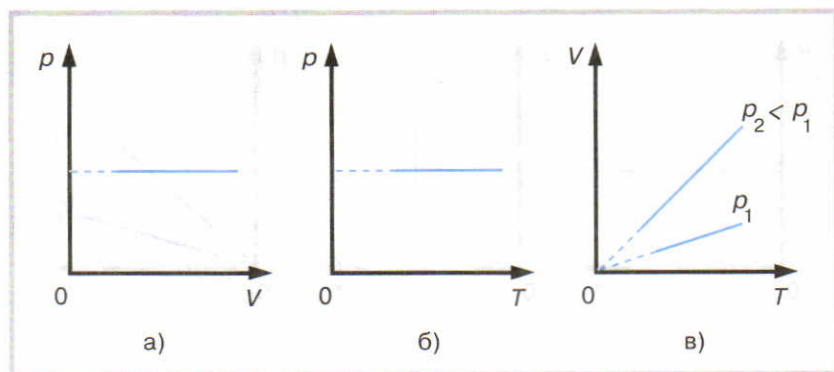


Рис. 89

цузский физик Жозеф Луи Гей-Люссак. В отличие от Дальтона, Гей-Люссак сформулировал свой вывод более определенно, и притом в количественной форме. Поэтому новый газовый закон стали называть законом Гей-Люссака. Однако сам Гей-Люссак с благородством, которое редко можно встретить в вопросах приоритета, настоял на том, чтобы этот закон назвали в честь Шарля. С тех пор в западной литературе третий газовый закон называют законом Шарля.

Графики изобарного процесса называют **изобарами** (рис. 89). В соответствии с законом (36.8) изобары в координатах  $(V, T)$  имеют вид прямых, ориентированных на начало координат. Штриховая линия в области низких температур на этих графиках обусловлена теми же причинами, что и в случае изохор (см. рис. 88).

Законы, которым подчиняются изопроцессы в газе (их называют газовыми законами), исторически были получены экспериментально. Мы получили их теоретически как следствия объединенного газового закона. Газовые законы можно проверить даже на простом школьном оборудовании, выполняя лабораторные работы. Экспериментальное подтверждение газовых законов свидетельствует о правильности наших теоретических рассуждений и выводов. Это и модель идеального газа, и взаимосвязь внутренней энергии идеального газа с абсолютной температурой, и то, что мы считали  $\alpha = \frac{2}{3}$  при выводе уравнения состояния идеального газа методом размерностей, и само уравнение состояния идеального газа, допускающее самостоятельную экспериментальную проверку.

- ? 1. Какие процессы называют изотермическими? 2. Как записывается первый закон термодинамики для изотермического процесса? 3. В чем заключается первый газовый закон? Кто его открыл? 4. Какие процессы называют изохорными? 5. Как записывается первый закон термодинамики для изохорного процесса? 6. В чем заключается второй газовый закон? 7. Какие процессы называют изобарными? 8. Как записы-



вается первый закон термодинамики для изобарного процесса? 9. В чем заключается третий газовый закон? Кто его открыл? 10. На рисунке 90 изображен график некоторого замкнутого процесса, происходящего с идеальным газом. На каких участках этого процесса происходит изохорное охлаждение газа? изотермическое расширение? изобарное нагревание? изохорное нагревание? изобарное сжатие? 11. Докажите, что, чем дальше находится изотерма данного газа от начала координат (см. рис. 87, в), тем большая температура газа ей соответствует. 12. Докажите, что второй изохоре (см. рис. 88, в) соответствует меньший объем газа. 13. Докажите, что второй изобаре (см. рис. 89, в) соответствует меньшее давление газа.

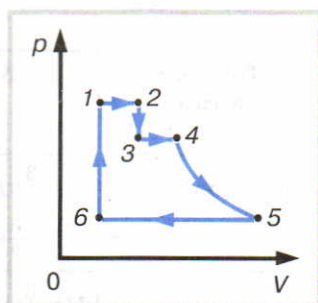


Рис. 90

## § 37. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ПРОЦЕССАМ В ГАЗЕ

Нам известны три изопроцесса в газе, а также адиабатный процесс, при котором не происходит теплообмен термодинамической системы с окружающей средой. Применим первое начало термодинамики к этим процессам. Сначала введем понятие молярной теплоемкости вещества по аналогии с введением понятия удельной теплоемкости. Мы знаем, что количество теплоты при нагревании и охлаждении можно найти по формуле  $Q = cm\Delta T$ , где  $c$  — удельная теплоемкость вещества. Если вместо массы использовать такую характеристику вещества, как количество вещества  $\nu$ , измеряемое в молях, то выражение для  $Q$  примет вид  $Q = c_\mu \nu \Delta T$ , где  $c_\mu$  — молярная теплоемкость вещества.

Применение первого закона термодинамики к изотермическому, изобарному, изохорному и адиабатному процессам для одноатомного идеального газа представим в виде таблицы 3.

Таблица 3

| Процесс в газе | $U, \Delta U$                               | $A$<br>(работа газа) | $Q$     | $c_\mu$                                      |
|----------------|---|----------------------|---------|--|
| Изотермический | $U = \frac{3}{2} \nu RT,$<br>$\Delta U = 0$ | $A = Q$              | $Q = A$ | $c_T = \infty,$<br>так как<br>$\Delta T = 0$ |

| Процесс<br>в газе | $U, \Delta U$  | $A$<br>(работа<br>газа) | $Q$                         | $c_\mu$               |
|-------------------|--|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Изохорный         | $U = \frac{3}{2} \nu RT,$<br>$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ | $A = 0$                 | $Q = \Delta U$              | $c_V = \frac{3}{2} R$ |
| Изобарный         | $U = \frac{3}{2} \nu RT,$<br>$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ | $A = p \Delta V$        | $Q = \Delta U + p \Delta V$ | $c_p = \frac{5}{2} R$ |
| Адиабатный        | $U = \frac{3}{2} \nu RT,$<br>$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ | $A = -\Delta U$         | $Q = 0$                     | $c_{Q=0} = 0$         |

При заполнении этой таблицы мы воспользовались, помимо первого закона термодинамики, уравнением состояния идеального газа  $\frac{pV}{T} = \nu R$ .

Нетрудно заметить, что молярные теплоемкости при постоянном давлении ( $c_p$ ) и при постоянном объеме ( $c_V$ ) связаны соотношением  $c_p = c_V + R$ . Это уравнение называют уравнением Майера.

Следует учесть, что молярные теплоемкости для идеального газа являются характеристиками процесса, происходящего с газом, а удельные теплоемкости для твердых тел и жидкостей — характеристиками вещества, из которого состоит тело.



1. Обоснуйте записи, приведенные в таблице для каждого процесса.
2. Получите уравнение Майера. 3. Каков физический смысл молярной теплоемкости как физической величины? 4. Почему молярная теплоемкость газа, который можно считать идеальным, не зависит от рода газа? Почему удельные теплоемкости твердых тел и жидкостей не зависят от того, нагревают или охлаждают твердое тело или жидкость?

## § 38. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

После того как были открыты газовые законы, начали появляться работы, в которых авторы пытались объяснить эти законы на основе молекулярно-кинетических представлений. В 1738 г. вышла книга известного математика и физика Даниила Бернулли, в которой он впервые дал теоретическое объяснение закона Бойля—Мариотта. В своей теории Бернулли рассматривал *давление газа на стенки сосуда как результат столкновения с ними газовых моле-*



кул. Однако идеи, изложенные в этой работе, не получили широкого распространения и вскоре были основательно забыты.

В 1845 г. английский ученый Дж. Дж. Уотерстон представил в редакцию трудов Королевского общества<sup>1</sup> свою работу «О физической среде, состоящей из свободных и вполне упругих молекул, находящихся в движении». Увлечение игрой в бильярд подсказало Уотерстону мысль о возможности представления молекул газа в виде твердых и абсолютно упругих шариков, сталкивающихся между собой и со стенками сосуда. Исходя из этого представления, он получил уравнение, выражающее прямо пропорциональную зависимость между давлением газа и кинетической энергией его молекул, и на его основе доказал закон Бойля—Мариотта. Но и эта работа не встретила понимания у его коллег и была охарактеризована как «пустая, если не бессмысленная, и непригодная даже для чтения перед обществом».

Однако затем последовали работы Ранкина, Джоуля, Крёнига, Клаузиуса и Максвелла, в результате чего к 1860 г. построение молекулярно-кинетической теории идеального газа было завершено. Исследования этих ученых позволили установить связь между макроскопическими параметрами состояния газа и микроскопическими характеристиками его молекул. Тем самым как бы был перекинут «мостик» между микро- и макромиром, что позволило объяснить многие тепловые явления.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа имеет вид

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2. \quad (38.1)$$

Это уравнение связывает макроскопический параметр — давление газа — с массой молекул  $m_0$ , концентрацией молекул  $n$  и тепловой (средней квадратичной) скоростью их движения. Впервые оно было получено Рудольфом Клаузиусом в 1857 г. Однако в своих исследованиях он, как и другие его современники, исходил из представления о молекулах как материальных точках, сталкивающихся со стенками сосуда по законам абсолютно упругого удара. Теперь мы знаем, что на самом деле эти столкновения не являются абсолютно упругими и, строго говоря, не подчиняются законам классической механики. Да и сами стенки сосуда с точки зрения молекулярной физики не являются гладкими поверхностями, а также представляют собой системы из большого числа движущихся молекул, между которыми есть промежутки. Столкновения молекул газа с такими «стенками», а также друг с другом происходят примерно следующим образом. Приблизившись к другой молекуле, молекула газа как бы «прилипает» к ней на мгновение, а затем начинает двигаться со скоростью, которую невозможно заранее предсказать. Как же

<sup>1</sup> Так называется Английская академия наук.

учесть столь сложный характер взаимодействия молекул при расчете давления газа на стенки сосуда? Оказывается, для этого не нужно знать механизм самого столкновения молекул, а достаточно учесть, что средняя кинетическая энергия молекул газа после их столкновения со стенкой не меняется. Это требование равносильно условию равенства температур газа и стенок сосуда, в котором этот газ находится. Другими словами, сосуд и находящийся в нем газ должны находиться в состоянии теплового равновесия друг с другом. Тогда к рассматриваемой системе можно применять законы статистической термодинамики.

Для нахождения давления газа воспользуемся уравнением (35.3). Подставляя в него выражение (25.4), получаем

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k = \frac{2}{3} n \bar{E}_k, \quad (38.2)$$

или с учетом выражения (34.3)

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2.$$

Заменяя здесь средний квадрат скорости молекул на квадрат тепловой скорости их движения, мы приходим к основному уравнению МКТ идеального газа в виде уравнения (38.1).

Обратим внимание на следующее обстоятельство. До тех пор пока молекулы газа представляются в виде материальных точек, приходится считать, что они не имеют размеров и поэтому не могут сталкиваться друг с другом. В этом случае величина  $p$  в основном уравнении МКТ (38.1) выражает лишь давление газа на стенки сосуда. Однако на самом деле молекулы любого газа имеют некоторые размеры и столкновения между ними неизбежны. Эти столкновения приводят к возникновению силового взаимодействия между различными макроскопическими частями внутри газа. Теперь любая воображаемая граница между этими частями газа может играть роль стенки, с которой сталкиваются молекулы. Поэтому величина  $p$  в действительности имеет более широкий смысл: она выражает не только давление газа на стенки сосуда, но и внутреннее давление газа, существующее между любыми его частями.

Давление газа измеряют с помощью манометров. Если температура и объем данного газа постоянны, то показание манометра, измеряющего давление газа, с течением времени изменяться не будет. Значит ли это, что сила, с которой молекулы газа ударяют в любую единичную площадку в газе<sup>1</sup>, также все время остается неизменной? Нет. Из-за беспорядочного движения отдельных молекул и различия в их скорости эта сила будет непрерывно и случайным образом меняться (рис. 91).

<sup>1</sup> Напомним, что давление определяется формулой  $p = F/S$ .



**Определение.** Случайные отклонения давления (или любой другой физической величины) от своего среднего значения называются **флуктуациями**<sup>1</sup>.

В состоянии теплового равновесия флуктуации всегда очень малы. Например, в газе из  $10^{19}$  частиц сила, действующая на единичную площадку, отличается от своего среднего значения не более чем на  $10^{-10}\%$ . Столь малые перепады давления манометр, разумеется, зафиксировать не может и потому показывает в соответствующих условиях постоянное значение  $p$ . Из-за пренебрежимо малых различий это значение можно рассматривать и как среднее давление газа, и как его мгновенную величину.

Малость флуктуаций в равновесном состоянии объясняется наличием чрезвычайно острого максимума у распределения Гиббса (см. § 25), что, в свою очередь, обусловлено чрезвычайно большим числом частиц в любом макроскопическом теле. С уменьшением числа частиц флуктуации возрастают и при небольшом числе молекул могут быть очень значительны.

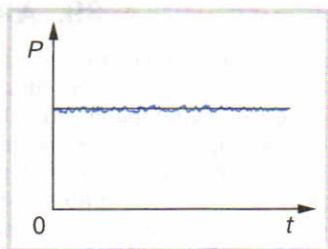


Рис. 91

- ? 1. Какое уравнение называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа? 2. Напишите уравнение, связывающее давление идеального газа со средней кинетической энергией его молекул. 3. Чем обусловлено давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории? 4. Что такое флуктуации? 5. Флуктуациями какой физической величины обусловлено броуновское движение? 6. Пусть имеется сосуд, заполненный газом из  $N$  молекул. Будет ли испытывать флуктуации число частиц этого газа, находящихся в левой половине данного сосуда ( $N_1$ )? Чему равно среднее значение этого числа (т. е.  $\bar{N}_1$ )? Может ли относительная флуктуация этого числа, т. е. отношение  $(N_1 - \bar{N}_1)/\bar{N}_1$ , равняться 100%? От чего это зависит?

## Глава 6. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ

Около 4,6 млрд лет тому назад из протопланетного облака образовалась Земля. Несколько позже из газов, выделенных твердой оболочкой Земли, сформировалась ее атмосфера. Атмосфера Земли является гигантской термодинамической системой, в которой происходят сложные и многообразные тепловые процессы, играющие важную роль в жизни человечества. Описанию некоторых из них и будет посвящена данная глава.

<sup>1</sup> От лат. fluctuatio — колебание.

## § 39. АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

В настоящее время *атмосфера Земли* представляет собой газовую оболочку массой около  $5 \cdot 10^{15}$  т, состоящую из азота (78% по объему), кислорода (21%), аргона (0,93%), углекислого газа, неона и некоторых других газов. Кислород в ее составе появился в более или менее значительном количестве около 2 млрд лет тому назад в результате деятельности фотосинтезирующих растений<sup>1</sup>.

Естественную смесь газов, образующих атмосферу Земли, называют *воздухом*. Помимо нейтральных молекул, в воздухе всегда присутствуют и ионы различных знаков, причем легкие ионы с отрицательным зарядом оказывают положительное воздействие на организм человека.

Атмосфера Земли имеет слоистое строение. Ее нижняя часть, называемая *тропосферой*, простирается до высоты около 10 км в полярных широтах и 16—18 км у экватора. Характерной особенностью этой части атмосферы является убывание температуры с высотой в среднем на  $6^\circ\text{C}$  на 1 км, что соответствует приблизительно  $-60^\circ\text{C}$  у ее верхней границы. В тропосфере сосредоточено около 80% всей массы воздушной оболочки Земли.

За тропосферой располагается переходный слой — *тропопауза*, а за ней — *стратосфера*. В стратосфере температура воздуха при подъеме сначала остается постоянной (до высоты 20 км), а затем начинает возрастать вплоть до высоты около 55 км, где температура достигает значения, близкого к  $0^\circ\text{C}$ . Именно в стратосфере в основном сосредоточен озон ( $\text{O}_3$ ), который поглощает большую часть ультрафиолетового излучения Солнца, губительно действующего на многие организмы.

Давление, которое оказывает атмосфера Земли на все находящиеся в ней предметы, называют **атмосферным давлением**. На любом уровне в атмосфере оно определяется весом вышележащего столба воздуха. Среднее давление атмосферы у поверхности Земли (на уровне моря) равно примерно  $10^5$  Па.

С увеличением высоты над уровнем моря давление атмосферы убывает. Это объясняется не только тем, что уменьшается высота вышележащего столба воздуха, но и тем, что по мере подъема уменьшается плотность воздуха. При небольших подъемах в среднем на каждые 12 м подъема давление уменьшается на 1 мм рт. ст. Зная зависимость давления от высоты, можно по изменению показаний барометра определить высоту поднятия над уровнем моря. На этом основан принцип действия высотомеров, применяемых в авиации и при подъемах в горы.

Первое измерение атмосферного давления было проделано в 1643 г. учеником Галилея В. Вивiani по указанию итальянского физика Э. Торричелли. В этом опыте запаянная с одного конца и

---

<sup>1</sup> В отличие от азотно-кислородной атмосферы Земли в атмосфере Марса и Венеры преобладает углекислый газ, а Юпитера и Сатурна — водород.



заполненная ртутью стеклянная трубка длиной около метра переворачивалась и опускалась в другой сосуд с ртутью (рис. 92). Высота столба ртути в трубке понижалась до высоты около 760 мм над уровнем ртути в широком сосуде (при этом в верхней части трубки над ртутью образовывалось безвоздушное пространство — «торричеллиева пустота»). Зная высоту  $h$  столба ртути в трубке, можно по формуле

$$p = \rho gh$$

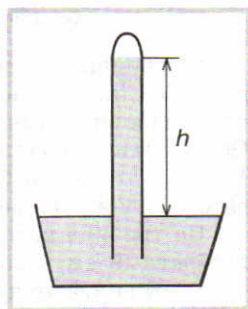


Рис. 92

рассчитать давление в паскалях. Давление 760 мм рт. ст. соответствует 101 325 Па и считается *нормальным атмосферным давлением*.

Одним из первых экспериментов, проведенных для доказательства существования атмосферного давления, был также знаменитый опыт с «магдебургскими полушариями», выполненный Отто фон Герике в Магдебурге (1654). В этом опыте полушария, из которых выкачивался воздух, настолько сильно прижимались друг к другу силами атмосферного давления, что их не могли разорвать несколько пар лошадей.

Человек и животные атмосферного давления не ощущают, так как кровь и другие жидкости и газы, заполняющие кровеносные сосуды, ткани и полости тела, сжаты до такого же давления и, действуя изнутри, уравновешивают внешнее давление.

Атмосферное давление может изменяться от места к месту и во времени из-за различных процессов, происходящих в атмосфере. Например, из-за неравенства температур в разных местах атмосферы давление может быть различным даже на одном и том же уровне. Такое неравномерное распределение давления приводит к возникновению *ветра*, т. е. движения воздуха с ускорением, направленным из области высокого давления к области более низкого давления. При скорости ветра 5—8 м/с ветер считается умеренным, свыше 14 м/с — сильным; скорости 20—25 м/с соответствуют шторму, а свыше 30 м/с — урагану.



1. Из каких газов состоит атмосфера Земли? 2. Что вы знаете о структуре атмосферы? 3. От чего зависит атмосферное давление? 4. Как впервые было измерено давление атмосферы? 5. Почему человек не чувствует атмосферного давления? 6. Из-за чего возникают ветры?

## § 40. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Важнейшим компонентом земной атмосферы является *водяной пар*. Его присутствие в атмосфере обусловлено испарением воды с поверхностей океанов, морей, водоемов, влажной почвы и растений. Общая масса водяного пара в атмосфере Земли составляет около  $1,24 \cdot 10^{16}$  кг (если бы весь этот пар сконденсировался, то образовался бы «слой осажденной воды» толщиной 2,4 см).

На границе воды с воздухом происходит не только *испарение*, но и обратный ему процесс — *конденсация*. Вылетевшие из воды молекулы сталкиваются в воздухе с другими молекулами и, изменив направление своей скорости, через некоторое время могут снова вернуться в воду. Пусть  $N^{\uparrow}$  — число молекул, вылетающих из жидкости за данное время, а  $N^{\downarrow}$  — число молекул, возвращающихся в нее за то же время. Если  $N^{\uparrow} > N^{\downarrow}$ , то испарение будет преобладать над конденсацией и уровень жидкости в водоеме будет понижаться. Если же  $N^{\uparrow} = N^{\downarrow}$ , то процессы испарения и конденсации компенсируют друг друга и система «жидкость — пар» оказывается в состоянии динамического равновесия, при котором количества жидкости и пара над ней остаются неизменными.

**Определение.** Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным паром**.

После того как в данном объеме при данной температуре водяной пар становится насыщенным, его количество перестает возрастать, чем и объясняется название «насыщенный».

Количество водяного пара быстро убывает с понижением температуры. Поэтому для атмосферы Земли характерно уменьшение его количества от экватора к полюсам и очень быстрое его уменьшение по мере увеличения высоты над Землей. Основная масса водяного пара сосредоточена в тропосфере. Вблизи земной поверхности концентрация водяного пара колеблется от 3% в тропиках до 0,00002% в Антарктиде.

Для количественной оценки содержания водяного пара в воздухе вводят понятия абсолютной и относительной влажности воздуха.

**Определение.** **Абсолютной влажностью** воздуха называется масса водяного пара (в граммах), содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

Если обозначить абсолютную влажность  $\varphi_{\text{абс}}$ , то ее определение можно представить в следующем виде:

$$\varphi_{\text{абс}} = \frac{m}{V} \left( \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right) = \rho \left( \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right). \quad (40.1)$$

Измерения показывают, что определенная таким образом абсолютная влажность воздуха обычно численно мало отличается от парциального давления водяного пара (при тех же условиях), выраженного в миллиметрах ртутного столба:

$$\varphi_{\text{абс}} \left( \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right) \text{ численно } \approx p \text{ (мм рт. ст.)}. \quad (40.2)$$



Если известна только абсолютная влажность воздуха, то нельзя определить, насколько он будет сырым или, наоборот, сухим. Интенсивность испарения воды с поверхности водоемов, растений или тела человека зависит от того, насколько водяной пар далек от насыщения. Если до насыщения еще далеко, то испарение будет заметно преобладать над конденсацией, а если находящийся в воздухе водяной пар уже близок к состоянию насыщения, то интенсивность испарения существенно меньше.

Величиной, показывающей, насколько водяной пар при данной температуре далек от насыщения, является относительная влажность воздуха.

**Определение.** Относительной влажностью воздуха называется отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного пара при той же температуре.

Относительную влажность воздуха обычно выражают в процентах. Поэтому в виде формулы ее определение записывают следующим образом:

$$\varphi = \frac{p(t)}{p_0(t)} \cdot 100\%. \quad (40.3)$$

Через  $p_0(t)$  здесь обозначено давление насыщенного водяного пара при данной температуре  $t$ . Оно не зависит от объема пара и для данной температуры имеет постоянное значение. При решении задач величину  $p_0(t)$  обычно берут из таблицы, в которой приведены значения давления насыщенного пара при различных температурах.

Через  $p(t)$  в формуле (40.3) обозначено парциальное давление водяного пара при той же температуре  $t$ . Никаких таблиц для него, разумеется, не существует. Найти же его можно либо через абсолютную влажность, либо путем измерения так называемой *точки росы*.

Точкой росы ( $t_p$ ) называют температуру, до которой нужно, не меняя давления, охладить водяной пар в воздухе, чтобы он стал насыщенным. При дальнейшем понижении температуры конденсация начнет преобладать над испарением, в результате чего образуются капельки росы, может появиться туман, влага на окнах и т. п.

Для измерения точки росы применяют специальный прибор, называемый **конденсационным гигрометром** (рис. 93). Основной его частью является сосуд, передней стенкой которого служит металлическое зеркальце. Внутри этого сосуда наливают эфир, а сверху вставляют термометр. При продувании через него воздуха эфир испаряется и охлаждает стенки сосуда. Измеряя температуру, при которой зеркальце покрывается капельками воды (конденсирующейся из окружающего воздуха), определяют точку росы  $t_p$ .

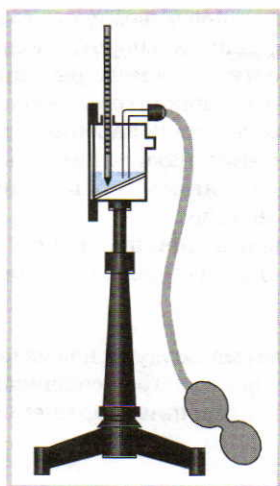


Рис. 93

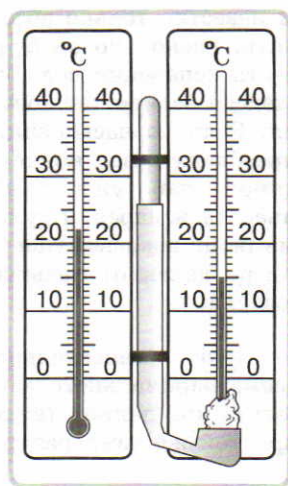


Рис. 94

Поскольку давление в области, прилегающей к зеркальцу, можно считать постоянным, то для парциального давления водяного пара справедливо равенство

$$p(t) = p_0(t_p).$$

Стоящее здесь справа давление насыщенного пара определяется с помощью таблицы. Определив его, можно по формуле

$$\varphi = \frac{p_0(t_p)}{p_0(t)} \cdot 100\% \quad (40.4)$$

найти относительную влажность воздуха.

Относительную влажность воздуха можно определить и не измеряя точку росы. Для этого на практике используют другой прибор, называемый **психрометром** (рис. 94). Он состоит из двух термометров — сухого и смоченного водой. Сухой термометр показывает температуру воздуха, а смоченный, резервуар которого обвязан батистом, опущенным в воду, — более низкую температуру, обусловленную интенсивностью испарения с влажного батиста. Чем суше воздух, влажность которого измеряется, тем ниже показания смоченного термометра. И наоборот, чем больше относительная влажность воздуха, тем менее интенсивно идет испарение и тем более высокую температуру показывает этот термометр. При этом относительная влажность воздуха определяется по показаниям сухого и смоченного термометров с помощью специальной психрометрической таблицы.

Психрометры можно увидеть на стенах музеев и некоторых других учреждений. Поддержание определенной влажности воздуха необходимо не только при хранении произведений искусства и книг, но и в ткацком, кондитерском и других производствах.



Для здоровья человека вреден как слишком сухой, так и слишком влажный воздух. Наиболее благоприятная для него влажность составляет от 40 до 60%.

Наличие в земной атмосфере водяного пара препятствует быстрому остыванию Земли. Земля, как и всякое другое обычное тело, излучает в окружающее пространство инфракрасные лучи. Однако водяной пар, достаточно хорошо пропускающий видимый свет, поглощает инфракрасное излучение и тем самым нагревает окружающий воздух. Если бы этого не происходило, то средняя температура поверхности Земли оказалась бы значительно ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , в то время как сейчас она составляет  $15^{\circ}\text{C}$ .

?

1. Сколько водяного пара содержится в атмосфере Земли?
2. Какой пар называют насыщенным?
3. Что происходит с концентрацией насыщенного пара при изотермическом увеличении и уменьшении его объема, если его давление при этом остается неизменным?
4. Объясните, почему давление насыщенного пара увеличивается с ростом температуры, причем быстрее, чем у идеального газа при постоянном объеме.
5. Что такое абсолютная влажность воздуха?
6. Какую величину называют относительной влажностью?
7. Что такое точка росы? Почему она так называется?
8. Чему равна относительная влажность воздуха при температуре, равной точке росы?
9. Как изменяется относительная влажность воздуха с уменьшением температуры при неизменной плотности водяного пара в атмосфере?
10. Какие приборы позволяют определить относительную влажность воздуха?
11. Какая влажность воздуха наиболее благоприятна для человека?

## § 41. АДИАБАТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ

Когда та или иная часть воздуха в атмосфере поднимается вверх, то, попадая в область более низкого давления, она начинает расширяться. Это расширение часто можно считать *адиабатным*, так как за время подъема теплообмен между поднимающейся массой воздуха, которая достаточно велика по объему, и окружающей средой просто не успевает произойти. Адиабатным по аналогичной причине можно считать и сжатие опускающихся воздушных масс.

Теория адиабатных процессов основывается на уравнении *первого закона термодинамики* (27.3):

$$\Delta U = A_{\text{внеш}}.$$

Из этого уравнения видно, что при адиабатном сжатии газа (когда  $A_{\text{внеш}} > 0$ ) его внутренняя энергия увеличивается (так как при этом  $\Delta U > 0$ ) и поэтому газ нагревается. И наоборот, при адиабатном расширении газа (когда  $A_{\text{внеш}} < 0$ ) его внутренняя энергия уменьшается и газ охлаждается.

Итак, поднимающийся вверх влажный воздух должен охлаждаться. Когда температура этого воздуха понижается до точки росы, то становится возможным процесс конденсации имеющегося в воздухе водяного пара. Для того чтобы этот процесс действительно произошел, необходимо, чтобы в воздухе содержалось достаточно большое число так называемых *ядер конденсации*, т. е. некоторых центров, вокруг которых могли бы концентрироваться молекулы водяного пара, образуя в конечном итоге капельки воды. Роль таких ядер могут играть ионы или мельчайшие частицы пыли, сажи или каких-либо других загрязнений индустриального происхождения. Концентрация последних составляет в среднем  $10^3$  в  $1 \text{ см}^3$  над океаном,  $10^4$  над сушей вне городов и  $10^5$  в городах<sup>1</sup>.

Когда водяной пар в поднявшемся на некоторую высоту воздухе начинает конденсироваться, появляются *облака*. В большинстве случаев облака представляют собой скопления огромного количества мельчайших капелек воды. Диаметр этих капелек составляет тысячные и сотые доли миллиметра, а их концентрация — сотни в  $1 \text{ см}^3$ . При температурах ниже  $0^\circ\text{C}$  облако может содержать кристаллики льда, размер которых в десятки раз больше, чем у капель.

Тому, что облако не падает на землю, есть несколько причин. Если капельки воды в облаке очень маленькие (доли микрометра), то им не дают падать вниз беспорядочные удары окружающих молекул воздуха. Из-за этих ударов капелька непрерывно меняет направление своего движения, перемещаясь по сложной и запутанной траектории, подобно броуновской частице. Более массивные капли могут начать падать, но сопротивление воздуха, а также его встречные (восходящие) потоки могут вскоре остановить это падение и даже отбросить эти капли вверх. Продолжающие же падение капли могут просто испариться и также не достичь земли.

После того как облако сформировалось, оно будет существовать до тех пор, пока не испарится или не выпадут *осадки* (дождь, снег, град). *Дождь* идет, как правило, из облаков, имеющих температуру ниже  $0^\circ\text{C}$  и содержащих наряду с каплями воды кристаллики льда. Выпадая из облака и попадая под ним в слои воздуха с положительной температурой, эти кристаллики тают, превращаясь в капли дождя. Зимой эти кристаллики (в виде *снежинок*) достигают поверхности земли, не растаяв. Форма снежинок может быть очень разнообразной, но преобладают, как правило, «звездочки» с 3, 6 или 12 лучами и комплексы из шестигранных кристаллических столбиков, называемые «ежами». *Град*, как правило, выпадает при сильной грозе в теплое время года, когда температура воздуха у поверхности земли выше  $20^\circ\text{C}$ . Зародыши градин образуются в облаке за счет случайного замерзания отдельных капель. Падая вниз и

<sup>1</sup> Именно поэтому городские *туманы*, образующиеся в результате охлаждения влажного воздуха при контакте с холодной земной поверхностью, отличаются, как правило, более высокой плотностью и устойчивостью.



сталкиваясь с водяными каплями, они обрастают льдом и увеличиваются в размерах. При наличии мощных восходящих потоков воздуха они могут удерживаться в облаке, пока не станут достаточно тяжелыми. После этого они выпадают на землю в виде шарообразных частиц или кусочков льда размером в среднем от 5 до 55 мм. Иногда встречаются и такие градины, размер которых превышает 10 см, а масса достигает 1 кг. Сильный град наносит большой ущерб сельскому хозяйству, уничтожая посевы, виноградники и т. п. Особенно крупные градины способны разрушить строения и нанести увечья людям и животным.

Для борьбы с градом с помощью ракет или снарядов в облако вводится специальное вещество, способствующее замораживанию капель. Благодаря этому в облаке возникает огромное количество искусственных центров кристаллизации и вода в нем перераспределяется на значительно большее число кристалликов, не позволяя образоваться отдельным крупным градинам. Падая, эти кристаллики тают в теплых слоях воздуха, не успевая достигнуть земли.



1. Какие процессы называют адиабатными? 2. Докажите, что при адиабатном расширении газ охлаждается, а при адиабатном сжатии — нагревается. 3. Из-за чего возникают облака? 4. Почему облака не падают на землю? 5. По какой причине образуется туман? 6. Расскажите о процессах возникновения дождя, снега и града.

## ИТОГИ И ОБОБЩЕНИЯ

Молекулярно-кинетический и термодинамический методы в единстве позволили нам объяснить свойства вещества в различных агрегатных состояниях и разные тепловые процессы. Правда, пока лишь для газа мы смогли рассмотреть достаточно строгую теорию, описывающую и объясняющую строение и свойства вещества. Теорию твердых тел и жидкостей многие из вас будут изучать в дальнейшем.

Изучение молекулярной физики показывает возможности человеческого разума в проникновении в мир чувственно не воспринимаемых микроскопических объектов — атомов и молекул. Этот микромир можно назвать классическим потому, что на основе законов классической механики применительно к движению каждой частицы газа можно теоретически получить законы, хорошо согласующиеся с экспериментом. Однако многие свойства твердых тел и жидкостей нельзя объяснить, полагая, будто движение частиц вещества подчиняется законам классической механики (механики Ньютона). И тем более эти законы неприменимы к объяснению движения частиц вещества внутри атомов, атомного ядра, в мире элементарных частиц. Этот еще более глубокий микромир можно назвать квантовым. К его изучению мы приступим в следующих главах.

## Глава 7. ФИЗИКА АТОМА

В V в. до н. э. Демокрит пришел к идее о существовании мельчайших и неделимых частиц, которые он назвал *атомами*. Потребовалось две с лишним тысячи лет, чтобы люди поняли, что атом делим и в природе существуют частицы, меньшие атома. В 1897 г. английский ученый Джозеф Джон Томсон открыл первую такую частицу — электрон. «Много времени спустя, — вспоминал потом Томсон, — один выдающийся физик рассказал мне, что подумал тогда, будто я всем им нарочно морочу голову. Я не был этим удивлен, ибо сам пришел к такому объяснению своих экспериментов с большой неохотой: лишь убедившись, что от опытных данных никуда не скрыться, я объявил о моей вере в существование тел, меньших, чем атомы».

Одним из тех, кто сразу поверил в существование электрона, был приехавший к Томсону из Новой Зеландии молодой ученый Эрнест Резерфорд. Услышав как-то на банкете из уст одного известного физика, что электроны, быть может, всего лишь «умозрительная концепция» и реально не существуют, Резерфорд вскочил и возбужденно воскликнул: «Электроны не существуют?! Ах, вот как! Отчего же я вижу их так же ясно, как эту ложку перед собой?»

Незадолго до этого французский ученый Анри Беккерель, работая с солями урана, открыл новое невидимое излучение, названное им «урановыми лучами»<sup>1</sup>. В 1900 г. ему удалось доказать, что обнаруженные в составе этих лучей отрицательно заряженные частицы (названные Резерфордом  $\beta$ -частицами) являются не чем иным, как электронами. Другой вид частиц, входящих в состав этих лучей, был назван  $\alpha$ -частицами; исследования, проведенные Резерфордом, показали, что это положительно заряженные частицы с массой, в несколько тысяч раз превышающей массу электрона.

После всех этих открытий, когда стало ясно, что атом может иметь сложную структуру, несколькими учеными были предложены различные теоретические модели строения атома. Наибольшую популярность из них получила модель, предложенная Дж. Дж. Томсоном. В историю физики она вошла под названием «пудинг с изюмом».

Согласно Томсону, атом имел вид положительно заряженного по всему объему шара, внутри которого (словно изюминки) находились электроны. Пытаясь согласовать эту модель с данными спектроскопии и периодическим законом Д. И. Менделеева, Томсон был вынужден



Эрнест Резерфорд

<sup>1</sup> Потом эти лучи стали называть *радиоактивным излучением*.



распределить атомные электроны по концентрическим кольцам, приписав каждому из электронов собственную частоту колебаний, совпадающую с одной из частот спектра излучения атома. В результате этого модель усложнилась настолько, что даже в простейший из атомов — атом водорода — пришлось включить около тысячи электронов!

В действительности атом оказался значительно проще. Но установить это довелось не Дж. Дж. Томсону, а его ученику — Э. Резерфорду.

## § 42. ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ АТОМА

В один из мрачных декабрьских дней 1910 г. Резерфорд ворвался в лабораторию университета Виктории в Манчестере и, обращаясь к работавшему там Гансу Гейгеру, воскликнул: «Ганс, теперь я знаю, как выглядит атом!»

Прошло уже больше года с тех пор, как Резерфорд со своими ассистентами Э. Марсденом и Г. Гейгером начали экспериментальные исследования внутренней структуры атома. И вот, наконец, разгадка тайны строения атома стала реальной.

Применяемый ими метод заключался в рассеянии  $\alpha$ -частиц атомами золотой фольги. Золото было выбрано из-за того, что оно легко расплющивается, и потому толщину фольги можно было сделать очень тонкой (около 400 нм).

Опыты проводились с помощью установки, схема которой показана на рисунке 95. Испускаемый радиоактивным препаратом узкий пучок  $\alpha$ -частиц проходил через тонкую фольгу, по своей тормозящей способности эквивалентной слою воздуха толщиной 1,6 мм, после чего попадал на экран, покрытый сернистым цинком. При ударе об этот экран  $\alpha$ -частицы вызывали слабые вспышки света (сцинтилляции), которые можно было наблюдать в темноте через микроскоп. Конструкция прибора позволяла поворачивать микроскоп вместе с экраном вокруг вертикальной оси, проходящей через центр установки, и благодаря этому подсчитывать число  $\alpha$ -частиц, рассеянных под разными углами  $\theta$ .

Подсчет рассеянных частиц дал следующие результаты:

1) большинство  $\alpha$ -частиц проходило через фольгу почти беспрепятственно, отклоняясь на углы, не превышающие  $1-2^\circ$ ;

2) небольшая часть  $\alpha$ -частиц рассеивалась на углы  $\theta > 2^\circ$ , и примерно одна из каждых 20 000 отклонялась на углы в 90 и более градусов (т. е. назад).

Последнего результата никто не ожидал, так как все в то время придерживались модели Томсона, согласно



Рис. 95

которой атомы представлялись настолько «рыхлыми», что не были способны вызвать столь значительные отклонения частиц. Много позже Резерфорд рассказал, как к нему «пришел страшно возбужденный Гейгер и сказал: «Нам удалось наблюдать  $\alpha$ -частицы, возвращающиеся назад». Это было самым невероятным событием, которое мне пришлось пережить. Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в листок папиросной бумаги, и он вернулся бы назад и угодил бы в вас. Поразмыслив, я понял, что это обратное рассеяние должно быть результатом однократного столкновения<sup>1</sup>, а когда я произвел расчеты, то увидел, что невозможно получить величину того же порядка, разве что вы рассматриваете систему, в которой большая часть массы атома сконцентрирована в малом ядре».

Для теоретического анализа полученных данных необходимо было знать теорию вероятностей. Чтобы ликвидировать пробелы в знаниях этого раздела математики, Резерфорд не постеснялся вновь сесть на студенческую скамью, вызвав удивление собственных студентов, неожиданно увидевших своего профессора рядом с собой.

Проанализировав данные о количестве  $\alpha$ -частиц, рассеянных на различные углы, Резерфорд пришел к выводу о том, что модель Томсона неверна и атом напоминает, скорее, Солнечную систему, только вместо Солнца в нем находится ядро, а вместо планет — электроны. Так появилась ядерная (или планетарная) модель строения атома. Особенности этой модели сводятся к следующим положениям:

1. Атом в основном пустой<sup>2</sup> и состоит из расположенного в его центре положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов.

2. Ядро имеет заряд  $+Ze$  (где  $Z$  — порядковый номер элемента в таблице Д. И. Менделеева)<sup>3</sup>; имеет размеры, в десятки тысяч раз меньшие размеров атома, и обладает массой, составляющей 99,96% массы всего атома.

3. Вокруг ядра под действием кулоновских электрических сил обращается  $Z$  электронов. Суммарный заряд этих электронов равен  $-Ze$ , так что в целом атом нейтрален.

<sup>1</sup> Объяснение полученных данных на основе представления о многократном столкновении  $\alpha$ -частицы со многими атомами противоречит теории вероятностей. Двигаясь сквозь вещество,  $\alpha$ -частица испытывала бы в этом случае попеременные отклонения в противоположные стороны, что в среднем давало бы значение угла рассеяния, близкое к нулю. Для рассеяния «назад» необходимо, чтобы в результате каждого столкновения  $\alpha$ -частица отклонялась все время в одну и ту же сторону, что совершенно невероятно.

<sup>2</sup> О том, насколько много в атоме пустоты, можно судить по следующему факту. Если бы все электроны человеческого тела прижались к своим ядрам так, чтобы внутриатомной пустоты в теле не осталось, то человек превратился бы в пылинку, едва различимую с помощью лупы.

<sup>3</sup> Впервые это было установлено в 1913 г. А. Ван ден Брукром.



Предложенная Резерфордом ядерная модель атома объяснила наблюдаемое на опыте рассеяние  $\alpha$ -частиц действием на них кулоновского электрического поля атомного ядра. На рисунке 96 изображены траектории  $\alpha$ -частиц, пролетающих мимо ядра на различных расстояниях. Видно, что из огромного числа  $\alpha$ -частиц рассеиваются «назад» будут лишь те, которые налетают непосредственно на ядро, но из-за чрезвычайно малых размеров ядра (по сравнению с размером всего атома) их количество будет ничтожно.

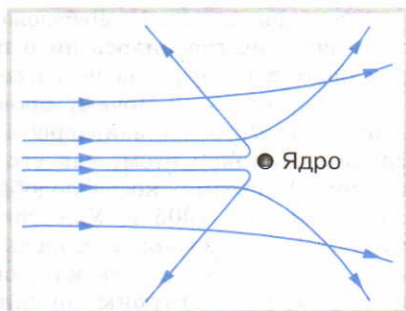


Рис. 96

Ядерная модель атома оказалась очень изящной и намного более простой, чем модель атома Томсона. Резерфорд был доволен. Еще бы! Ведь он оказался первым человеком, которому открылась тайна строения атома.

?

1. Какая модель строения атома была предложена Дж. Дж. Томсоном?
2. Расскажите об опытах Резерфорда и их результатах.
3. Что представляют собой  $\alpha$ -частицы?
4. В чем заключаются основные особенности ядерной модели атома?
5. Как объясняются результаты опыта Резерфорда с точки зрения предложенной им модели строения атома?
6. Почему при объяснении наблюдаемого рассеяния  $\alpha$ -частиц не учитывалось гравитационное поле атомного ядра?
7. Можно ли объяснить результаты опыта Резерфорда взаимодействием  $\alpha$ -частиц с атомными электронами? Почему?
8. Чему равен заряд ядра атома золота?
9. Сколько электронов находится в атоме водорода? золота? урана?

## § 43. ПОСТУЛАТЫ БОРА

О результатах своих исследований Резерфорд сообщил в феврале 1911 г. Через три месяца его доклад был опубликован, и мир узнал о новой, планетарной модели атома. Осенью того же года состоялся первый Сольвеевский конгресс в Брюсселе, на который приехали выдающиеся физики Европы: М. Планк, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Х. А. Лоренц, В. Нернст и др. Среди приглашенных был и Э. Резерфорд. С волнением он ожидал оценки своей работы. И что же он услышал? Ничего. О предложенной им модели атома не было сказано ни слова. Вообще-то председательствующий на конгрессе Лоренц говорил о достоинствах атомной модели, только не резерфордовской, а той, «которая была предложена сэром Дж. Дж. Томсоном».

Таким образом, научный мир не принял всерьез модель атома Резерфорда. Об этом говорил и тот факт, что в статье известного

русского физика П. Н. Лебедева «Успехи физики в 1911 году» также ничего не говорилось ни о планетарной модели, ни о результатах опытов Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц.

В чем же дело? Почему проведенные Резерфордом исследования структуры атома не заинтересовали ученых? А дело в том, что все знали, что такой атом, как его описывал Резерфорд, существовать не мог! О невозможности подобной модели немецкий физик В. Вин говорил еще в 1905 г. Уже тогда было обращено внимание на то, что любая планетарная модель атома обречена, так как обладает очень серьезным недостатком: она неустойчива. Ведь вращающиеся вокруг ядра электроны должны обладать центростремительным ускорением, а любой ускоренно движущийся заряд (согласно классической электродинамике) должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Теряя энергию на излучение, электроны должны по спирали (причем за время порядка  $10^{-9}$  с) упасть на ядро, и атом, как таковой, должен перестать существовать.

Знал ли сам Резерфорд об этом? Знал, конечно. Но что он мог сделать, если результаты его экспериментов говорили о том, что атом устроен именно так?! Объяснить возникшее противоречие он не мог и потому в своей основополагающей работе 1911 г. лишь кратко заметил: «Вопрос об устойчивости атома рассматриваемого строения нет надобности обсуждать на этом этапе, так как устойчивость, несомненно, зависит от тонкостей строения атома и от движения его заряженных составных частей».

В 1912 г. в Манчестер к Резерфорду приехал двадцатилетний датский физик Нильс Бор. До этого он в течение нескольких месяцев стажировался в Кембридже у Дж. Дж. Томсона. Когда Бора потом спросили, был ли в то время в Кембридже хоть кто-нибудь, кто принимал атом Резерфорда всерьез, Бор ответил: «Нет». На самого же Бора ядерная модель атома произвела огромное впечатление. «Я поверил в нее тотчас!» — вспоминал он потом.

Пробыв в Манчестере около четырех месяцев, Бор «заболел» атомом. Занятия наукой стали для него не службой, а страстью («страданием мыслей, лежащих на сердце»). Постоянно и мучительно размышляя над проблемой устойчивости планетарного атома, Бор пришел к убеждению, что «этот вопрос просто невозможно решить посредством уже известных правил». Бор понял, что не все законы классической физики применимы к явлениям атомных масштабов и что для описания свойств атомов нужна новая — квантовая — теория.

Попытку учесть в теории атома квантовые представления до этого предпринял лишь австрийский физик А. Гааз. В рабо-



Нильс Бор



те 1910 г. он приравнивал энергию электрона в модели атома Томсона к величине  $h\nu$ . Однако когда Гааз представил свою работу в качестве диссертации, то его подняли на смех, назвав проделанное им исследование «карнавальной шуткой», и диссертация провалилась.

В отличие от Гааза, Бор опирался на ядерную модель атома и применил формулу Планка не ко всей энергии атома, а лишь к ее изменению в процессе излучения и поглощения света. Принципиально новым в теории Бора было и то, что он допустил существование в атоме таких состояний, в которых движущиеся с ускорением электроны не излучают электромагнитных волн. Да, существование таких состояний противоречило законам классической электродинамики, но, вместо того чтобы отказаться из-за этого от планетарной модели (как поступали другие физики), Бор считал сами эти законы несправедливыми в области атомных явлений. После нескольких месяцев работы Бор в 1913 г. опубликовал свою квантовую теорию атома. Основу этой теории составляют три постулата.

В первом постулате Бора утверждается существование в атоме таких состояний, в которых ускоренно движущиеся электроны не излучают электромагнитных волн:

Атом может находиться не во всех состояниях, допускаемых классической физикой, а только в особых, квантовых (или стационарных) состояниях, каждому из которых соответствует своя определенная энергия  $E_n$ . В стационарном состоянии атом не излучает.

Во втором постулате Бора описывается процесс излучения и поглощения света:

При переходе атома из одного стационарного состояния в другое излучается или поглощается квант света с энергией  $\hbar\omega$ , равной разности энергий стационарных состояний:

$$\hbar\omega = |E_m - E_n|.$$

В третьем постулате Бора говорится о квантовании электронных орбит:

В стационарном состоянии электрон может двигаться только по такой («разрешенной») орбите, радиус которой удовлетворяет условию:

$$mvr = n\hbar,$$

где  $mv$  — импульс электрона;  $n$  — номер квантового состояния ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

По аналогии с моментом силы (с физической величиной, характеризующей вращательное действие силы и определяемой как произведение силы на плечо — расстояние от оси вращения до линии действия силы) физическую величину, равную произведению импульса вращающегося объекта на радиус окружности, по которой происходит вращение, можно назвать **моментом импульса**. Момент импульса характеризует объект, участвующий именно во вращательном движении. Тогда можно сказать, что третий постулат Бора говорит о квантовании момента импульса электрона в атоме.

Применив свою теорию к простейшему из атомов — атому водорода, Бор получил результаты, полностью согласующиеся с экспериментальными данными. Теорию атома водорода мы рассмотрим в следующем параграфе. Здесь же лишь заметим, что энергия атома водорода в  $n$ -м стационарном состоянии, согласно Бору, определяется выражением

$$E_n = -Ry/n^2, \quad (43.1)$$

где  $1 Ry = 2,18 \cdot 10^{-18}$  Дж = 13,6 эВ — внесистемная единица энергии, называемая *ридбергом* (в честь шведского физика Й. Р. Ридберга).

**Определение.** Целое число  $n$ , определяющее номер квантового состояния и энергию атома в этом состоянии, называется **главным квантовым числом**.

Каждое значение энергии, которой обладает атом в том или ином стационарном состоянии, называют *энергетическим уровнем*. Чем больше  $n$ , тем дальше от ядра находится электрон и тем выше его энергетический уровень.

Энергетические уровни атома принято изображать горизонтальными линиями, а переходы атома из одного стационарного состояния в другое — стрелками (рис. 97).

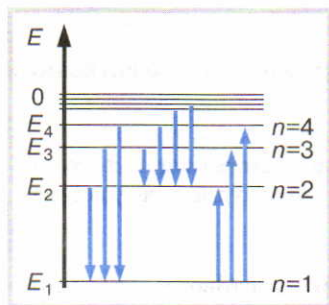


Рис. 97

Когда атом переходит с более высокого на более низкий уровень (чему соответствует «перескок» электрона на более близкую к ядру орбиту), то происходит излучение кванта света.

При поглощении, наоборот, падающий на атом квант (фотон) переводит атом из состояния с меньшей в состояние с большей энергией; сам фотон при этом исчезает, а поглотивший его электрон оказывается на более далекой от ядра орбите.

Состояние атома с  $n=1$  называют *основным* или *нормальным* состоянием.



ем. В этом состоянии энергия атома минимальна, и он может находиться в нем (при отсутствии внешних воздействий) сколь угодно долго.

Все остальные состояния с  $n > 1$  называют *возбужденными*. В возбужденном состоянии атом может находиться в течение очень малого промежутка времени (порядка  $10^{-8}$  с), после чего самопроизвольно переходит в основное состояние (сразу или поэтапно, уровень за уровнем), излучая при этом соответствующие кванты. Набор их частот образует **линейчатый спектр излучения**:

$$\omega = \frac{1}{h}(E_m - E_n), \quad (43.2)$$

где  $E_m$  — энергия атома в начальном состоянии;  $E_n$  — его энергия в конечном состоянии. Обратные переходы дают линейчатый спектр поглощения:

$$\omega = \frac{1}{h}(E_n - E_m).$$

Поскольку в каждом атоме прямые и обратные переходы совершаются между одними и теми же энергетическими уровнями, то оба эти спектра совпадают.

Теория Бора позволила объяснить и то, почему у атомов каждого химического элемента свой, совершенно определенный линейчатый спектр. Такая индивидуальность атомных спектров обусловлена тем, что у одинаковых атомов одинаковы и схемы расположения энергетических уровней.

У атомов же различных химических элементов разные схемы энергетических уровней, поэтому и линейчатые спектры у них тоже разные.



1. Почему большинство ученых отрицательно отнеслись к модели атома Резерфорда?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. По какой формуле находится энергия атома водорода в стационарном состоянии?
4. Что такое главное квантовое число?
5. Чему равна энергия атома водорода в основном состоянии?
6. Как в теории Бора объясняются спектральные закономерности?
7. Решите «детские задачи» Бора о кошке с тремя хвостами:
  - 1) Верно ли, что для получения кошки с тремя хвостами нужно кошке с двумя хвостами добавить хвост обычной кошки?
  - 2) Представьте себе несуществующую кошку с двумя хвостами. У настоящей кошки наверняка на один хвост больше, чем у кошки, которой нет. Тогда, значит, у настоящей кошки могут быть три хвоста! Найдите в этом рассуждении логическую ошибку.

## § 44. АТОМ ВОДОРОДА

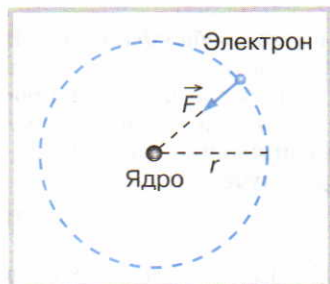


Рис. 98

Рассмотрим модель атома Бора на примере простейшего из атомов — атома водорода ( $Z=1$ ). В этом атоме вокруг атомного ядра с зарядом  $q_1=+e$  обращается один электрон с зарядом  $q_2=-e$  (рис. 98). На этот электрон действует кулоновская сила

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2},$$

сообщающая электрону центростремительное ускорение  $a=v^2/r$ . По второму закону Ньютона

$$m \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}. \quad (44.1)$$

Использование этого уравнения<sup>1</sup> совместно с постулатами Бора позволяет определить радиус атома водорода, скорость движения электрона внутри его, его энергетические уровни, а также спектр излучения.

### 1. Радиус атома водорода

Из третьего постулата Бора следует, что скорость, с которой движется электрон по орбите радиусом  $r$ , равна:

$$v = \frac{n\hbar}{mr}. \quad (44.2)$$

Подставляя это выражение в уравнение (44.1), после несложных преобразований получаем

$$r = \frac{\hbar^2}{kme^2} n^2. \quad (44.3)$$

Эта формула показывает, что радиусы стационарных орбит имеют дискретные значения, пропорциональные квадрату целого числа  $n$ . В основном состоянии (когда  $n=1$ ) атом водорода имеет минимальные размеры, определяемые выражением

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kme^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}. \quad (44.4)$$

При переходе атома в возбужденные состояния ( $n=2, 3, \dots$ ) его радиус увеличивается по закону  $r=r_1 n^2$ , причем никаких принципиальных ограничений на это увеличение нет. В 1964 г. радиоастрономами было зарегистрировано излучение атомов водорода, находящихся в состояниях с  $n=90$  и  $n=91$ . Позже в глубоком космосе были обнаружены атомы водорода с  $n > 200$ . Но наиболее

<sup>1</sup> Через  $k$  в этом уравнении обозначена постоянная Кулона ( $k=9 \cdot 10^9 \text{ Н} \times \text{м}^2/\text{Кл}^2$ ).



интересным было открытие атомов углерода в состояниях с  $n = 732$  и  $n = 733$ . Диаметры этих «гигантских» атомов в сотни тысяч раз превышают величину, определяемую выражением (44.4), и достигают 0,05 мм!

## 2. Скорость движения электрона

Скорость электрона на орбите радиусом  $r$  определяется выражением (44.2). Подставляя в это выражение значение (44.3), получаем

$$v = k \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n}. \quad (44.5)$$

Полученная формула показывает, что с увеличением числа  $n$  скорость электрона убывает. Максимальную скорость электрон имеет на первой бортовой орбите ( $n = 1$ ):

$$v_1 = k \frac{e^2}{\hbar} = \frac{c}{137}. \quad (44.6)$$

Но даже и здесь она приблизительно в 137 раз меньше скорости света. Этим и оправдывается то, что в основу теории атома было положено классическое, а не релятивистское уравнение движения.

## 3. Энергия атома водорода

При классическом (не релятивистском) рассмотрении полную энергию атома  $E$  можно представить в виде суммы кинетических энергий электрона и атомного ядра и потенциальной энергии их взаимодействия. Будем считать ядро покоящимся. Тогда в энергию атома войдет только кинетическая энергия электрона:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = k \frac{e^2}{2r}$$

(в последнем равенстве учтено уравнение (44.1)) и потенциальная энергия кулоновского взаимодействия:

$$W = k \frac{q_1 q_2}{r} = -k \frac{e^2}{r}.$$

Таким образом,

$$E = k \frac{e^2}{2r} - k \frac{e^2}{r} = -k \frac{e^2}{2r}. \quad (44.7)$$

Мы видим, что энергия атома отрицательна и с увеличением радиуса  $r$  возрастает. Подставляя в последнее выражение значение (44.3), получаем

$$E_n = -\frac{k^2 m e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (44.8)$$

или

$$E_n = -\frac{Ry}{n^2},$$

где

$$1Ry = \frac{k^2 m e^4}{2\hbar^2} = 13,6 \text{ эВ}. \quad (44.9)$$

Энергией  $E_1 = -13,6$  эВ атом водорода обладает в своем основном состоянии. При переходе в возбужденные состояния его энергия возрастает.

Минимальную энергию, которую нужно затратить для удаления электрона с первой боровской орбиты на «бесконечность», называют энергией ионизации  $W_i$  или энергией связи атома водорода.

Докажем, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ. Действительно, если электрону, находящемуся на первой боровской орбите и обладающему, следовательно, энергией  $E_1$ , сообщить энергию  $W_i$ , достаточную для удаления его на «бесконечность» (т. е. на такое состояние от ядра, где его взаимодействием с ним можно пренебречь и где энергия электрона равна нулю), то по закону сохранения энергии

$$E_1 + W_i = 0,$$

откуда

$$W_i = -E_1 = 13,6 \text{ эВ.} \quad (44.10)$$

Таким образом, для ионизации атома водорода, находящегося в основном состоянии, ему необходимо сообщить энергию  $\Delta E = W_i = 13,6$  эВ. Если же ему будет передаваться энергия  $\Delta E < W_i$ , то при  $\Delta E = E_n - E_1$  атом перейдет в состояние с энергией  $E_n$ , а при  $\Delta E \neq E_n - E_1$  поглощения энергии не произойдет и атом останется в прежнем состоянии.

Такой (скачкообразный) характер поглощения энергии должен наблюдаться для атомов любого химического элемента. Для атомов ртути он был обнаружен уже в 1913 г. немецкими физиками-экспериментаторами Д. Франком и Г. Герцем. Их опыты подтвердили существование в атомах дискретных энергетических уровней, что сыграло важнейшую роль в развитии квантовой теории атома.

#### 4. Спектр излучения атома водорода

Согласно второму постулату Бора излучение света происходит при переходе атома с верхних на нижние энергетические уровни. Излучаемые при этом фотоны будут обладать частотами, определяемыми формулой (43.2). Переходя в ней от циклической к обычной частоте и заменяя соответственно «новую» постоянную Планка на «старую», запишем эту формулу в виде

$$\nu = \frac{1}{h}(E_{n_1} - E_{n_2}). \quad (44.11)$$

Подставляя сюда значения энергии атома в начальном и конечном состояниях ( $E_{n_1} = -Ry/n_1^2$ ,  $E_{n_2} = -Ry/n_2^2$ ), получаем

$$\nu = \frac{Ry}{h} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \quad (44.12)$$



Отношение ридберга к произведению постоянной Планка и скорости света в вакууме обозначают одной буквой  $R$  и называют **постоянной Ридберга**:

$$R = \frac{Ry}{hc} = 109,7 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}. \quad (44.13)$$

С учетом этого формулу (44.12) часто записывают в виде

$$v = cR \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right).$$

Всевозможные частоты, определяемые этим выражением, и дают спектр излучения атома водорода.

Теория Бора приводит к правильным результатам не только в случае атома водорода, но и в случае *водородоподобных ионов*, т. е. таких ионов, в которых вокруг ядра обращается только 1 электрон. Примерами таких ионов являются однократно ионизованные атомы гелия ( $\text{He}^+$ ), дважды ионизованные атомы лития ( $\text{Li}^{++}$ ) и т. д. Поскольку ядра этих ионов имеют заряд  $q_1 = Ze$ , то вместо  $e^2$  в формуле (44.3) теперь следует писать  $Ze^2$ . Из-за этого радиус водородоподобных ионов оказывается в  $Z$  раз меньше, чем у атома водорода.

К водородоподобным атомам относят также системы, содержащие открытую в конце 30-х гг. частицу, называемую *мюоном*. Масса этой частицы примерно в 200 раз больше, чем у электрона, а заряд может быть как отрицательным (тогда эта частица обозначается  $\mu^-$ ), так и положительным (тогда она обозначается  $\mu^+$ ).

Различают два вида водородоподобных систем, содержащих мюон, — *мюоний* и *мюонный атом*. В первой из них положительный мюон играет роль атомного ядра, вокруг которого обращается один электрон. Такой «атом» очень похож на атом водорода, но в отличие от него является нестабильным: через время порядка  $10^{-6}$  с он распадается на элементарные частицы.

В мюонном атоме, наоборот, существует обычное атомное ядро, но вместо электрона вокруг него обращается отрицательно заряженный мюон. Радиус такого атома определяется так же, как и радиус обычного водородоподобного иона:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kmZe^2}.$$

Однако под  $m$  в этой формуле теперь следует понимать массу мюона, которая в 200 раз больше, чем у электрона. Поэтому при значительном  $Z$  радиус орбиты мюона может оказаться меньше радиуса атомного ядра! Например, у мюонного атома свинца он оказывается в 2 раза меньше, чем у ядра. Это означает, что мюон в таком атоме движется не вокруг, а внутри атомного ядра!



1. Почему в теории атома можно обойтись без использования законов теории относительности? 2. Во сколько раз атом водорода во втором стационарном состоянии больше, чем в первом? 3. Во сколько раз скорость движения электрона по второй боровской орбите меньше, чем по первой? 4. Во сколько раз скорость электрона на седьмой боровской орбите меньше скорости света в вакууме? 5. Во сколько раз увеличивается энергия атома водорода при его переходе из основного во второе квантовое состояние? 6. Как изменяется «расстояние» между соседними энергетическими уровнями атома при увеличении  $n$ ? 7. Что такое постоянная Ридберга? 8. Во сколько раз ион  $\text{He}^+$  меньше атома водорода?

## § 45. ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Выше уже говорилось, что в возбужденном состоянии атом может находиться лишь в течение очень малого промежутка времени, после чего самопроизвольно (спонтанно) переходит в основное состояние, излучая при этом квант света. Это излучение происходит при отсутствии внешнего воздействия на атом и обусловлено лишь неустойчивостью его возбужденного состояния.

Если никакого воздействия на атом не оказывается, то время его пребывания в возбужденном состоянии («время жизни» возбужденного состояния) порядка  $10^{-8}$  с. Если же атом подвергается внешнему воздействию, то время жизни его возбужденного состояния сокращается и возникает излучение, которое называют **вынужденным** или **индуцированным излучением**.

Понятие о вынужденном излучении было введено в 1916 г. Альбертом Эйнштейном. Это излучение происходит в результате воздействия на возбужденный атом кванта света, частота которого совпадает с частотой его самопроизвольного излучения. Атом при этом переходит на более низкий энергетический уровень, и к первичному, распространяющемуся от внешнего источника фотону добавляется еще один фотон, ничем не отличающийся от первого.

В обычных условиях атомы вещества, сквозь которое пропускают электромагнитное излучение, никогда его не усиливают, так как этому препятствует процесс поглощения света. Однако в 1940 г. советский физик В. А. Фабрикант предложил использовать вынужденное излучение для усиления света. В 1945 г. А. М. Прохоров и Н. Г. Басов в СССР и независимо от них Ч. Таунс, Д. Гордон и Х. Цейгер в США создали квантовый генератор, в котором вынужденное излучение преобладало над поглощением, в результате чего генерировалось мощное электромагнитное излучение радиодиапазона. Созданный ими генератор получил название «мазер» («maser»), представляющее собой аббревиатуру английского выражения «microwave amplification by stimulated emission of radiation» (что в переводе означает «усиление микроволн с помощью вынужденного излучения»).

Через 6 лет американскому ученому Т. Мейману удалось создать



квантовый генератор, в котором, в отличие от лазера, генерировалось излучение не радио-, а оптического диапазона. Новый генератор получил название «лазер» («laser»), что является аббревиатурой того же самого английского выражения, только первым словом в нем теперь является «light»<sup>1</sup>.

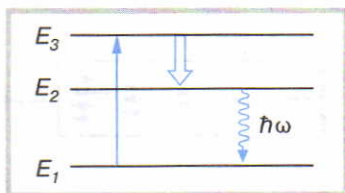


Рис. 99

**Лазер** — это источник света, работающий на принципе вынужденного излучения. В настоящее время существует много разных типов и конструкций подобных источников. Рассмотрим принцип их действия на примере рубинового лазера. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия  $Al_2O_3$ , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома  $Cr^{3+}$ . С помощью мощного импульса лампы-вспышки, воздействие которой называют «оптической накачкой», ионы хрома переводятся из основного состояния в возбужденное (уровень  $E_3$  на рис. 99). Через очень короткий промежуток времени ( $10^{-8}$  с) эти ионы самопроизвольно (и не излучая света<sup>2</sup>) переходят на более низкий энергетический уровень  $E_2$ , на котором они могут находиться в 100 тысяч раз дольше, чем на обычном возбужденном уровне. Благодаря этому на уровне  $E_2$  (который называют *метастабильным*) удастся накопить более 50% всех ионов хрома. Из-за такой «перенаселенности» возбужденного уровня (по сравнению с основным) и появляется возможность усиления света с помощью вынужденного излучения.

Действительно, если теперь в кристалле появится фотон с энергией  $\hbar\omega = E_2 - E_1$  (например, в результате какого-либо случайного самопроизвольного перехода иона хрома с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ ), то, встречая на своем пути другие ионы, он вынудит их переходить в основное состояние с испусканием новых фотонов. Те, в свою очередь, приведут к появлению следующих и т. д. Возникнет лавинообразное нарастание числа излучаемых фотонов, ничем не отличающихся друг от друга.

Если рубину придать форму цилиндрического стержня с параллельными отполированными торцами, один из которых сделать полупрозрачным, а другой зеркально отражающим свет, то через первый из них выйдет мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны  $\lambda = 694,3$  нм (рис. 100).

Рубиновый лазер работает в импульсном режиме. В лазерах другого типа с помощью длительной (непрерывной) накачки можно по-

<sup>1</sup> Аналогичные источники рентгеновского излучения (рентгеновские лазеры) называют разерами, а источники гамма-излучения — гразерами (от слова «gamma-rays»).

<sup>2</sup> Избыток энергии при этом передается непосредственно от ионов хрома кристаллической решетке вещества, вследствие чего рубин нагревается.

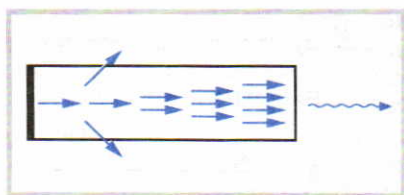


Рис. 100

обращает в пар любое вещество) позволяет использовать его в самых различных областях науки, техники и медицины.

- ? 1. Чем отличается вынужденное (индуцированное) излучение от спонтанного? 2. Что означают слова «мазер», «лазер», «разер» и «гразер»? 3. Расскажите о принципе действия рубинового лазера. 4. Используя дополнительную литературу, подготовьте доклад о применении лазеров.

### Для дополнительного чтения

## § 46. ВОЗНИКНОВЕНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Весной 1913 г. Нильс Бор получил от Резерфорда письмо, в котором тот писал:

«Дорогой д-р Бор.

...Ваши взгляды на механизм рождения водородного спектра очень остроумны и отлично разработаны. Однако сочетание идей Планка со старой механикой делает весьма затруднительным физическое понимание основы такого механизма. Мне кажется, что есть серьезный камень преткновения в Вашей гипотезе: ...как решает электрон — с какой частотой должен он колебаться, когда происходит переход из одного стационарного состояния в другое? Мне кажется, Вы будете вынуждены допустить, что электрон заранее знает, где он собирается остановиться...»

Это письмо Бор запомнил на всю жизнь. Даже спустя 48 лет, находясь в Москве, на вопрос о том, как отнесся Резерфорд к его теории, Бор ответил: «Резерфорд не сказал, что это глупо, но он никак не мог понять, каким образом электрон, начиная прыжок с одной орбиты на другую, узнает, какой квант ему нужно излучать...»

Других ученых в теории Бора больше всего раздражало то, что в ней ускоренно движущийся вокруг ядра электрон не излучал электромагнитных волн. «Это вздор! — считал немецкий физик Макс фон Лауэ. — Электрон на орбите должен излучать!» А Отто Штерн даже поклялся, что «бросит физику, если эта нелепость окажется правдой».



Бору удалось создать «сумасшедшую» теорию, объясняющую множество фактов из мира атомов: почему атомы имеют именно такие размеры? Почему для ионизации атома водорода нужна энергия именно 13,6 эВ? Почему спектр излучения атомов линейчатый, а не сплошной? И т. д. На все эти вопросы теория Бора дала разумный ответ. «Это кажется мне чудом и теперь, — много лет спустя говорил Эйнштейн. — Это — наивысшая музыкальность в области мысли».

Любопытно, что сам Бор, хотя и использовал в своей теории квантовые представления, в реальность эйнштейновских световых квантов в то время не верил. В своих исследованиях он предпочитал ограничиваться гипотезой Планка. Свет он по-прежнему считал обычными электромагнитными волнами. Даже спустя 10 лет он продолжал притрагиваться этой точки зрения. «Если бы Эйнштейн послал мне телеграмму с сообщением, что отныне он владеет окончательным доказательством реальности световых частиц, — говорил Бор, — даже тогда эта телеграмма, переданная по радио, сумела бы добраться до меня только с помощью электромагнитных волн».

Пытаясь совместить гипотезу Планка с классической физикой, Бор построил внутренне противоречивую теорию. Третий постулат Бора, по которому квантовались орбиты электрона, противоречил законам классической механики, допускающим любые значения  $r$ , удовлетворяющие второму закону Ньютона. Между тем Бор использовал в своей теории как то, так и другое. Поэтому неудивительно, что теория Бора приводила к правильным результатам не во всех случаях, а лишь в случае атома водорода и водородоподобных систем. Построить на основе боровских представлений точную количественную теорию атома гелия, не говоря уже о более сложных атомах, не удалось. По этому поводу даже появилось язвительное замечание: «Атом Бора — это не атом бора, а атом водорода».

Нильс Бор знал о недостатках своей теории, но, как и Резерфорд при публикации своей работы, ничего поделать не мог. Он понимал, что это не окончательная теория, но надо же было с чего-то начать.

В последующие годы Бор работал над совершенствованием своей теории, пытаясь объяснить строение сложных атомов и даже молекул. При этом в рассмотрение были введены не только круговые, но и эллиптические орбиты электронов.

Участвуя во многих семинарах, Бору часто приходилось затрагивать очень сложные проблемы. Как-то один из его студентов пожаловался ему, что у него от всего этого голова идет кругом. «Если кто-нибудь скажет, что у него не кружится голова, когда он думает о квантовых проблемах, значит, он ничего в них не понимает», — ответил Бор.

В 1920 г. Бор возглавил созданный им же Институт теоретической физики в Копенгагене, который стал международным центром физиков-теоретиков. Вскоре ему удалось объяснить многие закономерности, связанные с периодической системой химических элементов. Его работа, в которой он излагал свои результаты, попала



Вернер Гейзенберг

студенту Мюнхенского университета Вернеру Гейзенбергу. Из нее Гейзенберг узнал о сложной структуре атомов, содержащих десятки электронов. «Нам никак не удавалось понять, — вспоминал потом Гейзенберг, — каким образом Бор сумел получить эти результаты. Нам казалось, что он должен быть беспрельдно гениальным математиком, чтобы решить такую невероятную проблему...»

В 1922 г. Гейзенбергу довелось присутствовать на лекциях Бора. После одной из них он вступил с ним в дискуссию. Несмотря на то что Гейзенбергу в то время было всего лишь 20 лет, Бор пригласил его для обсуждения поднятых вопросов на загородную прогулку.

«Именно тогда, — рассказал потом Гейзенберг, — я понял, что значит работать в совершенно новой области в теоретической физике. Первое, что я узнал, — и это буквально потрясло меня, — что Бор ничего не вычислял. Он просто угадывал свои результаты. Он знал экспериментальную ситуацию в химии, знал валентность различных атомов и знал, что его идея квантования орбит или, скорее, идея стабильности атомов, объясняемая с помощью явления квантования, согласовывалась в какой-то мере с экспериментом в химии. Исходя из этого, он просто угадывал то, что преподносил нам потом как свои результаты. Я спросил его, действительно ли он верит, что эти результаты можно получить с помощью вычислений, основанных на классической механике? Он ответил: «По этому поводу я думаю, что моя классическая модель атомов — наилучшая из возможных классических моделей». И он объяснил это следующим образом. Он сказал: «Мы проникли в новую область физики, в которой мы знаем, что старые понятия, по-видимому, не работают. Мы видим, что они не работают, так как иначе атом не был бы стабильным. С другой стороны, если мы хотим говорить об атомах, мы должны употреблять слова, а эти слова можно брать только из старых понятий, из старого лексикона. Поэтому мы находимся перед безнадежной дилеммой, мы как матросы, попавшие на далекий неизвестный берег. Они видят незнакомую страну и людей, чей язык они никогда не слышали, и поэтому не знают, как вступить с этими людьми в контакт. В той мере, в какой классические концепции работают, т. е. в той мере, в какой мы можем говорить о движении электронов, об их скоростях, энергии и т. п., мои модели, я думаю, корректны, или, во всяком случае, я надеюсь, что они корректны. Но никто не знает, как далеко справедлив наш язык».

Беседа с Бором произвела на Гейзенберга очень сильное впечатление. Бор признался ему, что «никогда не воспринимал выражение *планетарный атом* буквально».



Гейзенберг понял, что устойчивость атома свидетельствует о том, что он не может представлять собой уменьшенную копию Солнечной системы. Да, в нем есть ядро и есть обращающиеся вокруг него электроны. Но их движение не имеет ничего общего с движением планет. «Никакая планетная система, — писал Гейзенберг, — которая подчиняется законам механики Ньютона, никогда после столкновения с другой подобной системой не возвратится в свое исходное состояние. В то время как, например, атом углерода остается атомом углерода и после столкновения с другими атомами или после того, как он, вступив во взаимодействие с другими атомами, образовал химическое соединение».

После беседы с Бором Гейзенберг пришел к выводу, что в последовательной и логической непротиворечивой теории атома нельзя использовать законы ньютоновской механики и потому следует отказаться от такого классического понятия, как «электронная орбита». Иначе будет невозможно объяснить, почему свойства атомов так отличаются от свойств планетных систем. Эти отличия носят принципиальный характер и могут быть сформулированы следующим образом:

1) атомы одного и того же элемента (в основном состоянии) всегда имеют совершенно определенные и одинаковые размеры, в то время как размеры орбит одинаковых спутников у одной и той же планеты могут быть любыми;

2) атомы устойчивы и сохраняют свою индивидуальность, несмотря на столкновения друг с другом, в то время как столкновение двух планетных систем до неузнаваемости изменило бы каждую из них;

3) если в результате каких-либо причин форма и размеры атома будут изменены, то после устранения соответствующих причин атом возвратится в первоначальное состояние; изменение же орбиты планеты, вызванное какими-либо внешними факторами (например, пролетом на близком расстоянии от нее какого-либо массивного небесного тела), будет сохраняться и после того, как этот фактор перестанет действовать.

В течение трех лет Вернер Гейзенберг думал над тем, какой должна быть новая механика микрочастиц.

Статья Гейзенберга «О квантово-механическом истолковании кинематических и механических зависимостей» (от 27.07.1925 г.) явилась первым шагом к созданию совершенно новой теории микромира — **квантовой механики**.

Несколько месяцев спустя появилась работа другого ученого — австрийского физика Эрвина Шрёдингера, которая также была посвящена механике микромира. Это был человек, прекрасно знавший не только физику, но и многие другие отрасли естествознания, включая биологию; он любил поэзию и сам писал стихи; был знатоком искусства и даже пробовал свои силы как скульптор; он владел разными языками и мог перевести Гомера на английский, а провансальских поэтов на немецкий...



Эрвин Шрёдингер

Ознакомившись с работой Шрёдингера, Гейзенберг в письме другу написал: «Чем больше я обдумываю физическую сторону шрёдингеровской теории, тем отвратительнее представляется она мне».

Через некоторое время, однако, Шрёдингер доказал, что обе теории — с одной стороны, развиваемая им, а с другой — теория Гейзенберга, с которой соглашался и Бор, — по сути дела, эквивалентны одна другой и дополняют одна другую.

В то же время Шрёдингер упорно пытался избавиться от «квантовых скачков», присутствующих в теории атома. Это место он считал одним из самых уязвимых в квантовой теории. Ведь как бы ни был быстр переход атома из одного стационарного состояния в другое, в любом случае он должен происходить в течение конечного промежутка времени (иначе это противоречило бы теории относительности). Но тогда непонятно, чему должна равняться энергия электрона в течение этого времени — ведь он уже не находится на уровне  $E_1$  и в то же время еще не достиг уровня  $E_2$ . Кроме того, первый постулат Бора вообще запрещает ему находиться где бы то ни было, кроме как на соответствующих уровнях. Поэтому любую теорию, включающую представление о подобных переходах («квантовых скачках»), Шрёдингер считал противоречащей принципу непрерывности движения и потому неверной.

В результате серии работ Шрёдингера и Гейзенберга, к которому присоединились Макс Борн и Паскуаль Йордан, а затем блестящих исследований английского физика Поля Дирака возникла новая, совершенно не похожая на механику Ньютона физическая теория — квантовая механика.

**Квантовая механика** представляет собой нерелятивистскую теорию явлений, происходящих в микромире<sup>1</sup>. Ее отличительной чертой является учет корпускулярно-волнового дуализма и вероятностное описание поведения микрочастиц. Согласно квантовой механике

<sup>1</sup> Релятивистскую физику микромира называют квантовой теорией поля.



любая свободно движущаяся частица характеризуется длиной волны, интенсивность которой в любой точке пространства пропорциональна вероятности ее обнаружения в этой точке.

Оказалось, что никаких орбит (и вообще траекторий) у электронов внутри атомов нет. А те боровские радиусы, которые в старой теории атома определяли эти орбиты, согласно квантовой механике, дают просто расстояние до тех мест, где вероятность нахождения электронов имеет максимальное значение.

Большинству ученых того времени, особенно физикам старшего поколения, включая Макса Планка, новая теория представлялась загадочной и непостижимой. Им казалась, что рухнет все здание физической науки.

Не последним препятствием в понимании квантовой механики являлась ее математическая сложность. «Математика, — писал Хвольсон, — играет в новом учении совершенно исключительную... роль. Ничего подобного мы не встречаем в других отделах физики... Самое плохое заключается в том, что это не та высшая математика, которая обычно преподается в университетах и с которой справляются и которой умеют пользоваться все физики. Нет, тут на первом плане оказываются такие отделы математики, о которых огромное большинство физиков никогда ничего не слыхало».

Мало кто понимал квантовую механику тогда, многие не понимают ее и сейчас. Однако что значит «понимают» или «не понимают»? Часто люди считают, что они что-то понимают, если могут это представить в виде какого-либо наглядного образа. Но в современной физике подобная механическая (образная) наглядность уступила место наглядности логической. Английский физик Поль Дирак писал: «Главная задача физической науки состоит не в том, чтобы снабжать нас наглядными картинками, а в том, чтобы формулировать законы, управляющие явлениями, и использовать эти законы для открытия новых явлений. Если наглядная картина существует, то тем лучше; однако существует она или нет — это лишь второстепенный вопрос. В случае атомных явлений нельзя ожидать, что существует наглядная картина в обычном смысле этого слова, в котором под «наглядной» понимается модель, действующая в основном по классическим принципам. Можно, однако, расширить смысл слова «картина» так, чтобы включить в него любой способ рассмотрения основных законов, при котором их взаимная согласованность становится очевидной». Именно это, по выражению Л. Д. Ландау, позволило нам научиться понимать то, что невозможно себе представить...

Однажды Макс Планк сказал: «Обычно новые научные истины побеждают не так, что их противников убеждают и они признают свою неправоту, а большей частью так, что противники эти постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу». Поэтому Нильс Бор не очень удивился, когда в 50-х гг. после одной

из его лекций по квантовой механике к нему подошел студент и спросил: «Профессор, неужели действительно когда-то были такие идиоты, которые думали, что электрон в атоме вращается по орбите?»

- ? 1. Что такое квантовая механика? 2. Чему пропорциональна интенсивность волны де Бройля? 3. В чем заключается истинный смысл боровских радиусов? 4. Назовите создателей квантовой механики. 5. В чем заключаются принципиальные различия в свойствах атомов и планетных систем?

## § 47. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

В классической механике считалось, что если выбрана та или иная система отсчета, то любая движущаяся частица в каждый момент времени будет иметь в ней определенные координаты и скорость. Зная начальные значения этих величин, можно было определить их значения в последующие моменты времени и тем самым предсказать, где будет находиться частица в тот или иной момент времени. Однако опыты с микрочастицами (например, дифракционные эксперименты Дэвиссона и Джермера) показали, что в микромире такие предсказания невозможны. Здесь можно говорить лишь о вероятности обнаружения данной частицы в той или иной точке пространства. Предсказать же, в какую именно точку экрана в опыте Дэвиссона и Джермера попадет конкретный электрон, принципиально невозможно.

Неспособность классической механики объяснить результаты подобных экспериментов обусловлена тем, что в ней не учитываются волновые свойства микрочастиц. Учет и корпускулярных, и волновых свойств частиц был осуществлен в квантовой механике.

Согласно квантовой механике, для микрочастиц не существует понятия траектории, и потому проследить во всех деталях за их движением невозможно. Это обусловлено тем, что ни одна частица, как показал в 1927 г. Вернер Гейзенберг, не может быть охарактеризована одновременным заданием ее координат и импульса. Оказалось, что, хотя не существует никаких пределов для точности, с которой можно определить либо импульс, либо положение частицы по отдельности, имеется принципиальный предел для точности одновременного определения этих величин. Точное определение положения и импульса частицы в один и тот же момент времени принципиально невозможно.

Проиллюстрируем это на простом примере. Пусть имеется частица, движущаяся вдоль оси  $X$ . Если известно, что импульс этой частицы равен  $p$ , то по формуле (19.5) можно определить и ее длину волны:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (47.1)$$



Но понятие длины волны имеет смысл лишь по отношению к синусоидальной волне, простирающейся до бесконечности в обе стороны оси  $X$  (рис. 101). Амплитуда и, следовательно, интенсивность такой волны во всех точках имеет одно и то же значение.

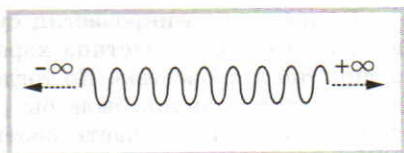


Рис. 101

А раз так, то рассматриваемую частицу с одинаковой вероятностью можно обнаружить в любой точке оси, что означает, что ее положение в пространстве полностью не определено.

Если же, наоборот, мы знаем, что в данный момент времени частица находится в точке с координатой  $x_0$ , то соответствующая ей волна стягивается в эту точку и понятие длины волны теряет смысл. Но если длина волны становится неопределенной, то неопределенным согласно формуле (47.1) оказывается и импульс рассматриваемой частицы.

Обозначим неопределенности (или неточности) в значениях координаты и импульса рассматриваемой частицы через  $\Delta x$  и  $\Delta p$ . Тогда результат наших рассуждений можно сформулировать следующим образом:

если  $x$  определено ( $\Delta x = 0$ ), то  $p$  не определено ( $\Delta p = \infty$ );  
 если  $p$  определено ( $\Delta p = 0$ ), то  $x$  не определено ( $\Delta x = \infty$ ).

Таким образом, неопределенности  $\Delta x$  и  $\Delta p$  обратно пропорциональны друг другу.

Полученный результат является частным случаем фундаментального закона природы, утверждающего, что ни при каком увеличении точности измерений невозможно добиться того, чтобы произведение неопределенностей в положении и импульсе частицы стало меньше величины порядка постоянной Планка. В состоянии, когда это произведение минимально,

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{1}{2} \hbar. \quad (47.2)$$

Это равенство называется соотношением неопределенностей Гейзенберга.

Из него следует, что, чем меньше  $\Delta x$ , тем больше  $\Delta p$  и наоборот. «Чем точнее определяется местоположение, — писал Гейзенберг, — тем менее точными становятся сведения об импульсе».

В нерелятивистском случае импульс любой частицы равен произведению ее массы на скорость:  $p = mv$ . Поэтому неопределенность в значении импульса можно представить в виде  $\Delta p = m \Delta v$ , где  $\Delta v$  — неопределенность в значении скорости. Учитывая это, соотношение (47.2) можно переписать в виде

$$\Delta x \cdot \Delta v = \frac{\hbar}{2m}. \quad (47.3)$$

Если бы для микрочастиц существовало понятие траектории, то в каждой ее точке частица характеризовалась бы определенной координатой и скоростью. Но тогда неопределенность в значении каждой из этих величин была бы равна нулю, из-за чего в нуль обратилась бы и левая часть соотношения (47.3). Но этого быть не может, так как правая часть этого соотношения нулю не равна. Это и означает, что в микромире понятие траектории не имеет смысла.

Из соотношения неопределенностей следует также, что в микромире невозможна локализация<sup>1</sup> частицы в сколь угодно малой области пространства. Другими словами, если бы мы захотели, скажем, поймать и удерживать в каком-либо месте электрон, то у нас бы из этого ничего не вышло.

В самом деле, в процессе сжатия области локализации неопределенность  $\Delta x$  в местоположении частицы будет становиться все меньше и меньше. Но тогда разброс в возможных значениях ее скорости

$$\Delta v = \frac{\hbar}{2m\Delta x} \quad (47.4)$$

будет становиться все больше и больше. Из-за этого будет расти и неопределенность ее кинетической энергии. Рано или поздно энергия частицы возрастет настолько, что эту частицу будет невозможно удержать в одном месте, и, преодолев удерживающие ее силы, она покинет область локализации. Описанное явление называют **туннельным эффектом**.

Туннельный эффект может наблюдаться и в том случае, когда частица просто наталкивается на силовой барьер, мешающий ей двигаться дальше. Препятствующие дальнейшему движению силы тормозят частицу, и, если бы не соотношение неопределенностей, она остановилась бы на мгновение, после чего начала бы движение в обратном направлении. Однако с приближением скорости частицы к нулю неопределенность в ее величине  $\Delta v$  также уменьшается. Из-за этого согласно соотношению (47.3) начинает возрастать неопределенность  $\Delta x$  в ее координате. В какой-то момент  $\Delta x$  увеличивается настолько, что у частицы появляется вероятность оказаться по другую сторону силового барьера и она «просачивается» сквозь него.

Если бы этот эффект наблюдался в макромире, то мы без труда могли бы проходить сквозь стены. Что же этому мешает?

Представим себе металлическую коробку, внутри которой находится шарик массой 10 г. Если эта коробка имеет форму кубика с ребром 5 см, то линейный размер области локализации шарика (и одновременно неопределенность в его местоположении) составит  $\Delta x = 5$  см. При этом согласно соотношению неопределенностей (47.4)

<sup>1</sup> Частица называется *локализованной* в некоторой области пространства, если она способна двигаться лишь внутри данной области, не будучи в состоянии ее покинуть.



скорость шарика (в проекции на ось  $X$ ) может отличаться от своего среднего (нулевого) значения на

$$\Delta v = \frac{10^{-34}}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \text{ м/с} = 10^{-31} \text{ м/с.}$$

Имея столь ничтожную скорость, шарик не только не сможет пробить стенки коробки, но даже и с места практически не сдвинется!

Иное дело, когда речь идет о внутриатомных движениях микро-частиц. Если бы, например, мы «поместили» электрон внутрь атомного ядра, то тем самым мы бы локализовали его в области с линейным размером порядка  $10^{-15}$  м. При массе электрона  $9 \cdot 10^{-31}$  кг это увеличило бы среднюю скорость электрона до значения, близкого к скорости света. Применяя в этом случае формулы теории относительности, можно убедиться в том, что энергия электрона при этом окажется столь велика, что он сразу покинет ядро.

Таким образом, при попытке приблизить электрон к атомному ядру возникает некоторое эффективное отталкивание, не объяснимое с точки зрения классической физики. Благодаря этому квантовому эффекту электроны не могут находиться внутри атомного ядра.

Теперь можно понять и то, почему мы не проваливаемся сквозь пол. Оказывая давление на пол, мы заставляем электроны в атомах пола приближаться к своим атомным ядрам. Но такое приближение, как мы только что видели, сопровождается квантово-механическим отталкиванием. Из-за этого в конечном счете и возникает та удерживающая нас сила, которую в механике называют силой реакции опоры. С точки зрения классической физики электроны должны притянуться к атомным ядрам и никакой силы, препятствующей этому, быть не должно.

?

1. Почему в квантовой механике понятие траектории не имеет смысла?
2. Докажите, что частица, локализованная в некоторой области пространства, не может покоиться.
3. За какое время шарик, находящийся в описанной в параграфе коробке, сдвинется на 1 мм?
4. Почему мы не проваливаемся сквозь пол?
5. Чему должна быть равна постоянная Планка, чтобы классическое описание состояния было возможно и в микромире?

## Глава 8. АТОМНОЕ ЯДРО

**Атомное ядро** представляет собой положительно заряженную центральную часть атома, в которой сосредоточено 99,96% его массы. Хотя атомные ядра и не имеют резких границ, можно считать, что большинство из них имеют приблизительно шарообразную форму с радиусом порядка  $10^{-15}$  м и плотностью  $\rho \approx 2,7 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

Первые экспериментальные данные о ядре были получены Э. Резерфордом в 1910 г. при изучении рассеяния альфа-частиц атомами золотой фольги. На основе полученных результатов Резерфорд сумел оценить ядерные размеры, о чем сообщил в своей знаменитой статье 1911 года. Однако узнать, из чего состоят атомные ядра, удалось значительно позже.

## § 48. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Когда в 1912 г. с вопросом о строении ядра обратились к самому Резерфорду, тот ограничился советом: «Спросите Бора...» Но тогда об этом Бор тоже ничего не знал. Однако уже в 1913 г. нидерландский физик А. Ван ден Брук предложил модель строения ядра, по которой оно состояло из положительно и отрицательно заряженных частиц, впоследствии отождествленных с протонами и электронами. Спустя 8 лет австрийский физик Лизе Мейтнер предложила более сложную модель, согласно которой ядра атомов состоят не только из протонов и электронов, но и альфа-частиц. Однако, несмотря на то что эти модели, казалось бы, объясняли, откуда берутся альфа- и бета-частицы, обе они оказались ошибочными.

Проблему строения атомного ядра удалось решить лишь после того, как была открыта новая частица — *нейтрон*. Это произошло в 1932 г. И уже в том же году Д. Д. Иваненко и Е. Н. Гапон в СССР, В. Гейзенберг в Германии и Э. Майорана в Италии почти одновременно предложили **протонно-нейтронную модель** строения ядра. Впоследствии она была надежно подтверждена и в настоящее время является общепризнанной.

В рассматриваемой модели ядро считается состоящим из протонов и нейтронов; электроны в состав атомного ядра не входят. Общее число частиц в ядре обозначают буквой  $A$  и называют **массовым числом** атомного ядра. Оно совпадает с округленной до целого числа относительной атомной массой элемента.

Входящие в состав ядра частицы обладают следующими свойствами:

1. Протон. Эта частица обозначается буквой  $p$ . Она обладает положительным зарядом  $q_p = e$  и массой  $m_p = 1836,2 m_e$  ( $m_e$  — масса электрона). Поскольку со времени открытия протона в 1919 г. ни одного его распада не наблюдалось, протон считается стабильной частицей. Возможно, что он и не абсолютно стабилен, а обладает конечным временем жизни, но это время чрезвычайно велико. Согласно экспериментальным данным среднее время жизни протона  $\tau > 10^{31}$  лет; теория же допускает увеличение этого времени до  $10^{50}$  лет.



Дмитрий Дмитриевич  
Иваненко



Число протонов в ядре равно числу электронов в нейтральном атоме и соответствует атомному номеру химического элемента в таблице Д. И. Менделеева:

$$\text{число } p \text{ в атомном ядре} = Z.$$

2. Нейтрон. Эта частица обозначается буквой  $n$ . Она нейтральна ( $q_n = 0$ ) и обладает массой  $m_n = 1838,7 m_e$ . В отличие от протона, нейтрон не является стабильной частицей. Его среднее время жизни в свободном состоянии (т. е. вне ядра)  $\tau \approx 15$  мин. Просуществовав это время, нейтрон распадается на более легкие элементарные частицы.

Число нейтронов  $N$  в атомном ядре определяется как разность между общим числом  $A$  всех частиц в ядре и числом протонов в нем  $Z$ :

$$N = A - Z.$$

По современным представлениям протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — нуклона<sup>1</sup>. Нуклон в заряженном состоянии является протоном, в нейтральном состоянии — нейтроном.

Нуклоны имеют сложное строение. В их состав входят фундаментальные частицы, называемые кварками. Причем и протон, и нейтрон состоят из трех кварков. Частицы же, состоящие из трех кварков, в современной физике называют барионами. Таким образом, нуклоны относятся к классу барионов. В соответствии с этим им приписывают так называемый барионный заряд, обозначаемый буквой  $B$ . У всех барионов  $B = 1$ ; у частиц, не являющихся барионами (как, например, фотон и электрон),  $B = 0$ . Целесообразность введения этой величины в физике обусловлена тем, что в природе происходят только такие процессы, в которых барионный заряд системы сохраняется. До сих пор не было обнаружено ни одного явления, в котором бы закон сохранения барионного заряда нарушался.

Легко заметить, что барионный заряд системы равен числу присутствующих в ней барионов. Поскольку протоны и нейтроны являются барионами, то их число в атомном ядре (массовое число  $A$ ) одновременно является и барионным зарядом данного ядра.

Барионный заряд любой частицы представляет собой безразмерное целое число. По аналогии с ним и электрический заряд частиц в ядерной физике принято выражать не в кулонах, а в виде целого числа  $Q$ , показывающего, сколько элементарных зарядов составляют заряд данной частицы (т. е.  $Q = q/e$ ). Так, например, для протона  $Q = +1$ , для электрона  $Q = -1$ , для атомного ядра  $Q = Z$ .

Обозначая атомные ядра, принято слева от символа соответствующего химического элемента указывать два числа: снизу — элект-

<sup>1</sup> Название «нуклон» (от лат. *nukleus* — ядро) означает «ядерная частица».

рический заряд ядра (совпадающий с его порядковым номером в таблице Менделеева), а сверху — барионный заряд (совпадающий с его массовым числом). Например:

ядро атома лития —  ${}^7_3\text{Li}$ .

Одновременно с зарядами эта запись показывает, что ядро лития состоит из 7 нуклонов ( $A=7$ ), среди которых 3 протона ( $Z=3$ ) и 4 нейтрона ( $N=A-Z=4$ ).

Аналогичного правила мы будем придерживаться и при обозначении других микрочастиц. Например:

электрон —  ${}^0_1e$ , протон —  ${}^1_1p$ , нейтрон —  ${}^1_0n$ .

Разновидности данного химического элемента, различающиеся массовым числом своих ядер, называются **изотопами**. Ядра изотопов содержат одинаковое число протонов  $Z$ , но разное число нейтронов  $N$ .

Имея одинаковое строение электронных оболочек, изотопы обладают практически одинаковыми химическими свойствами. Однако по физическим свойствам своих ядер изотопы резко отличаются. Например, ядро изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$  делится медленными нейтронами, а для деления изотопа  ${}^{238}_{92}\text{U}$  требуются нейтроны с достаточно большой энергией.

Изотопы имеются у каждого химического элемента. Например, у урана их 16, а у наиболее легкого элемента — водорода — их три:

1) обычный водород ( ${}^1_1\text{H}$ , или просто H), называемый *протием* и составляющий в природном водороде 99,985%;

2) тяжелый водород ( ${}^2_1\text{H}$ , или D), называемый *дейтерием* и составляющий 0,015%, и

3) сверхтяжелый водород ( ${}^3_1\text{H}$ , или T), называемый *тритием*. Последний из-за своей радиоактивности существует в природе в ничтожных количествах.

Искусственно получен еще один, четвертый изотоп  ${}^4_1\text{H}$ , который крайне неустойчив и потому в природе отсутствует.

Ядра изотопов тоже называют изотопами. Ядро протия представляет собой просто *протон*  $p$ , ядро дейтерия называют *дейтроном*  $d$ , а ядро трития — *тритоном*  $t$ .

Существующие в природе элементы — это естественные смеси различных изотопов. Их разделение представляет собой довольно сложную задачу.

Один из методов разделения изотопов основан на том же принципе, что и работа масс-спектрографа. Его устройство и принцип действия были подробно рассмотрены в курсе электродинамики.

Другой метод разделения изотопов основан на том, что тепловая скорость движения частиц зависит от их массы. Согласно формуле (34.4) при одной и той же температуре  $T$  частицы с меньшей массой движутся быстрее частиц с большей массой. Поэтому в процессе диффузии газообразного вещества через пористые перегородки (фильтры) одни компоненты смеси будут обгонять другие, и смесь в результате обогатится более легким изотопом.



1. Когда и кем было открыто атомное ядро? 2. Кто открыл строение ядра? Из каких частиц оно состоит? 3. Что вы знаете о протоне и нейтроне? 4. Откуда следует, что в атомном ядре не может быть электронов? 5. Как называется число нуклонов в ядре? 6. Докажите, что барионный заряд ядра равен его массовому числу. 7. Чему равен барионный заряд протона? нейтрона? электрона? 8. Что такое изотопы? 9. Какие изотопы водорода вы знаете? 10. Назовите число протонов и нейтронов в дейтроне. 11. Сколько нейтронов находится внутри тритона? 12. Чему равен барионный заряд протия? 13. Как осуществляется разделение изотопов?

## § 49. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Все экспериментальные данные указывают на то, что атомные ядра довольно устойчивые системы, которые трудно разрушить. Какие же силы удерживают протоны и нейтроны внутри ядра?

Классическая физика знала всего лишь два типа фундаментальных взаимодействий — электромагнитное и гравитационное. Однако первое из них, наоборот, «стремится» разрушить атомное ядро, заставляя одноименно заряженные протоны отталкиваться друг от друга, а второе, хотя и приводит к притяжению составных частей ядра, слишком мало, чтобы скомпенсировать кулоновское отталкивание<sup>1</sup>.

Таким образом, в рамках представлений классической физики оказывается необъяснимым не только существование электронных оболочек в атомах (о чем говорилось раньше), но и существование атомных ядер.

Квантовая физика объясняет существование атомных ядер действием внутри их особых, **ядерных сил**, отличающихся по своей природе и от электромагнитных сил, и от гравитационных. Вот некоторые их свойства:

1) ядерные силы обеспечивают притяжение нуклонов друг к другу, причем независимо от того, в каком зарядовом состоянии (протонном или нейтронном) эти нуклоны находятся;

2) ядерные силы на 2—3 порядка интенсивнее электромагнитных;

3) ядерные силы имеют короткодействующий характер, т. е. проявляются лишь на очень малых расстояниях, сравнимых с радиусом атомного ядра;

4) ядерные силы, по крайней мере частично, имеют обменный характер. Это означает, что взаимодействие нуклонов в ядре осуществляется путем испускания и поглощения этими частицами квантов особого («ядерного») поля — *пи-мезонов* л.

<sup>1</sup> Сила гравитационного притяжения двух протонов в  $10^{36}$  раз слабее силы их кулоновского отталкивания.

Существование этих квантов было предсказано в 1935 г. двадцативосьмилетним японским физиком Хидэки Юкава. На основе квантово-механических соображений он получил формулу, связывающую расстояние  $R$ , на котором проявляются обменные силы, с массой  $m$  частицы, из-за обмена которой и возникают эти силы:

$$R \approx \frac{\hbar}{mc}. \quad (49.1)$$

Подставив сюда радиус действия ядерных сил, Юкава получил для массы  $m$  величину, приблизительно в 200—300 раз большую массы электрона и в 10 раз меньшую массы протона. Частица с такой массой не соответствовала свойствам ни одной из известных в то время частиц. Из-за этого многие ученые считали теорию Юкавы неверной. Существование новой, никому не известной частицы в то время казалось настолько маловероятным, что даже сам Юкава, изложив свою теорию, написал: «Так как квант с такой большой массой в эксперименте никогда не наблюдался, то вышеизложенная теория, кажется, находится на ложном пути».

Однако спустя три года частицы с такой массой действительно были обнаружены. Это открытие вызвало сенсацию среди физиков. «Я даже не знаю, — писал Нильс Бор Роберту Милликену, — что заслуживает большего восхищения — изобретательность и дар предвидения Юкавы или упорство, с которым группа сотрудников Вашего института занималась поисками проявлений новых эффектов».

Для новых частиц сначала предлагались самые разные названия: «тяжелый электрон», «легкий протон», «юкон», «мезотрон» и, наконец, просто «мезон» (от греч. *mesos* — средний), что и утвердилось в науке.

Однако дальнейшие исследования показали, что эти частицы не могут служить «переносчиками» ядерных сил и потому к предсказанным Юкавой квантам никакого отношения не имеют. Теперь эти частицы называют мюонами, а название «мезон» (точнее, «пи-мезон», или просто «пион») оставили за квантами «ядерного» поля.

По выражению американского физика М. Гелл-Манна, при открытии мюона ученые «...столкнулись с изысканным коварством природы. Она подкинула нам частицу, у которой с точки зрения теоретической физики не было никаких прав и которую использовать разумным способом не представлялось возможным. Мюон явился подкидышем, найденным на пороге дома».

«Настоящие» мезоны были открыты значительно позже. Сначала, в 1947 г., были обнаружены заряженные пионы  $\pi^+$  и  $\pi^-$ , а затем, в 1950 г., был найден и нейтральный пион  $\pi^0$ .

То и дело возникая и тут же исчезая, эти частицы образуют вокруг «голого» нуклона своеобразное «облако», называемое мезонной «шубой». Когда два нуклона, окруженные такими «шубами», оказываются на расстоянии  $10^{-15}$  м, происходит обмен пионами и между нуклонами возникает притяжение.



Существование трех видов пионов позволило объяснить все возможные типы обмена, возникающие в процессе взаимодействия нуклонов:

$$p \rightleftharpoons p + \pi^0, \quad n \rightleftharpoons n + \pi^0, \quad (49.2)$$

$$p \rightleftharpoons n + \pi^+, \quad n \rightleftharpoons p + \pi^-. \quad (49.3)$$

В первых двух процессах зарядовое состояние нуклона не меняется, а в двух последних процессах нейтрон переходит в протонное состояние и, наоборот, протон — в нейтронное.

На примере ядерных сил физики столкнулись с новым типом фундаментального взаимодействия — так называемым **сильным взаимодействием**. Это взаимодействие проявляется лишь в микромире и не может быть описано с помощью представлений классической физики. Обычное для механики Ньютона понятие силы здесь не работает. Никакой вектор  $\vec{F}$ , аналогичный другим классическим силам, ядерным силам не соответствует.

Квантовое описание взаимодействия нуклонов в ядре оказалось настолько сложным, что полной, законченной теории ядерных сил до сих пор никому создать не удалось.

?

1. Почему классическая физика не могла объяснить существование атомного ядра? 2. Какими свойствами обладают ядерные силы? 3. Что вы знаете о мезонной теории ядерных сил? 4. Проверьте соблюдение законов сохранения электрического и барионного зарядов в реакциях (49.2) и (49.3). Чему равен барионный заряд пи-мезонов? 5. Согласно квантовой электродинамике взаимодействие электрически заряженных частиц осуществляется путем обмена ими фотонами. Применяя к этому взаимодействию формулу (49.1), объясните, почему у электромагнитных сил бесконечно большой радиус действия.

## § 50. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ И ДЕФЕКТ МАССЫ ЯДРА

Известно, что для преодоления сил, удерживающих одну молекулу воды в жидкости, достаточно затратить энергию, равную приблизительно 0,1 эВ. Для разделения на атомы молекулы водорода нужно 4,5 эВ (энергия химической связи). Для ионизации атома водорода требуется 13,6 эВ (энергия связи электрона в атоме водорода). Какая энергия нужна для разрушения атомного ядра?

**Определение.** Минимальная энергия, необходимая для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется **энергией связи** атомного ядра.

У каждого ядра своя энергия связи. Чем больше эта энергия, тем более устойчиво атомное ядро.

Если ядру с энергией покоя  $E_0$  сообщить извне энергию, равную его энергии связи  $E_{св}$ , то вместо ядра мы получим отдельные, не

взаимодействующие друг с другом и покоящиеся на «бесконечности» нуклоны. Пусть  $E_{\text{нукл}}$  — суммарная энергия (сумма энергий покоя) этих нуклонов. Тогда по закону сохранения энергии

$$E_0 + E_{\text{св}} = E_{\text{нукл}}, \quad (50.1)$$

Отсюда энергия ядра

$$E_0 = E_{\text{нукл}} - E_{\text{св}}. \quad (50.2)$$

Из этого соотношения следует, что при образовании ядра из отдельных нуклонов его энергия становится меньше энергии этих нуклонов на  $E_{\text{св}}$ , т. е. энергия связи — это та энергия, которая выделяется при объединении нуклонов в одно атомное ядро.

Согласно теории относительности энергия любого тела пропорциональна его массе. Поэтому уменьшение энергии ядра в процессе его образования должно сопровождаться и уменьшением его массы, т. е. масса ядра должна быть меньше суммы масс отдельных нуклонов, образующих это ядро.

**Определение.** Разность между суммой масс нуклонов и массой  $M_0$  состоящего из них ядра называется **дефектом массы** этого ядра.

Дефект массы обозначается  $\Delta M$ . Согласно сформулированному выше определению

$$\Delta M = (Zm_p + Nm_n) - M_0, \quad (50.3)$$

или

$$\Delta M = ZM_{\text{H}} + Nm_n - M_{\text{ат}}, \quad (50.4)$$

где  $M_{\text{H}}$  — масса атома водорода, а  $M_{\text{ат}}$  — масса атома, содержащего рассматриваемое ядро.

Именно эта часть массы  $\Delta M$  теряется при выделении энергии связи. Поэтому, применяя закон взаимосвязи массы и энергии, получаем

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2. \quad (50.5)$$

Обычно все массы в ядерной физике выражают в атомных единицах массы (а.е.м.), а энергии — в электронвольтах (эВ). С единицами СИ они связаны соотношениями

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

В этих (внесистемных) единицах квадрат скорости света в вакууме оказывается равным:

$$c^2 = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad (50.6)$$

Это значение очень часто используется в ядерной физике.

Рассмотрим в качестве примера расчет дефекта массы и энергии связи ядра лития  ${}^7_3\text{Li}$ . Имеем

$$Z = 3, M_{\text{H}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}, N = 4, m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.},$$

$$M_{\text{ат}} = 7,01601 \text{ а.е.м.}$$



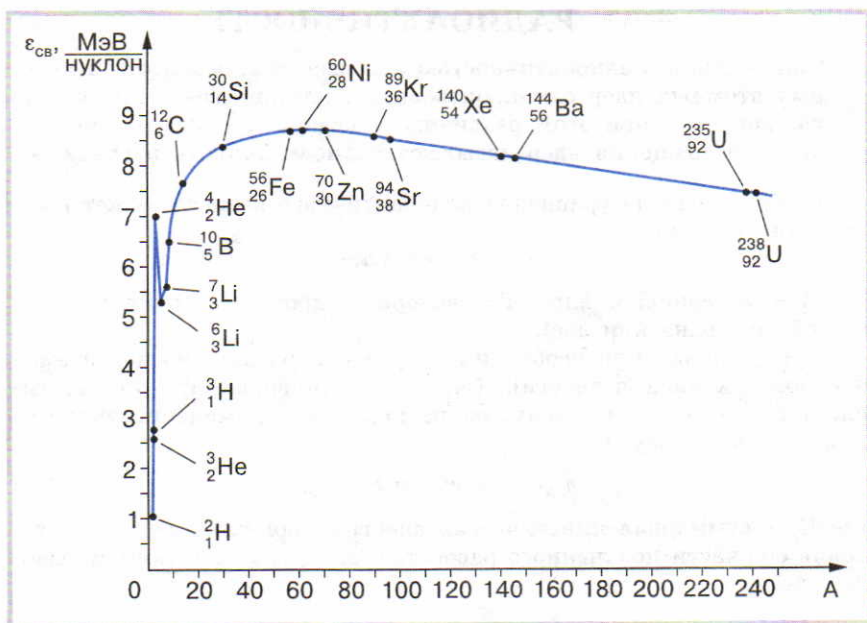


Рис. 102

Подставляя эти значения в формулу (50.4), получаем, что дефект массы ядра лития составляет  $\Delta M = 0,04212$  а.е.м. Для нахождения энергии связи умножим это число на квадрат скорости света:

$$E_{св} = 0,04212 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 39,3 \text{ МэВ.}$$

Это в 3 млн раз больше энергии связи атома водорода! Вот почему атомные ядра — такие устойчивые системы.

Для нахождения энергии связи, приходящейся на 1 нуклон, разделим полную энергию связи на число нуклонов в ядре:

$$\epsilon_{св} = \frac{E_{св}}{A}.$$

Эта величина называется **удельной энергией связи**. График зависимости удельной энергии связи от массового числа представлен на рисунке 102. Из него видно, что наиболее устойчивыми являются ядра никеля и близких к нему элементов; эти ядра имеют наибольшую энергию связи.

?

1. Что называют энергией связи ядра? 2. Что такое дефект массы?
3. Какому классическому свойству массы противоречит существование дефекта массы у атомных ядер? 4. Что такое удельная энергия связи?
5. Используя график, изображенный на рисунке 102, определите энергию связи ядра урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .
6. Используя тот же график, определите, у какого из двух ядер:  ${}^3_2\text{He}$  или  ${}^6_3\text{Li}$  — дефект массы больше.
7. Выведите формулу (50.4).

## § 51. РАДИОАКТИВНОСТЬ

**Определение.** Радиоактивностью называется способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра, испуская при этом различные частицы. Происходящие при этом превращения ядер называют радиоактивными распадами.

В общем случае уравнение радиоактивного распада может быть записано в виде



где  $X$  — материнское ядро;  $Y$  — дочернее ядро;  $a$  — прочие частицы (их обычно одна или две).

Для установления необходимого условия распада воспользуемся законом сохранения энергии. Считая материнское ядро покоящимся, а разлетевшиеся продукты распада не взаимодействующими между собой, получаем

$$m_X c^2 = m_Y c^2 + m_a c^2 + E_k, \quad (51.1)$$

где  $E_k$  — суммарная кинетическая энергия продуктов распада. Разделив обе части полученного равенства на  $c^2$ , мы приходим к выводу, что

$$m_X > m_Y + m_a. \quad (51.2)$$

Это и есть **необходимое условие распада**: радиоактивный распад ядра возможен лишь в том случае, если его масса превышает суммарную массу продуктов распада.

Энергию, выделяющуюся в процессе распада, т. е. суммарную кинетическую энергию продуктов распада  $E_k$ , обозначают буквой  $Q$  и называют **энергией распада**. Из соотношения (51.1) следует, что

$$Q = (m_X - m_Y - m_a) c^2. \quad (51.3)$$

Поскольку радиоактивные распады происходят самопроизвольно, то для соответствующих превращений не нужно тратить энергию. Наоборот, сами эти распады являются источниками энергии. Другими словами, любой радиоактивный процесс *экзотермичен*:  $Q > 0$ .

Явление радиоактивности было открыто в 1896 г. Анри Беккерелем, который обнаружил испускание солями урана каких-то новых невидимых лучей. Несколько позже Резерфорд установил, что эти лучи имеют сложный состав и содержат по крайней мере две компоненты, различающиеся своей проникающей способностью. Менее проникающее излучение он назвал  $\alpha$ -лучами, а более проникающее —  $\beta$ -лучами. В 1900 г. французский ученый П. Виллар открыл третий компонент радиоактивного излучения —  $\gamma$ -лучи.

*Гамма-лучи* представляют собой жесткое электромагнитное излучение с очень малой длиной волны и соответственно большой частотой. С квантовой точки зрения они представляют собой поток фотонов ( $\gamma$ -квантов) большой энергии (обычно выше 100 кэВ).



Гамма-излучение сопровождает распад радиоактивных ядер в тех случаях, когда они оказываются в возбужденном состоянии. При переходе такого ядра с верхнего энергетического уровня на более низкий (а у ядра, как и у атома, есть своя схема энергетических уровней) и происходит излучение  $\gamma$ -кванта.

В отличие от атомов, которые могут находиться в возбужденном состоянии примерно  $10^{-8}$  с, ядра за более короткое время (примерно  $10^{-15}$  с) переходят из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией. Ядерные спектры — наборы излучаемых ядрами частот — показывают так же, как и атомные спектры, с помощью стрелок между изображениями (в виде полочек, ступенек) энергетических уровней, на которых могут находиться атомные ядра. Энергетические диаграммы атомов и ядер похожи, однако существенным различием систем энергетических уровней атомов и ядер являются расстояния между соседними уровнями и, следовательно, излучаемая или поглощаемая энергия. Расстояния между энергетическими уровнями в ядре значительно больше, чем в атоме, поэтому  $\gamma$ -кванты обладают большей энергией, а значит, имеют большую частоту и меньшую длину волны по сравнению с фотонами инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов, излучаемых и поглощаемых атомом.

Наличие ядерных спектров подтверждается в опытах, аналогичных опытам Франка и Герца (при соударениях протонов с ядрами), и свидетельствует о том, что квантование энергии характерно для ядерного взаимодействия.

Гамма-лучи обладают наибольшей проникающей способностью. От них приходится загораживать свинцовыми экранами. Бета-лучи полностью задерживаются алюминиевой пластинкой толщиной в несколько миллиметров, а альфа-лучи можно задержать обыкновенным листом бумаги. При распространении в воздухе  $\beta$ -лучи способны удалиться от своего источника на расстояние в несколько десятков сантиметров, а  $\alpha$ -лучи — на расстояние около 5 см.

Большую роль в изучении радиоактивности сыграли работы французских физиков Пьера и Марии Кюри. Ими были открыты два новых радиоактивных элемента — полоний (названный ими так в честь родины Марии Кюри — Польши) и радий (получивший это название из-за своей высокой радиоактивности<sup>1</sup>). За свои исследования Мария Кюри получила две Нобелевские премии!

В настоящее время известно, что радиоактивными являются все химические



Мария  
Склодовская-Кюри

<sup>1</sup> Латинское слово radio означает «излучаю».

элементы с атомным номером  $Z > 83$ ; у элементов с  $Z \leq 83$  имеются отдельные радиоактивные изотопы.

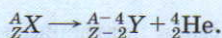
Чаще всего в природе встречаются два типа радиоактивного распада:  $\alpha$ -распад и  $\beta$ -распад. Первый из них сопровождается возникновением альфа-лучей, второй — бета-лучей. И те и другие лучи оказались потоками заряженных частиц. По отклонению этих частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что  $\alpha$ -частицы — это положительно заряженные ядра атомов гелия (Резерфорд, 1903 г.), а  $\beta$ -частицы — отрицательно заряженные электроны (Беккерель, 1900 г.).

$$\alpha\text{-частица} = {}^4_2\text{He}, \quad \beta\text{-частица} = {}^0_{-1}e.$$

При **альфа-распаде** радиоактивное ядро  $X$  превращается в новое ядро  $Y$ , испуская при этом  $\alpha$ -частицу:



С учетом законов сохранения электрического и барионного зарядов последнее уравнение можно переписать более подробно:



Отсюда видно, что в результате альфа-распада порядковый номер элемента в таблице Менделеева уменьшается на две единицы (*правило смещения для  $\alpha$ -распада*).

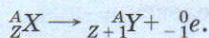
В настоящее время известно более 300 альфа-радиоактивных ядер, большинство из которых получено искусственно. В основном это ядра тяжелых элементов.

Основы квантовой теории альфа-распада были разработаны в 1928 г. двадцатичетырехлетним русским физиком Георгием Гамовым, переехавшим через 6 лет в США. Он впервые сумел объяснить, каким образом  $\alpha$ -частицы, не имея достаточной энергии, оказываются способными вылетать за пределы ядра. Согласно его теории это происходит в результате туннельного эффекта.

При **бета-распаде** радиоактивное ядро  $X$  превращается в новое ядро  $Y$ , испуская при этом  $\beta$ -частицу:



или более подробно



Отсюда видно, что при бета-распаде порядковый номер элемента возрастает на одну единицу (*правило смещения для  $\beta$ -распада*).

В свое время испускание  $\beta$ -радиоактивными ядрами электронов дало основание считать, что последние входят в состав атомного яд-



ра. Но потом выяснилось, что электронов в ядре нет. Откуда же они тогда берутся?

Ответ на этот вопрос был получен в 1934 г., когда итальянский физик Энрико Ферми разработал квантовую теорию  $\beta$ -распада. Согласно теории Ферми в момент распада ядра внутри его происходит превращение одного из нейтронов в протон, сопровождающееся возникновением еще двух частиц — электрона  $e^-$  и так называемого нейтрино  $\nu$ :



Энрико Ферми

$$n \rightarrow p + e^- + \nu. \quad (51.4)$$

Электрон, как и нейтрино, не вылетает из ядра в качестве его составной части, а рождается в момент бета-распада. Это происходит аналогично тому, как рождается фотон в процессе излучения света: до излучения внутри атома фотона нет, он появляется лишь при переходе атома из одного квантового состояния в другое.

*Нейтрино* представляет собой нейтральную частицу с очень малой (возможно, нулевой) массой. Ее существование было предсказано на основе закона сохранения энергии В. Паули в 1930 г. Чтобы отличить ее от нейтрона, Ферми дал ей название «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «нейтрончик».

Из уравнения (51.4) видно, что у нейтрино  $B=0$ . Это означает, что нейтрино, как и электрон, не является барионом. Нейтрино, а также электрон и мюон относят к классу **лептонов**, поэтому им приписывают так называемый **лептонный заряд**, обозначаемый буквой  $L$ . У всех лептонов  $L=1$ ; у частиц, не являющихся лептонами (как, например, нуклоны и пи-мезоны),  $L=0$ .

Целесообразность введения лептонного заряда обусловлена тем, что в природе происходят только такие процессы, в которых лептонный заряд *сохраняется*.

Воспользовавшись *законом сохранения лептонного заряда*, определим значение  $L$  для нейтрино, присутствующего в реакции (51.4). Имеем

$$0 = 0 + 1 + L.$$

Отсюда  $L=-1$ . Отрицательный знак у лептонного заряда нейтрино означает, что в рассматриваемой реакции участвует не просто нейтрино, а *антинейтрино*.

Согласно современным представлениям *каждой частице в природе соответствует своя античастица*. Массы частиц и соответствующих им античастиц строго одинаковы. Различие же между ними состоит в том, что у античастиц все заряды (электрический, барионный и лептонный) имеют противоположный знак. Так, например, у электрона  $e^-$ , мюона  $\mu^-$  и нейтрино  $\nu$  лептонный заряд

положителен:  $L=1$ , а у антиэлектрона (или позитрона)  $e^+$ , антимюона  $\mu^+$  и антинейтрино  $\tilde{\nu}$  он отрицателен:  $L=-1$ .

Таким образом, уравнение (51.4) следует записывать в виде



Здесь наглядно показано, что наряду с электроном в данном процессе возникает не просто нейтрино, а его античастица.

Образованием антинейтрино сопровождается бета-распад любого ядра. Однако, учитывая, что его барионный и электрический заряды равны нулю, в уравнениях соответствующих реакций эту частицу часто не указывают. По этой же причине не всегда указывают в них и возникающие при радиоактивных распадах  $\gamma$ -кванты.

Нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом. Фактически любое вещество по отношению к распространению в нем нейтрино ведет себя как пустое место. Например, длина свободного пробега нейтрино в воде (при энергии 1 МэВ) составляет 100 световых лет! Разумеется, никто и никогда такой толщи воды на пути нейтрино не поставит. Поэтому реальные нейтрино свободно пронизывают космическое пространство, пролетая сквозь Солнце, Землю и любые другие небесные тела.

При изучении бета-распада и свойств нейтрино ученые столкнулись с новым типом фундаментального взаимодействия — так называемым **слабым взаимодействием**. Как и сильное, слабое взаимодействие является короткодействующим и потому проявляется только в микромире. Оно ответственно за превращения элементарных частиц.

- ? 1. Что такое радиоактивность? 2. Что представляют собой альфа- и бета-частицы? Какова их проникающая способность? 3. Напишите уравнения альфа- и бета-распадов. Проверьте соблюдение в них законов сохранения электрического и барионного зарядов. 4. Какому закону сохранения противоречит распад нейтрона на протон и электрон ( $n \rightarrow p + e^-$ )? 5. Сформулируйте необходимое условие распада. Выполняется ли оно в реакции (51.5)? 6. Что вы знаете о нейтрино? 7. Чем отличаются частицы от своих античастиц? 8. Какие четыре типа фундаментальных взаимодействий существуют в природе? 9. В своей докторской диссертации Мария Кюри привела общую схему структуры радиоактивного излучения, распространяющегося в однородном магнитном поле (рис. 103). Какой из компонентов этого излучения, обозначенных на рисунке цифрами 1, 2 и 3, соответствует  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучам? Почему?

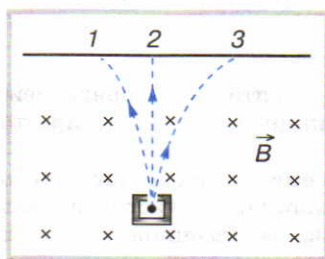


Рис. 103



## § 52. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

В любом радиоактивном образце находится огромное число ядер. Предсказать, когда именно — через секунду, месяц или тысячу лет — распадется то или иное ядро, невозможно. Как и любая другая квантовая система, радиоактивное ядро подчиняется вероятностным законам, и распад каждого отдельного ядра является совершенно случайным событием. В этом отношении атомный мир совершенно не похож на мир людей: процент человеческой смертности с увеличением возраста людей повышается, а вероятность радиоактивного распада с течением времени не меняется.

«Если бы ангел смерти, — писал английский ученый Ф. Содди, — выбирал из всех живущих на свете определенное количество каждую минуту независимо от их возраста, молодых и старых, если бы он не обращал внимания ни на что, кроме числа жертв, и случайно выбирал одну жертву тут, другую там, пока не составится нужное число, то наше ожидание смерти было бы такое же, как у радиоактивных атомов».

**Определение.** Промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое, называется **периодом полураспада**.

Период полураспада мы будем обозначать буквой  $T$ . У разных элементов он может принимать значения от долей секунды до многих миллиардов лет. Например, у изотопа свинца  $^{204}\text{Pb}$  период полураспада составляет  $1,4 \cdot 10^{17}$  лет, а у изотопа радиоактивного газа радона  $^{215}\text{Rn}$  он равен всего лишь  $10^{-6}$  с.

Для каждого вида ядер период полураспада является строго *постоянной величиной*. Опыты с радиоактивными веществами показали, что никакие внешние условия (изменение агрегатного состояния, нагревание до высоких температур, большие давления и т. п.) не влияют на характер и скорость распада.

Учитывая факт постоянства периода полураспада  $T$ , получим закон, по которому убывает число радиоактивных ядер.

Обозначим число радиоактивных ядер какого-либо вещества в произвольно выбранный начальный момент времени  $t_0 = 0$  через  $N_0$ . Тогда спустя время  $t_1$ , равное периоду полураспада данного вещества  $t_1 = T$ , число этих ядер окажется в 2 раза меньше, т. е. будет равно  $N_1 = N_0/2$ . Спустя еще такое же время, т. е. в момент  $t_2 = 2T$ , число ядер снова уменьшится в 2 раза и теперь составит  $N_2 = N_1/2 = N_0/2^2$ . Рассуждая таким образом, можно записать:

$$\begin{aligned} t_1 = 1T: & \quad N_1 = N_0/2^1, \\ t_2 = 2T: & \quad N_2 = N_0/2^2, \\ t_3 = 3T: & \quad N_3 = N_0/2^3 \\ \dots\dots\dots & \quad \dots\dots\dots \\ t = nT: & \quad N = N_0/2^n. \end{aligned}$$

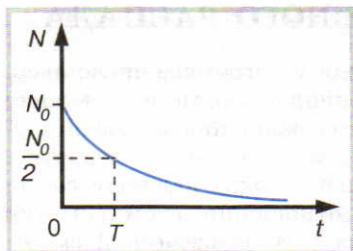


Рис. 104

Итак, для числа радиоактивных ядер в произвольный момент времени  $t$  мы можем записать:

$$N = N_0 2^{-n},$$

или, так как  $n = t/T$ ,

$$N = N_0 2^{-t/T}. \quad (52.1)$$

Полученная формула выражает закон радиоактивного распада. В соответствии с этой формулой число радиоактивных ядер в любом образце убывает с течением времени по закону, график которого изображен на рисунке 104.

Формула (52.1) выражает число нераспавшихся ядер. Для того чтобы найти число ядер  $N_{\text{расп}}$ , которые за время  $t$  распались, проведем несложные преобразования:

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N = N_0(1 - 2^{-t/T}). \quad (52.2)$$

При использовании закона радиоактивного распада следует помнить, что он является статистическим законом и справедлив лишь при достаточно большом числе радиоактивных ядер.

Помимо периода полураспада, радиоактивные ядра характеризуются еще **средним временем жизни**  $\tau$ , для которого справедливо соотношение

$$\tau = 1,44T. \quad (52.3)$$

Отношение числа имеющихся в момент времени  $t$  радиоактивных ядер к их среднему времени жизни называется **активностью** радиоактивного препарата:

$$A = \frac{N}{\tau}. \quad (52.4)$$

**Определение.** Активность любого радиоактивного вещества показывает, сколько радиоактивных распадов происходит в этом веществе за единицу времени. С течением времени она убывает по тому же закону, что и число радиоактивных ядер.

Единицей активности в СИ является 1 Бк (*беккерель*). 1 Бк равен активности такого радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит 1 распад.

Закон радиоактивного распада играет очень важную роль в **изотопной хронологии**. Так называют определение возраста горных пород, минералов, следов древних человеческих культур и в целом Земли по накоплению в них продуктов распада радиоактивных изотопов.

Например, в *свинцовом методе* изотопной хронологии исходят из того, что конечным продуктом распада урана  $^{238}\text{U}$  является стабильный изотоп свинца  $^{206}\text{Pb}$ . Это приводит к тому, что в любом об-



разце содержание урана с течением времени будет уменьшаться, а свинца — увеличиваться. Допустим, что в момент образования уранового минерала в нем содержалось  $N_0$  ядер урана. Через время  $t$ , равное возрасту этого минерала, в нем будет содержаться  $N_U$  ядер урана и  $N_{Pb} = N_0 - N_U$  ядер свинца. Это позволяет записать закон радиоактивного распада в виде

$$N_U = (N_U + N_{Pb})2^{-t/T},$$

откуда

$$t = T \log_2(1 + N_{Pb}/N_U). \quad (52.5)$$

Отсюда видно, что для определения возраста минерала достаточно знать относительное содержание присутствующих в нем изотопов урана и свинца. Определенный таким образом возраст самых старых из известных урановых минералов оказался равным 4,5 млрд лет.

Для оценки возраста объектов в пределах 60 000 лет применяют *радиоуглеродный метод*. Его суть состоит в следующем. Известно, что в углекислом газе  $CO_2$ , содержащемся в атмосфере Земли, присутствуют не только стабильные атомы  $^{12}C$  и  $^{13}C$ , но и радиоактивный изотоп углерода  $^{14}C$  с периодом полураспада 5700 лет. Из-за распада его количество должно было бы убывать, однако эта убыль компенсируется возникновением новых ядер, образующихся из атмосферного азота под действием космических лучей. По этой причине содержание  $^{14}C$  в воздухе с течением времени не меняется. Не меняется его концентрация и в поглощающих его растениях, а следовательно, и в организмах потребляющих их животных и людей. Однако после гибели процесс усвоения атмосферного углерода прекращается, и содержание  $^{14}C$  в мертвых организмах начинает уменьшаться по закону радиоактивного распада. Поэтому, измерив в той или иной находке органического происхождения содержание радиоуглерода  $^{14}C$ , можно определить и возраст данной находки. Если, например, процентное содержание  $^{14}C$  уменьшилось вдвое, то это означает, что соответствующий возраст равен  $t = T = 5700$  лет, если четверо, то  $t = 2T = 11400$  лет и т. д.

За разработку радиоуглеродного метода геохронологии американский физик Фрэнк Либби в 1960 г. был удостоен Нобелевской премии. С помощью его метода удалось осуществить датировку самых разных событий в истории Земли и культуры человечества, начиная от определения возраста древнейших наскальных рисунков и гробниц египетских фараонов и кончая установлением эпохи ледниковых периодов и временем вымирания доисторических животных.

- ?
1. Что такое период полураспада? 2. В чем заключается закон радиоактивного распада? 3. Сколько нужно времени, чтобы распалось все радиоактивное вещество? 4. Имеются два радиоактивных ядра. За какое время их число уменьшится вдвое? 5. В чем заключается свинцовый метод изотопной хронологии? 6. Выведите формулу (52.5). 7. Расска-

жите о радиоуглеродном методе датировки событий. 8. Известно, что тория  $^{232}\text{Th}$  в Земле сейчас почти столько же, сколько его было во время ее образования, а трития  $^3\text{H}$  практически не осталось. У какого из этих изотопов период полураспада равен 12 годам, а у какого — 14 млрд лет? Чему равно их среднее время жизни? 9. У каких радиоактивных элементов больше активность — у долго- или короткоживущих?

## § 53. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

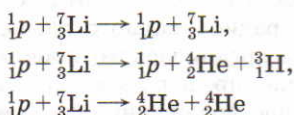
**Ядерными реакциями** называют превращения атомных ядер в результате взаимодействия друг с другом или какими-либо элементарными частицами.

Символически ядерную реакцию можно представить в виде



где  $X$  и  $Y$  — атомные ядра. Символам  $a$  и  $b$  чаще всего соответствуют какие-либо элементарные частицы или простые ядра (типа  $\alpha$ -частицы или дейтрона), но иногда это могут быть и тяжелые ядра. Кроме того, в некоторых случаях символу  $b$  может соответствовать не одна, а несколько частиц.

Участвующие в ядерной реакции исходные (сталкивающиеся) частицы  $a + X$  принято называть *входным каналом*, а совокупность образовавшихся частиц  $Y + b$  — *выходным каналом*. При заданном входном канале обычно существует несколько выходных каналов, различающихся своей вероятностью. Например, при столкновении протона с ядром лития могут наблюдаться следующие процессы:



и т. п.

Если налетающая на ядро частица обладает положительным зарядом, то ее проникновению в ядро будет препятствовать электрическое отталкивание. Чтобы его преодолеть и попасть в область действия ядерных сил, частица должна обладать достаточно большой кинетической энергией. Иначе обстоит дело с нейтронами. Они не обладают электрическим зарядом и потому могут вступать в ядерные реакции, даже будучи очень медленными. Это делает их применение особенно эффективным.

Ядерные реакции могут протекать как с выделением, так и с поглощением энергии, причем эта энергия примерно в  $10^6$  раз превышает энергию, поглощаемую или выделяемую при химических реакциях.

**Энергетическим выходом** ядерной реакции, или **энергией реакции**,  $Q$  называется разность кинетических энергий конечного



и начального состояний частиц, участвующих в ядерной реакции:

$$Q = E'_k - E_k. \quad (53.1)$$

Если реакция идет с выделением кинетической энергии, то  $Q > 0$  и реакция называется *экзотермической*. Если реакция идет с поглощением кинетической энергии, то  $Q < 0$  и реакция называется *эндотермической*.

Поскольку и в начальном, и в конечном состояниях частицы считаются не взаимодействующими между собой, то их полная энергия в каждом из этих состояний не включает потенциальную энергию, складываясь лишь из кинетической энергии и энергии покоя. Применяя закон сохранения энергии, мы можем записать:

$$m_1c^2 + m_2c^2 + E_k = m_3c^2 + m_4c^2 + E'_k, \quad (53.2)$$

где  $E'_k$  и  $E_k$  — суммарные кинетические энергии системы в конечном и начальном состояниях;  $m_1$  и  $m_2$  — массы исходных частиц, а  $m_3$  и  $m_4$  — массы образовавшихся частиц. Из формул (53.1) и (53.2) следует, что

$$Q = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4)c^2. \quad (53.3)$$

Первая ядерная реакция была осуществлена в 1919 г. Э. Резерфордом. Бомбардируя ядра азота альфа-частицами, он получил вместо азота кислород:

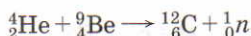


В этой реакции впервые было осуществлено искусственное превращение одного химического элемента в другой. Рассказывают, что Резерфорд был настолько поглощен исследованиями этого превращения, что даже опоздал как-то на важное заседание Комитета по военным разработкам. Объясняя свою задержку, он сказал: «Я был занят исследованиями, которые, как мне кажется, могут привести к искусственному расщеплению атома. Если это действительно так, то подобное исследование неизмеримо важнее, чем война!»

В этой же реакции из ядра азота было выбито ядро водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Отсюда Резерфорд заключил, что оно является составной частью сложных ядер и может считаться новой элементарной частицей. Эту частицу сначала хотели назвать бароном (от греч. «барос» — тяжесть), но более подходящим оказалось название «протон», которое было предложено Резерфордом в 1920 г. С одной стороны, оно происходило от греч. «протос» — первый, первичный, а с другой стороны, по замыслу Резерфорда, напоминало фамилию английского ученого У. Проута, который еще в 1815 г. выдвинул гипотезу о том, что атомы водорода входят в состав всех остальных атомов.

Нейтрон, как уже говорилось, был открыт значительно позже, в 1932 г. Автором этого открытия считается английский физик

Дж. Чедвик, хотя ядерная реакция, в которой впервые проявился нейтрон, а именно



наблюдалась за два года до этого немецкими физиками В. Боте и Г. Бекером. Именно они впервые заметили, что в результате облучения бериллия альфа-частицами возникает какое-то нейтральное излучение. Однако Боте и Бекер приняли его за гамма-излучение, и лишь Чедвик убедительно показал, что это новые частицы с нулевым электрическим зарядом. Поскольку это были нейтральные частицы, их решили назвать нейтронами (от лат. neuter — ни тот ни другой).

Ядерные реакции могут протекать как в естественных условиях (например, в недрах звезд), так и в лабораторных экспериментах. Для изучения ядерных реакций в лабораторных условиях необходимо располагать источниками и детекторами участвующих в них частиц.

*Источниками* частиц могут служить радиоактивные препараты, космические лучи, ядерные реакторы и ускорители заряженных частиц. Полученный от того или иного источника пучок частиц направляют на определенный блок вещества, называемый *мишенью*. В результате взаимодействия налетающих частиц с ядрами мишени возникают новые частицы. Для того чтобы их зарегистрировать, применяют специальные устройства, называемые *детекторами частиц*.

Различают два основных класса детекторов: трековые детекторы и счетчики. В *счетчиках* прохождение частицы вызывает появление электрического импульса. Это позволяет вести счет частиц, а также измерять некоторые их характеристики. Примером такого типа детекторов является газоразрядный *счетчик Гейгера*. Электрический импульс в таком счетчике возникает в результате того, что попавшая в него заряженная частица ионизирует атомы газа, заполняющего межэлектродное пространство прибора. Возникшие ионы образуют ток, импульс которого и регистрируется счетчиком.

В отличие от счетчиков *трековые детекторы* позволяют визуально наблюдать или фиксировать фотографическими и электронными методами *треки* частиц — следы, оставляемые ими в рабочем веществе детектора. Например, в *камере Вильсона* этот след образуют мельчайшие капельки жидкости, которые возникают в результате конденсации пара на ионах, образованных пролетевшей частицей. В другом детекторе — *пузырьковой камере* — на аналогичных ионах происходит не конденсация, а закипание жидкости, и трек оказывается состоящим из микроскопических пузырьков пара.

Для установления природы и свойств изучаемых частиц трековые детекторы помещают в сильное магнитное поле. Это поле искривляет треки частиц, и появляется возможность определения знака их заряда, импульса и других характеристик.





1. Что называется ядерной реакцией?
2. По какой формуле находится энергетический выход ядерной реакции?
3. При каком соотношении масс исходных и конечных частиц ядерная реакция является экзотермической?
4. Перечислите источники частиц, с помощью которых вызывают ядерные реакции.
5. Для чего нужны ускорители?
6. Расскажите об известных вам детекторах частиц.
7. На рисунке 105 представлена фотография треков альфа-частиц, одна из которых столкнулась с ядром азота и породила характерную «вилку», т. е. разветвление трека. Более жирный след в этой «вилке» принадлежит ядру кислорода. Какой частице принадлежит второй след?
8. Кто и когда открыл протон? нейтрон?



Рис. 105

## § 54. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА

В конце 1938 г. немецкие ученые Отто Хан и Фриц Штрассманн сообщили, что при облучении урана медленными нейтронами ядра урана «раскалываются» на несколько частей. Сначала этому никто не поверил, так как всем было известно, что для такого разрушения у используемых нейтронов просто не хватает энергии. Однако уже в январе 1939 г. Лизе Мейтнер и Отто Фриш написали статью, в которой показали, что такая реакция возможна. Их статья называлась «Деление урана с помощью нейтронов: новый тип ядерной реакции».

Рассматриваемое явление действительно представляло собой новый тип ядерной реакции. Его объяснение состояло не в том, что ядро урана «раскалывается» на части при ударе о него нейтрона, а в том, что, поглотив нейтрон, ядро переходит в неустойчивое состояние: оно начинает перестраиваться, менять свою форму и через некоторое время само «делится»<sup>1</sup> на две части.

Теория ядерного деления была разработана в 1939 г. Я. И. Френкелем в СССР и несколько позже Н. Бором и Дж. Уилером в США. Согласно их теории, когда тяжелое ядро захватывает нейтрон, энергия этого нейтрона распределяется между всеми входящими в состав ядра нуклонами. Затем, подобно жидкой капле, ядро начинает деформироваться и принимает вытянутую (гантелеобразную) форму (рис. 106). Кулоновское отталкивание его крайних протонов оказывается сильнее ядерного притяжения, и ядро разрывается на две части, называемые *осколками деления*.

<sup>1</sup> Термин «деление» Фриш заимствовал из биологии.

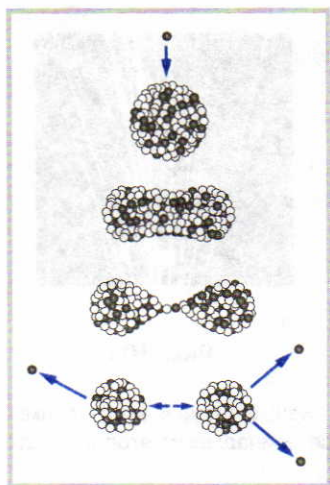
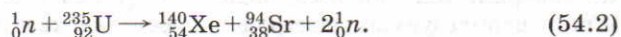
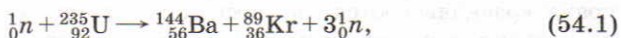


Рис. 106

Вообще говоря, ядро урана может разделиться и самопроизвольно, без поглощения нейтрона<sup>1</sup>. Однако соответствующий период полураспада составляет  $10^{17}$  лет, и потому такое (спонтанное) деление происходит достаточно редко. Захват же нейтрона увеличивает вероятность деления ядра в  $10^{45}$  раз!

Следует иметь в виду, что медленные (тепловые) нейтроны, т. е. нейтроны с энергией порядка 0,1 эВ и меньше, способны вызвать деление не любого изотопа урана. Из существующих в природе урановых изотопов подходит лишь уран-235. Для деления урана-238, который составляет 99,275% естественного урана, требуются быстрые нейтроны с энергией  $E > 1$  МэВ.

В результате деления ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  образуются два осколка, массы которых отличаются друг от друга примерно в 1,5 раза. Типичными примерами подобных реакций являются ядерные реакции вида



Возникающие в этих реакциях осколки оказываются сильно радиоактивными. В результате серии последовательных  $\beta$ -распадов они в конце концов превращаются в стабильные изотопы.

Каждая из рассматриваемых реакций сопровождается выделением значительной энергии. Эта энергия выделяется главным образом в виде кинетической энергии разлетающихся осколков (89%). Существенно меньшая часть энергии уносится образующимися нейтронами (нейтронами деления), а также  $\gamma$ -квантами, испускаемыми осколками при переходе из возбужденного состояния в основное.

В качестве примера рассмотрим энергетический выход реакции (54.2). На основании формулы (53.3) мы можем записать:

$$Q = (M_{\text{U}} - M_{\text{Sr}} - M_{\text{Xe}} - m_n)c^2. \quad (54.3)$$

Для того чтобы воспользоваться этим выражением, необходимо располагать значениями всех входящих сюда масс. Эти значения можно найти в специальных таблицах. Мы, однако, поступим по-другому.

<sup>1</sup> Спонтанное деление ядер урана открыли в 1939—1940 гг. советские ученые К. А. Петржак и Г. Н. Флеров. Чтобы избежать влияния космических лучей, свои окончательные исследования они провели на глубине 60 м под землей (на станции метро «Динамо» в Москве).



Выразим энергию реакции  $Q$  через энергии связи соответствующих ядер. Для этого представим сначала массу каждого ядра в виде разности между суммой масс входящих в него нуклонов и дефектом  $\Delta M$  его массы. Имеем

$$\begin{aligned} M_U &= 92m_p + 143m_n - \Delta M_U, \\ M_{Xe} &= 54m_p + 86m_n - \Delta M_{Xe}, \\ M_{Sr} &= 38m_p + 56m_n - \Delta M_{Sr}. \end{aligned}$$

Подставляя эти значения в уравнение (54.3) и учитывая, что каждый из дефектов массы равен отношению соответствующей энергии связи к квадрату скорости света в вакууме, получаем

$$Q = E_{cb}^{Xe} + E_{cb}^{Sr} - E_{cb}^U. \quad (54.4)$$

Таким образом, энергетический выход реакции деления может быть определен как разность между суммарной энергией связи осколков деления и энергией связи исходного ядра.

Полученная формула допускает обобщение. Энергия любой ядерной реакции равна разности суммарных энергий связи образующихся и исходных ядер:

$$Q = E'_{cb} - E_{cb}. \quad (54.5)$$

Отсюда следует, что если  $E'_{cb} > E_{cb}$ , то  $Q > 0$ . Это означает, что любая ядерная реакция, в результате которой суммарная энергия связи повышается, сопровождается выделением энергии.

Энергию связи можно найти с помощью графика, изображенного на рисунке 102. Глядя на этот график, можно даже без вычислений определить, будет ли та или иная реакция экзотермической или нет.

Вернемся к расчету энергетического выхода реакции (54.2). Из графика (см. рис. 102) мы видим, что у урана  $\epsilon_{cb} = 7,6$  МэВ и, следовательно,  $E_{cb}^U = 235 \cdot 7,6$  МэВ = 1786 МэВ; у ксенона  $\epsilon_{cb} = 8,3$  МэВ и  $E_{cb}^{Xe} = 140 \cdot 8,3$  МэВ = 1162 МэВ; у стронция  $\epsilon_{cb} = 8,6$  МэВ и  $E_{cb}^{Sr} = 94 \cdot 8,6$  МэВ = 808,4 МэВ. Таким образом, при делении одного ядра урана-235 выделяется энергия

$$Q = 1162 \text{ МэВ} + 808,4 \text{ МэВ} - 1786 \text{ МэВ} = 184,4 \text{ МэВ}.$$

При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделится энергия, равная  $7,5 \cdot 10^{10}$  Дж, что эквивалентно энергии, получаемой при сжигании почти трех тонн угля!

Фриш и Мейтнер были первыми, кто понял, какая гигантская энергия выделяется при делении тяжелых ядер. Но можно ли эту энергию как-то использовать — вот в чем был вопрос.

Отослав статью о ядерном делении в научный журнал, Фриш тут же написал обо всем своей матери. «Ощущение у меня такое, — писал он, — будто я, пробираясь сквозь джунгли, поймал за хвост слона и теперь не знаю, что с ним делать».

После того как ученые узнали о делении урана, эти реакции стали изучать во всех ведущих странах мира. Научные журналы буквально захлестнула волна статей, посвященных новым открытиям в области ядерной физики. Однако уже через год поток публикаций на эту тему вдруг резко оборвался. Стало ясно, что огромная энергия, выделяющаяся при делении урана, может быть использована в военных целях, и поэтому соответствующие исследования решили засекретить.

1. Опишите процесс деления ядра урана. 2. Какой из изотопов урана делится медленными нейтронами? 3. Во сколько раз энергия теплового нейтрона меньше удельной энергии связи ядра урана? 4. По какой формуле можно рассчитать энергетический выход реакции деления? 5. Во сколько раз энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, превышает энергию нейтрона, вызвавшего деление? 6. Выведите формулу (54.4).

## § 55. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

Предположим, что в среду, содержащую уран-235, попал нейтрон. Этот нейтрон может вызвать деление одного ядра. В результате такого деления, помимо осколков, возникнут два новых нейтрона, которые могут разделить еще два ядра. После этого появятся 4 нейтрона, которые, разделив следующие четыре ядра, породят уже 8 нейтронов, и т. д. (рис. 107). Таким образом, после первого деления, вызванного попаданием в урановую среду первичного нейтрона, число актов деления начинает лавинообразно нарастать, и реакция деления принимает самоподдерживающийся характер.

**Определение.** Самоподдерживающаяся реакция деления тяжелых ядер, в которой непрерывно воспроизводятся нейтроны, делящие все новые и новые ядра, называется **цепной реакцией деления**.

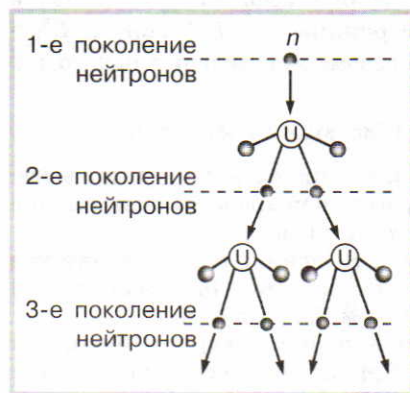


Рис. 107

Расчет этой реакции впервые был проделан в 1939—1940 гг. Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном (СССР).

Цепная реакция практически осуществима лишь на трех изотопах. Один из них —  $^{235}_{92}\text{U}$  — содержится в природном уране, а два других —  $^{233}_{92}\text{U}$  и  $^{239}_{94}\text{Pu}$  — получают искусственно.

Скорость нарастания цепной реакции характеризуют величиной, называемой коэффициентом размножения нейтронов.



**Определение.** Коэффициентом размножения нейтронов называется отношение числа нейтронов в одном каком-либо поколении цепной реакции к породившему их числу нейтронов предшествующего поколения.

Под сменой поколений здесь понимается ядерное деление, при котором старые нейтроны поглощаются, а новые рождаются. Если число нейтронов в произвольном  $i$ -м поколении обозначить через  $N_i$ , то число нейтронов в предыдущем поколении может быть обозначено как  $N_{i-1}$ . Их отношение и есть коэффициент размножения нейтронов:

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}. \quad (55.1)$$

Коэффициент размножения нейтронов зависит не только от того, сколько нейтронов выделяется в каждом акте деления ядра, но и от того, что с этими нейтронами происходит дальше. Такие факторы, как поглощение нейтронов различными ядрами без деления и вылет нейтронов из делящегося вещества наружу, ведут к уменьшению этого коэффициента.

Для того чтобы цепная реакция развивалась, а не гасла, количество порождаемых в ней нейтронов должно с течением времени возрастать или, по крайней мере, оставаться на одном и том же уровне. Поэтому *необходимое условие цепной реакции* может быть выражено в виде следующего соотношения:

$$k > 1. \quad (55.2)$$

Этому условию удовлетворяют два принципиально разных случая:  $k=1$  и  $k>1$ . Рассмотрим их по отдельности.

При  $k=1$  число нейтронов, участвующих в делении ядер, остается неизменным и реакция протекает стационарно, т. е. имеет спокойный, управляемый характер.

При  $k>1$  число нейтронов увеличивается; интенсивность реакции нарастает, и при  $k>1,006$  она может принять неуправляемый характер; при  $k=1,01$  почти мгновенно происходит взрыв.

Среда, в которой протекает цепная реакция ядерного деления, называется *активной зоной*. Ее минимальные размеры (т. е. размеры, при которых  $k=1$ ) называются *критическими*.

Массу активной зоны критических размеров называют *критической массой*  $m_{кр}$ . При массе урана  $m < m_{кр}$  цепная реакция не идет. И наоборот, заметное превышение критической массы ведет к неуправляемой реакции взрывного типа.

Значение критической массы определяется формой, структурой и внешним окружением активной зоны. Например, для шара из чистого урана-235 критическая масса составляет 47 кг (это шар диаметром 17 см). Если, однако, тот же уран прослоен многочисленны-

ми полиэтиленовыми пленками и окружен бериллиевой оболочкой, не дающей нейтронам вылететь наружу, то его критическая масса уменьшается до 242 г при диаметре всего лишь 3 см.

Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция ядерного деления, называется **ядерным реактором** (рис. 108).

Главной частью ядерного реактора является активная зона 2 с блоками ядерного топлива 1. Для увеличения коэффициента размножения нейтронов эту зону окружают отражателем 3. Поскольку с наибольшей вероятностью ядра  $^{235}\text{U}$  делятся медленными нейтронами, в ядерных реакторах используют специальные *замедлители* в этих частиц (например, тяжелую воду  $\text{D}_2\text{O}$  или графит)<sup>1</sup>.

Управление протеканием цепной реакции осуществляется с помощью специальных *регулирующих стержней* 5, которые с помощью дистанционного пульта управления вводят в активную зону реактора. Эти стержни изготавливают из материалов, сильно поглощающих нейтроны (кадмий, карбид бора и др.). Параметры активной зоны рассчитывают так, чтобы при полностью вставленных стержнях цепная реакция заведомо не шла.

При пуске реактора в его активную зону обычно вносят источник первичных нейтронов, хотя это и необязательно, так как спонтанное деление ядер урана и космические лучи дают достаточное количество этих частиц. Реактор начинает работать тогда, когда регулирующие стержни выдвинуты настолько, что коэффициент размножения нейтронов оказывается равным 1. По мере работы реактора его активная зона загрязняется («отравляется») осколками ядерного деления, что приводит к уменьшению  $k$ . Это уменьшение компенсируют дополнительным выдвиганием стержней. На случай внезапного увеличения интенсивности реакции и появления угрозы взрыва в реакторе имеются специальные аварийные стержни, введение которых в активную зону реактора немедленно прекращает реакцию.

Поскольку ядерный реактор является мощным источником нейтронов и гамма-излучения, в нем обязательно предусмотрена массивная *радиационная защита* 4, изготавливаемая из бетона с железным наполнителем.

Ядерный реактор является основным элементом *атомной электростанции* (рис. 109). В атомной электростанции (АЭС) энергия деления ядер преобразуется в электроэнергию. При этом отвод выделяющейся при реакции внутренней энергии из активной зоны ре-

---

<sup>1</sup> При этом способность нейтронов делить ядра урана-235 существенно превышает их способность поглощаться ураном-238 (без деления последнего). Поэтому цепная реакция становится возможной и в естественном уране, содержащем оба эти изотопа. В отсутствие замедлителя цепную реакцию можно осуществить, только если располагать достаточным количеством чистого  $^{235}\text{U}$ , отделенного от  $^{238}\text{U}$ .



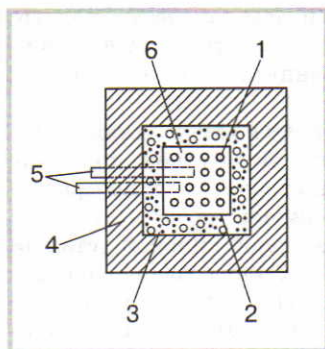


Рис. 108

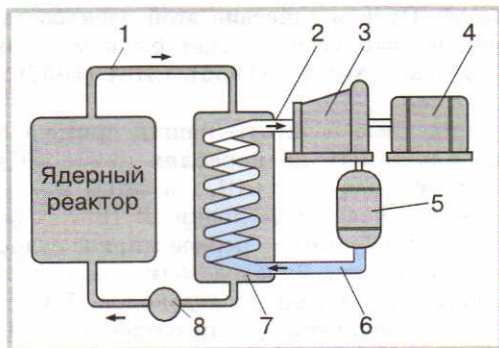


Рис. 109

актора осуществляется с помощью специального *теплоносителя* 1, в качестве которого может быть и обычная вода. Нагретая до 300 °С вода поступает из активной зоны в теплообменник (парогенератор) 7, а оттуда обратно в реактор. Эту воду называют теплоносителем 1-го контура. Для того чтобы она не закипела, ее держат под большим давлением. В теплообменнике вода 1-го контура отдаст внутреннюю энергию воде 2-го контура 6, которая при этом обращается в пар. Этот пар 2 подается в турбину 3, а она, в свою очередь, приводит в действие генератор 4 электрического тока. Конденсация отработанного пара происходит в конденсаторе 5. Цифрой 8 на схеме обозначен насос.

Первый ядерный реактор, в котором впервые в мире была осуществлена управляемая цепная реакция деления ядер, был пущен 2 декабря 1942 г. под руководством Энрико Ферми. Этот реактор был построен под трибунами стадиона Чикагского университета и представлял собой сооружение высотой в несколько метров из 45 т естественного урана и примерно 400 т графита. Цепная реакция с коэффициентом размножения нейтронов  $k=1,0006$  длилась в течение 28 мин, после чего реактор был остановлен.

В СССР первый ядерный реактор был введен в строй в 1946 г. Его конструированием и непосредственным запуском руководил советский ученый И. В. Курчатов. В то время это был единственный реактор в Европе. Сейчас в мире работает около тысячи ядерных реакторов различного типа.

Первая в мире атомная электростанция была построена в 1954 г. в г. Обнинске. За ее создание Д. И. Блохинцев, Н. А. Доллежал, А. К. Красин и В. А. Малых были награждены Ленинской пре-



Игорь Васильевич  
Курчатов

мией. Пуск в действие этой электростанции доказал всему человечеству, что «атом может быть мирным». После этого АЭС стали строить в Англии (1956), США (1957), Франции, Италии и других странах<sup>1</sup>.

Ядерные реакторы нашли применение и в силовых установках, используемых на кораблях атомного флота. Во второй половине 50-х гг. сначала в США, а затем и у нас в стране были построены атомные подводные лодки. В 1957 г. был спущен на воду атомный ледокол «Ленин» — первое мирное судно с ядерной силовой установкой на борту. Впоследствии у нас в стране было создано еще несколько аналогичных ледоколов. В 60—70-е гг. атомные суда невоенного назначения стали создавать в США («Саванна»), ФРГ («Отто Ган») и Японии («Муцу»).

- ?
1. Что представляет собой цепная реакция деления? 2. На каких изотопах она может протекать? 3. Что такое коэффициент размножения нейтронов? 4. В чем заключается необходимое условие цепной реакции? 5. Чему равен коэффициент размножения нейтронов для идеализированной реакции, показанной на рисунке 107? В чем заключается ее идеализация? Почему на практике  $k$  оказывается меньше? 6. Что такое критическая масса? 7. Что представляет собой ядерный реактор? Из каких основных элементов он состоит? 8. Какие процессы происходят в атомной электростанции?

### Для дополнительного чтения

## § 56. ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ

15 марта 1939 г. фашистская Германия оккупировала Чехословакию, и в ее распоряжении оказались самые богатые в Европе урановые рудники. На следующий день в адрес Министерства ВМС США было направлено письмо, в котором американский физик Дж. Пеграм сообщил, что «эксперименты, проведенные в физических лабораториях Колумбийского университета, показали, что могут быть созданы условия, при которых химический элемент уран окажется в состоянии освободить большой избыток своей атомной энергии, и что это может означать возможность использовать уран в качестве взрывчатого вещества, которое выделяло бы в миллион раз больше энергии на килограмм вещества, чем любой известный тип взрывчатки».

<sup>1</sup> В некоторых странах (например, во Франции и Швеции) АЭС дают более половины всей вырабатываемой в них электроэнергии. В целом производимая с помощью ядерных реакторов энергия составляет около 6% от всего мирового производства электроэнергии.



Однако в министерстве ничего не поняли, и никаких действий, направленных на организацию работ по созданию нового оружия, не последовало. Между тем Германия неожиданно прекратила продажу урана с захваченных ею рудников. Встревоженные этой ситуацией, американские физики решили обратиться к президенту. В то время в США был только один ученый, с которым считались все политики. Это был Альберт Эйнштейн.

2 августа 1939 г. американские физики Л. Сцилард и Э. Теллер приехали к Эйнштейну и попросили его подписать письмо, адресованное президенту Ф. Д. Рузвельту. Прочитав письмо, в котором шла речь о необходимости создания атомного оружия, Эйнштейн спросил:

— Имеем ли мы право убивать людей посредством энергии, которая скрыта за семью замками самой природой и недоступна людям?

— Энергия урана будет использована исключительно для самозащиты от фашизма, — пообещали ему.

11 октября 1939 г. письмо, подписанное Эйнштейном, было вручено Рузвельту. Впоследствии Эйнштейн неоднократно сожалел о том, что подписал это письмо. «Знай я, что немцы не смогут сделать атомную бомбу, я бы и пальцем не пошевелил», — говорил он.

На Рузвельта, однако, письмо Эйнштейна не произвело должного впечатления. И лишь тогда, когда ему напомнили историю о Наполеоне, не обратившем внимания на предложение Фултона создать паровой флот, президент наконец дал указание начать действовать.

Прежде всего нужно было решить проблему с получением изотопа урана-235. В природной руде он составляет всего лишь 0,72%, что соответствует одному ядру  $^{235}\text{U}$  на 140 ядер  $^{238}\text{U}$ . Химически эти изотопы неразличимы, но для атомного оружия подходил лишь один из них.

Никаких заводов по разделению изотопов в то время не существовало, и проблема поначалу казалась неразрешимой. Было подсчитано, что если разделять изотопы привычным для физиков электромагнитным методом (с помощью масс-спектрографа), то для получения в лаборатории всего лишь 1 г урана-235 потребуется несколько тысяч лет!

Решить проблему разделения изотопов в промышленных масштабах удалось лишь в 1944 г., когда в Ок-Ридже (США) был построен гигантский газодиффузионный завод. Диффузионный метод разделения изотопов (см. § 48) был предложен английскими физиками О. Фришем и Р. Пайерлсом еще в 1939 г., однако для практического внедрения их предложения потребовалось несколько лет.

Одна из трудностей заключалась в том, что практически все соединения урана (при нормальных условиях) представляют собой твердые тела, а для диффузионного метода требовался газ. Позже, однако, выяснилось, что бесцветное соединение  $\text{UF}_6$  (гексафторид урана) уже при температуре  $56,5^\circ\text{C}$  переходит в газообразное состояние. Этот газ и решено было использовать.

Пропуская его несколько тысяч раз через пористые перегородки, содержащие около миллиона отверстий на каждом квадратном сантиметре, удалось получить необходимую концентрацию урана-235. Тем самым проблема с получением урана была решена.

Помимо урана-235, американские заводы стали производить и другой элемент — плутоний-239, который также мог использоваться в качестве ядерного заряда. Для получения этого элемента использовался не делящийся медленными нейтронами изотоп  $^{238}_{92}\text{U}$ . Поглощая нейтроны, уран-238 превращался сначала в радиоактивный изотоп  $^{239}_{92}\text{U}$ , а затем (в результате двух  $\beta$ -распадов) — в 94-й элемент таблицы Менделеева — плутоний-239.

В своих секретных лабораториях американские ученые работали одновременно над двумя типами *атомных бомб*. Бомба первого (или «пушечного») типа схематически изображена на рисунке 110. В ее состав входят источник первичных нейтронов 1 и два куска почти чистого урана-235 или плутония-239, обозначенные на рисунке цифрой 2. Масса каждого из этих кусков меньше критической, и потому по отдельности они взорваться не могут. Однако после выстреливания одной частью ядерного заряда в другую (с помощью запала 3) образуется один кусок, масса которого больше критической, и бомба взрывается.

В бомбе второго (или «имплозивного») типа ядерный заряд имеет форму шара 2, окруженного со всех сторон обычным взрывчаточным веществом 3 (рис. 111). Масса этого шара меньше критической. При взрыве окружающего его вещества создается направленная к центру шара взрывная волна, которая сжимает ядерный заряд до надкритической плотности (т. е.  $\rho > \rho_{кр}$ ). В результате этого возникает цепная реакция, которая тут же взрывает бомбу.

При взрыве атомной бомбы температура в ее центре достигает 100 миллионов градусов, а давление — триллиона ( $10^{12}$ ) атмосфер. При этом возникает разрушительная ударная волна, интенсивное световое излучение, проникающая радиация (поток гамма-лучей и нейтронов), а также мощный электромагнитный импульс, выводящий из строя радиоаппаратуру и средства связи. Помимо этого, образуются радиоактивные осадки, которые заражают окружающую местность, воду и сам воздух.

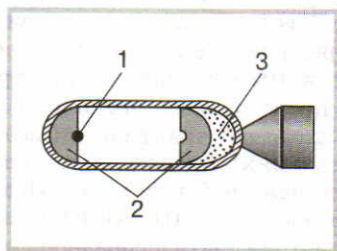


Рис. 110

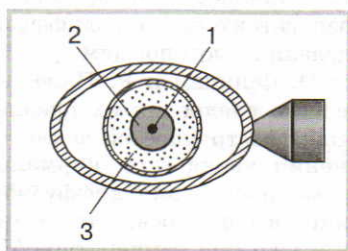


Рис. 111



Мощность ядерного взрыва принято характеризовать *протиловым эквивалентом*. Так, например, говоря, что мощность той или иной бомбы равна 10 000 т, подразумевают, что при ее взрыве выделяется такая же энергия, как и при взрыве 10 000 т тринитротолуола.

Первая атомная бомба была создана под руководством американского физика Роберта Оппенгеймера, назначенного в 1943 г. начальником специальной атомной лаборатории в Лос-Аламосе (США). Эту бомбу поместили на вершине 30-метровой стальной башни, которую установили в пустынной местности на юго-востоке штата Нью-Мексико, что в восьмидесяти километрах от военно-воздушной базы Аламогордо. Испытание бомбы было назначено на день, предшествующий открытию Потсдамской конференции, на которую должны были прибыть главы правительств СССР, США и Англии.

Ядерный взрыв, прогремевший 16 июля 1945 г. в 5 ч 30 мин утра недалеко от Аламогордо, ознаменовал начало новой, атомной эры. «В этот момент как будто из недр Земли появился свет, свет не этого мира, а многих солнц, соединенных воедино. Это был такой восход, какого никогда не видел мир, — писал очевидец этого взрыва У. Л. Лоуренс, — громадное зеленое сверхсолнце поднялось в доли секунды на высоту более чем 2,5 тысячи метров. Оно поднималось все выше, пока не достигло облаков, освещая землю и все небо ослепительно ярким светом... Этот момент показался нам вечностью. Время остановилось. Пространство сжалось до острия булавки. Казалось, что Земля раскололась и небеса разверзлись. Было ощущение, что тебе довелось наблюдать Рождение мира.

Вслед за огненным шаром с земли поднялось громадное облако. Сначала это была гигантская колонна, которая затем приняла формы фантастически огромного гриба... В течение этого очень короткого, но кажущегося необычайно долгим периода не было слышно ни единого звука... Потом из этой тишины возник громовой раскат. В течение короткого времени то, что мы видели, повторилось в звуке. Казалось, тысячи мощных фугасных бомб разорвались одновременно и в одном месте. Гром прокатился по пустыне... Земля задрожала под ногами, как будто началось землетрясение...

Это было подобно величественному финалу мощной симфонии природы, очаровывающей и пугающей, воодушевляющей и подавляющей, зловещей, сокрушительной, полной больших надежд и больших опасений».

Как только позволила обстановка, ученые на специальных танках обследовали район взрыва. Мощность взрыва оказалась эквивалентной мощности двух тысяч самых крупных бомб времен Второй мировой войны. Огромная стальная башня, на которой находилась атомная бомба, исчезла. Она попросту испарилась...

Сведения об успешном испытании новой бомбы тут же были отравлены президенту США в Потсдам. Получив их, Трумэн обо всем рассказал Черчиллю. Сталина они решили проинформировать лишь в общих чертах, не вдаваясь в подробности и не называя нового ору-

жия атомным. После разговора руководителей США и СССР Черчилль подошел к Трумэну. «Ну как?» — спросил английский премьер. «Он не задал мне ни одного вопроса», — ответил Трумэн. Отсюда Черчилль заключил, что Сталин не понял всей важности сделанного ему сообщения, так как, по словам Черчилля, он «не знал ни о гигантских исследовательских работах, которые столько времени велись в США и Англии, ни о производстве, на которое американцы рискнули истратить два миллиарда долларов, не будучи уверенными в успехе».

На самом деле советское правительство уже давно располагало данными о работах над атомным оружием в США. Поэтому, вернувшись с заседания, Сталин тут же поделился новостью с Молотовым<sup>1</sup>. «Цену себе набивают», — сказал Молотов. «Пусть набивают, — рассмеялся Сталин. — Надо будет сегодня же переговорить с Курчатовым об ускорении нашей работы».

Уже через год в нашей стране была осуществлена управляемая цепная реакция деления урана, а в 1947 г. Молотов официально заявил, что секрета атомной бомбы больше не существует. В США приняли это заявление как блеф, считая, что русские смогут решить проблему создания атомной бомбы не ранее 1952 г. Однако 29 августа 1949 г. на одном из полигонов СССР был произведен ядерный взрыв, который окончательно развеял все сомнения Запада в отношении наличия у нас атомной бомбы. При этом мы на 3 года опередили Англию, на 11 лет — Францию, на 15 лет — Китай и на 25 лет — Индию.

Так случилось, что фашистская Германия потерпела поражение еще до того, как была создана атомная бомба. По этой причине многие прогрессивные ученые считали, что в условиях, когда ядерная угроза над миром исчезла, не имеет смысла продолжать работу над созданием столь ужасного оружия. Весной 1945 г. была сделана отчаянная попытка предотвратить атомную бомбардировку японских городов. В адрес президента Рузвельта снова было отправлено письмо за подписью Эйнштейна, только на этот раз с противоположной просьбой. Письмо уже лежало на столе президента, когда весь мир узнал, что Рузвельт неожиданно скончался.

Новым президентом США стал Гарри Трумэн. Желая иметь в своем распоряжении ядерную «дубину», с помощью которой он мог бы диктовать другим свои условия, Трумэн сразу же по окончании работы Потсдамской конференции дал указание сбросить атомные бомбы на Японию. Его приказ был выполнен еще до того, как он успел доплыть до Америки.

6 августа 1945 г. гигантская трехметровая бомба с урановым зарядом «пушечного» типа была сброшена на ничего не подозревавшую Хиросиму.

«Ослепительно зеленоватая вспышка, взрыв, сознание подавлено, волна горячего ветра, и в следующий момент все вокруг

<sup>1</sup> В. М. Молотов был в то время министром иностранных дел СССР.



загорается. Тишина, наступившая вслед за грохотом ни с чем не сравнимой, дотоле неслыханной силы, нарушается треском разгорающегося огня. Под обломками рухнувшего дома лежат оглушенные люди, в пламени гибнут женщины, гибнут в огненном кольце очнувшиеся и пытающиеся спастись люди...

Миг — и с людей падает вспыхнувшая одежда, вздуваются руки, лицо, грудь, лопаются багровые волдыри, и лохмотья кожи сползают на землю... Это привидения. С поднятыми руками они движутся толпой, оглашая воздух криками боли. На земле грудной ребенок, мать мертва. Но ни у кого нет сил прийти на помощь, поднять. Оглушенные и обожженные люди, обезумев, сбились ревущей толпой и слепо тычутся, ища выхода... На искалеченных людей хлынули черные потоки дождя, и ветер принес удушающий смрад...» — так описывали это страшное событие очевидцы взрыва.

В одно мгновение Хиросима превратилась в пылающие руины с жуткими тенями, оставшимися на стенах чудом уцелевших зданий от сгоревших заживо людей.

Но этого показалось мало. И через три дня та же участь постигла другой японский город — Нагасаки. 9 августа на этот город была сброшена еще большая бомба с плутониевым зарядом «имплозивного» типа.

В результате двух атомных бомбардировок пострадали сотни тысяч мирных жителей. Но и это не остановило войны с Японией. 9 августа 1945 г. начались боевые действия Советской Армии на Дальнем Востоке, и только в сентябре Япония подписала акт о капитуляции.

---

## § 57. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Посреди Тихого океана есть две цепочки крохотных коралловых островков, окружающих огромные лагуны. Это атоллы Эндиветок и Бикини. Некоторые из этих островков могут показаться маленьким раем. Но среди тенистых пальм и кокосовых деревьев, рощи которых придают этим местам неповторимый вид, можно заметить жуткие таблички, на которых крупными буквами написано: «Не ешьте плодов с деревьев, они отравлены».

Попасть в этот радиоактивный рай можно лишь по специальным пропускам, ибо с 1946 г. здесь располагается американская база для проведения испытаний ядерного оружия.

Сначала здесь испытывали атомные бомбы. Но 1 ноября 1952 г. на одном из коралловых островов атолла Эндиветок — Элугелабе — было взорвано принципиально новое устройство, которое оказалось в 500 раз более мощным, чем атомная бомба, сброшенная на Хиросиму. Теперь на месте острова огромный кратер диаметром в полтора километра и глубиной с семнадцатизэтажный дом.

Во время взрыва на Элугелабе на Земле впервые была осуществлена термоядерная реакция неуправляемого типа.

Термоядерными реакциями называются ядерные реакции между легкими атомными ядрами, протекающие при очень высоких температурах (порядка  $10^8$  К и выше). К ним относятся реакции *термоядерного синтеза*, т. е. реакции, в которых из легких ядер синтезируются более тяжелые, например дейтерий-тритиевая реакция типа



а также реакции *термоядерного деления*, например:



Для осуществления подобных реакций необходимо, чтобы участвующие в них ядра сблизилась на очень малое расстояние и попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствуют кулоновские силы отталкивания. Чтобы их преодолеть, ядра должны обладать очень большой кинетической энергией. Сообщить такую энергию можно, лишь нагрев смесь реагирующих веществ до температуры в сотни миллионов градусов. Поэтому соответствующие реакции и называются *термоядерными* (от лат. *therme* — тепло).

Энергетический выход термоядерной реакции можно определить по формуле (54.5):

$$Q = E'_{\text{св}} - E_{\text{св}}, \quad (57.3)$$

где  $E'_{\text{св}}$  — суммарная энергия связи продуктов реакции, а  $E_{\text{св}}$  — суммарная энергия связи ядер, вступающих в нее. Из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа (см. рис. 102) видно, что как в первой из приведенных выше реакций, так и во второй  $E'_{\text{св}} > E_{\text{св}}$ . Это означает, что обе эти реакции идут с выделением энергии. Как и в реакции деления, эта энергия может в миллионы раз превосходить ту энергию, которая выделяется при сжигании обычного химического топлива (угля, нефти и т. д.).

Например, энергетический выход реакции (57.1) составляет 17,6 МэВ. Учитывая, что в 1 г дейтерий-тритиевой смеси прореагировать могут  $1,2 \cdot 10^{23}$  пар таких ядер, нетрудно подсчитать, что 1 г этого термоядерного горючего в результате «сжигания» даст примерно  $3,4 \cdot 10^{11}$  Дж, что в 4,5 раза больше той энергии, которая выделяется при делении такой же массы урана.

Примерно такой же энергетический выход имеет и реакция термоядерного деления (57.2). Однако температура и некоторые другие параметры, характеризующие эту реакцию, оказываются настолько большими, что в настоящее время работы по их осуществлению не ведутся.

Наиболее эффективной и перспективной сейчас считается реакция (57.1), в которой синтезируется гелий. Осуществление *управляемой реакции термоядерного синтеза* (УТС) сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Дело в том, что необходимый для этой реакции дейтерий содержится в воде морей и океанов (в виде молекул HDO и D<sub>2</sub>O) в таком количестве, что его хватит на сотни миллионов лет. Тритий же можно получать пу-



тем облучения жидкого лития (запасы которого также огромны) нейтронами от ядерного реактора:



Важно также и то, что использование термоядерных реакций не будет сопровождаться загрязнением окружающей среды, так как в них (в отличие от реакций деления тяжелых ядер) не образуются радиоактивные отходы.

Проблема УТС усиленно разрабатывается в России, США и других странах примерно с 1951 г. Однако до сих пор она так и не решена. С помощью мощных газовых разрядов, гигантских импульсов лазерного излучения и других методов удается нагреть вещество до очень высокой температуры, но удержать возникающую при этом плазму в течение необходимого для поддержания реакции времени не удается.

В настоящее время осуществлена лишь неуправляемая реакция синтеза взрывного типа в *водородной* (или *термоядерной*) бомбе.

### Для дополнительного чтения

Устройство такой бомбы схематически показано на рисунке 112. В качестве запала в ней используется обычная атомная бомба 1, а термоядерным горючим 2 является твердое вещество LiD, называемое дейтеридом лития (соединение дейтерия с изотопом лития  ${}_3^6\text{Li}$ ). Применение именно этого вещества дает возможность отказаться в соответствующих боеприпасах от непосредственного использования очень дорогого (и радиоактивного!) трития.

Сначала в водородной бомбе взрывается находящаяся внутри ее атомная бомба. Этот взрыв сопровождается резким ростом температуры, а также возникновением потока нейтронов и электромагнитного излучения. Нейтроны вступают в реакцию с изотопом лития и в соответствии с уравнением (57.4) образуют тритий. Образование трития и повышение температуры до нужного значения инициируют термоядерную реакцию (57.1), которая и дает основное выделение энергии. При этом 70% этой энергии уносится быстрыми нейтронами и 20% — ядрами атомов гелия.

Если корпус бомбы изготовить из природного урана-238, стоимость которого относительно невелика, то быстрые нейтроны вызовут в нем цепную реакцию деления, и произойдет третья фаза взрыва. Применение таких (комбинированных) боеприпасов, действующих по принципу «деление — синтез — деление», позволяет создать оружие практически не ограниченной мощности.

Первая в мире водородная бомба была создана в СССР (И. В. Курчатов,

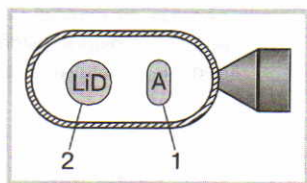


Рис. 112

А. Д. Сахаров). Ее взрыв 12 августа 1953 г. на Семипалатинском ядерном полигоне буквально ошеломил весь мир. Никто тогда и представить себе не мог, что Россия сумеет обогнать США в создании водородного оружия. Между августом 1953 г. и маем 1956 г., когда под руководством Э. Теллера в США была создана своя водородная бомба, Советский Союз был единственной державой на Земле, обладавшей запасом термоядерного оружия. Что касается тех водородных устройств, которые американцы начали испытывать в 1952 г., то это были гигантские 50-тонные наземные сооружения размером с двухэтажный дом, которые не могли быть использованы в качестве транспортабельного оружия.

В 1957 г. термоядерное оружие было создано в Англии, в 1967 г. — в Китае и в 1968 г. — во Франции. К настоящему времени в арсеналах разных стран накоплено уже более 50 тысяч водородных бомб. Большинство из них имеет мощность порядка  $10^5$ — $10^6$  т. Но среди них есть и свои «рекордсмены». Так, еще в 1961 г. Н. С. Хрущев громко заявил, что в СССР есть бомба в 100 миллионов тонн тротила.

---

Ядерное оружие представляет огромную угрозу всему человечеству. Согласно расчетам взрыв термоядерного заряда мощностью 20 Мт уничтожит все живое на расстоянии до 140 км от его эпицентра. В войне с применением такого оружия не будет ни победителей, ни побежденных. Поэтому народы многих стран борются за запрещение ядерного оружия при постепенном уничтожении того, что уже накоплено.

Но ядерные взрывы могут быть использованы не только в военных, но и в мирных целях. Например, подземные взрывы с использованием ядерного заряда применялись для крупномасштабных горных работ, добычи полезных ископаемых, создания в глубине пластичных пород специальных емкостей-хранилищ.

Термоядерные реакции играют также очень важную роль во многих астрофизических явлениях. Именно ими, например, обусловлено происхождение различных химических элементов в природе. Термоядерное происхождение имеет и та энергия, которая излучается Солнцем и другими звездами.

- ? 1. Перечислите поражающие факторы ядерного оружия. 2. Чем отличается атомная бомба от водородной? 3. Что представляют собой термоядерные реакции? 4. Почему ядерные реакции синтеза происходят лишь при очень высокой температуре? 5. Какую роль играют термоядерные реакции в астрофизических явлениях?



## § 58. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

**Ионизирующими** называют излучения, взаимодействие которых со средой приводит к ионизации ее атомов и молекул. К ним относятся рентгеновские и гамма-лучи, а также потоки альфа-частиц, электронов, протонов и нейтронов.

Исследование их биологического действия началось в конце XIX в. Сначала были обнаружены ожоги, вызванные X-лучами, открытыми в 1895 г. В. К. Рентгеном.

В 1900 г. немецкие ученые Вальхов и Гизель сообщили о том, что ими обнаружено биологическое действие радия. Узнав об этом, Пьер Кюри тут же подверг действию радия свое предплечье. Обнаружив через некоторое время повреждение кожи, он написал заметку, в которой детально описал свои наблюдения: «Кожа покраснела на поверхности в шесть квадратных сантиметров; имеет вид ожога, но не болит или болезненна чуть-чуть. Через некоторое время краснота, не распространяясь, начинает становиться интенсивнее; на двадцатый день образовались струпья, затем рана, которую лечили перевязками...»

Аналогичный эффект обнаружил и Анри Беккерель. Перенося пробирку с радием в жилетном кармане, он получил ожог. «Радий я люблю, но сердит на него!» — пожаловался он, прибежав к Кюри с сообщением о своем открытии.

В первое время ученые, работавшие с радиоактивными препаратами, не знали о смертельной опасности, которая им грозит, и поэтому не предпринимали соответствующих мер безопасности. Из-за этого два поколения Кюри умерли от лучевой болезни. Энрико Ферми прожил всего 53 года, Игорь Васильевич Курчатов — 57 лет.

Наиболее интенсивно исследования биологического действия ионизирующих излучений стали проводиться после применения ядерного оружия в войне с Японией. Было установлено, что эти излучения вызывают возбуждение и ионизацию молекул, которые могут привести к повреждению (а при больших дозах к гибели) клеток и нарушению клеточного деления (митоза). Нарушение нормального хода митоза, в свою очередь, сопровождается хромосомными перестройками и возникновением мутаций, ведущих к изменениям в генетическом аппарате клетки. Из-за этого биологическое действие ионизирующих излучений не ограничивается подвергнутым облучению организмом, а распространяется и на последующие поколения.

Действие радиации приводит к появлению у человека *лучевой болезни*, которая (в зависимости от степени поражения организма) может сопровождаться тошнотой, рвотой, общей слабостью, кровоизлияниями, повышением температуры, выпадением волос, поражениями глаз, образованием язв и другими симптомами. При этом особая опасность заболевания усугубляется существованием скрыто-

го (латентного) периода, из-за которого развитие лучевого поражения наблюдается не сразу.

Мерой ожидаемой радиационной опасности является физическая величина, которая обозначается буквой  $H$  и называется **эквивалентной дозой** излучения:

$$H = K \frac{E}{m}. \quad (58.1)$$

Отношение  $E/m$  в этой формуле выражает энергию ионизирующего излучения, поглощенную единицей массы облученного вещества, а  $K$  — это так называемый *коэффициент качества излучения*. Для рентгеновского излучения, гамма-лучей и бета-частиц  $K=1$ , для тепловых нейтронов  $K=3$ , для нейтронов с энергией 0,5 МэВ  $K=10$ , для быстрых нейтронов с энергией 5 МэВ  $K=7$ , для протонов  $K=10$ , для альфа-частиц  $K=10-20$ .

Единицей эквивалентной дозы в СИ является 1 Зв (*зиверт*). На практике распространена также внесистемная единица дозы — бэр: 1 бэр = 0,01 Зв.

Если процесс облучения происходит в течение длительного времени, то, накапливаясь, поглощенная организмом доза становится все больше и больше. Доза, получаемая организмом в единицу времени, называется *мощностью дозы*.

Мощность эквивалентной дозы *естественного фона* ионизирующих излучений, образуемого космическими лучами, а также радиоактивностью почвы, воды, воздуха и самого человека, составляет в среднем 1,25 мЗв/год.

Для человека, непрерывно подвергающегося облучению на протяжении всей своей трудовой деятельности (50 лет), допустимой, т. е. безопасной как для самого человека, так и для последующих поколений, считается мощность дозы, не превышающая 50 мЗв/год.

Если все тело человека в течение короткого времени подвергается облучению с эквивалентной дозой 3—5 Зв, то в 50% случаев через 1—2 месяца наступает смерть. Доза 10—50 Зв, полученная при таких же условиях, приводит к смерти через 1—2 недели. При дозе 200—250 Зв смерть наступает «под лучом».

Наряду с этим облучение живых организмов может оказать и определенную пользу, что находит применение в *лучевой (или радио-) терапии*. Так, например, повышенная чувствительность к облучению молодых, быстрорастущих и размножающихся клеток лежит в основе использования радиоактивного излучения для разрушения состоящих именно из таких клеток злокачественных опухолей.



1. Какие излучения называют ионизирующими? Приведите примеры.
2. Что называют эквивалентной дозой излучения? 3. К каким последствиям может привести облучение человека радиоактивными лучами?



## Глава 9. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

На протяжении нескольких тысячелетий пытливый человеческий ум волновал вопрос: «Из чего сделан мир?» С тех пор как древние греки все существующее попытались свести к четырем «стихиям» (воздух, вода, земля и огонь), немало различных картин мира сменили друг друга. Однако вера в то, что физический мир можно построить из небольшого числа некоторых первичных существей, или элементов, никогда не покидала людей...

### § 59. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

До того как выяснилось, что атомы имеют сложное строение, именно они представлялись теми мельчайшими «кирпичиками», из которых построен весь мир. Но атомы оказались делимы, и физики снова принялись за поиски основных элементов Вселенной.

В 1932 г. их труды увенчались успехом: оказалось, что весь мир можно построить всего из четырех элементов — света (фотонов), протонов, нейтронов и электронов. Из протонов, нейтронов и электронов можно было сконструировать любой атом, из атомов — молекулы, а из молекул — все остальное.

Но эта простота оказалась иллюзорной. Для объяснения ядерных сил потребовались пи-мезоны, а для объяснения бета-распада — нейтрино. А с обнаружением еще и позитронов с мюонами число известных элементарных частиц выросло от четырех до десяти. В 1950-х гг. было открыто примерно еще столько же. А потом новые частицы посыпались как из рога изобилия.

Параллельно с открытием новых частиц одна за другой отмирали теории, оказавшиеся неспособными объяснить их свойства.

Все это, по словам американского физика Л. Купера, привело к тому, что по сравнению с законченными пропорциями механики Ньютона и изящными арками электродинамики Максвелла физика элементарных частиц стала напоминать «беспорядочную мастерскую»: «тут колонна, там незаконченный фриз и везде хаос битых и разбросанных камней».

Мир элементарных частиц оказался очень сложным и запутанным. Но разобраться в нем все-таки удалось. И хотя окончательной теории элементарных частиц, объясняющей все многообразие их свойств, еще не построено, многое уже прояснилось.

Прежде чем дать краткий обзор существующих элементарных частиц, уточним, что мы понимаем под этим термином.

**Элементарными частицами** называются такие микрообъекты, которые невозможно расщепить на составные части. Поскольку молекулы, атомы и ядра (за исключением ядра атома водорода) можно подвергнуть такому расщеплению, они к элементарным частицам не относятся.

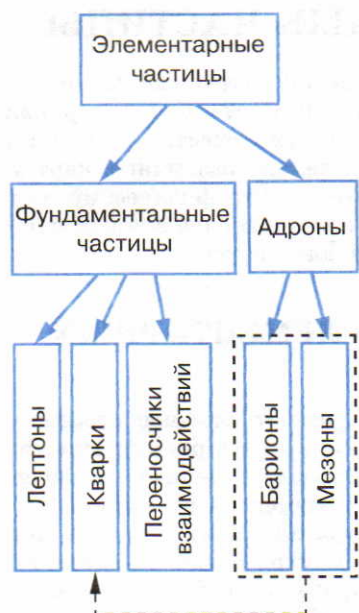


Рис. 113

### Фундаментальные частицы

Истинно элементарными частицами в настоящее время считаются переносчики фундаментальных взаимодействий, лептоны и кварки. Рассмотрим каждую из этих групп частиц.

1. **Переносчики взаимодействий.** Согласно квантовой теории поля все существующие в природе фундаментальные взаимодействия (сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное) имеют *обменный характер*. Это означает, что в качестве элементарных актов любого из перечисленных взаимодействий выступают процессы, при которых частицы испускают и поглощают определенные кванты. Эти кванты и называются переносчиками соответствующих взаимодействий. Обмениваясь ими, частицы взаимодействуют одна с другой.

Каждому типу фундаментальных взаимодействий соответствуют свои кванты. Их названия, обозначения и массы (выраженные в массах электрона) приведены в таблице 4.

Переносчики слабого взаимодействия иначе называются *промежуточными бозонами*. Используемый здесь термин «вион» происходит от английского сокращения *wion* — *weak intermediate boson*.

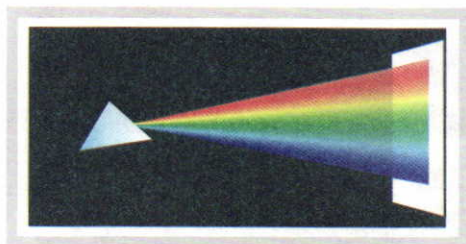
Название же переносчика сильного взаимодействия происходит от английского слова *glue* (клей), что напоминает о том, что данные кванты как бы склеивают составные части адронов в единое целое.

Сказанное, однако, не означает, что элементарные частицы не могут состоять из каких-то других, еще более «мелких» образований. Более того, большинство из них имеет как раз сложное строение. Но составные части этих частиц удерживаются такими силами, что разорвать соответствующие связи согласно современным представлениям принципиально невозможно.

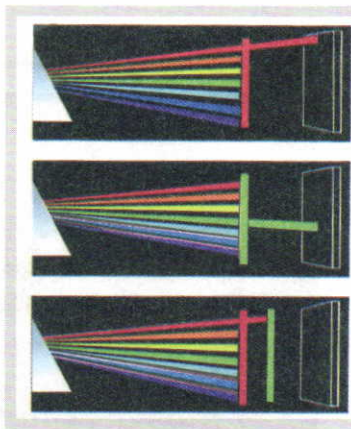
В соответствии с этим все элементарные частицы делятся на два больших класса: **адроны** (частицы, имеющие сложное строение) и **фундаментальные** (или **истинно элементарные**) частицы, которые в настоящее время считаются бесструктурными и потому претендующими на роль действительно первичных элементов материи (рис. 113).



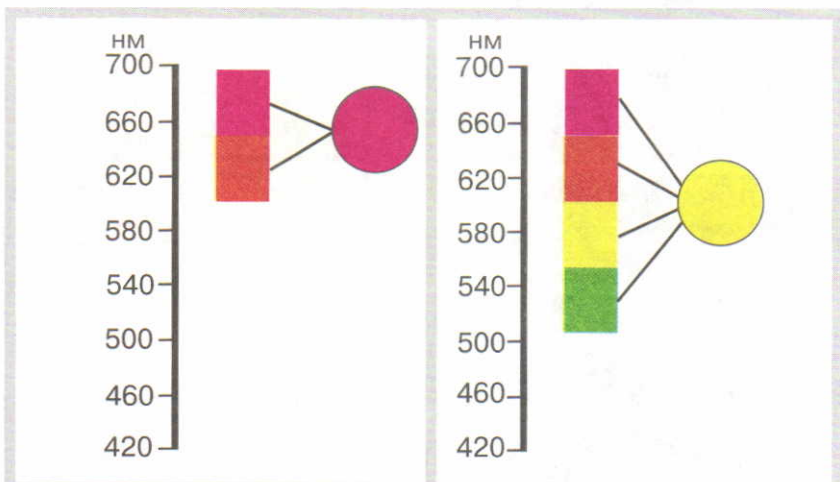
# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА



Разложение белого света  
стеклянной призмой

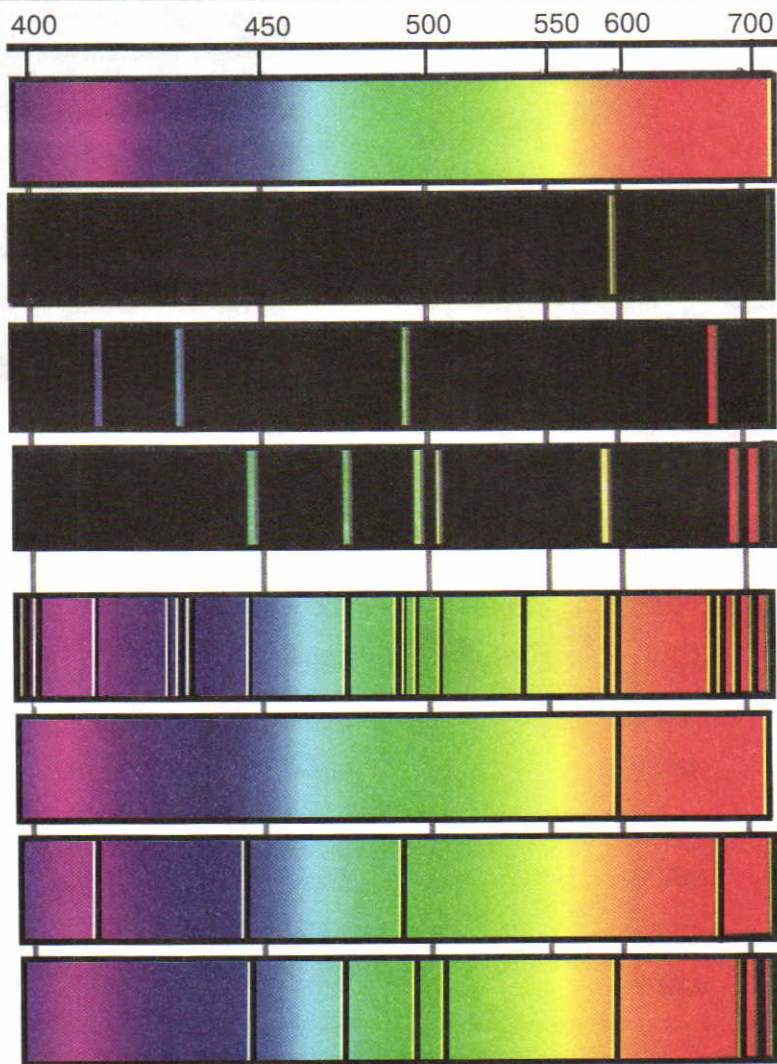


Прохождение света через  
цветные стекла



Спектральный состав желтого и  
красного цвета

## Линейчатые спектры излучения и поглощения



### **Спектры излучения :**

1 – сплошной, 2 – натрия, 3 – водорода, 4 – гелия

### **Спектры поглощения :**

5 – солнечный, 6 – натрия, 7 – водорода, 8 – гелия



## Фотографии к разделу «Строение Вселенной»

Луна с морями и кратерами



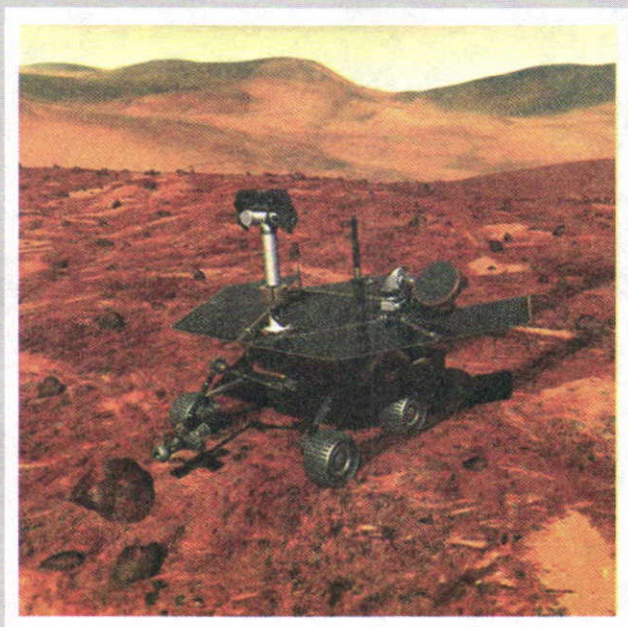
Астероид Гаспра

IV



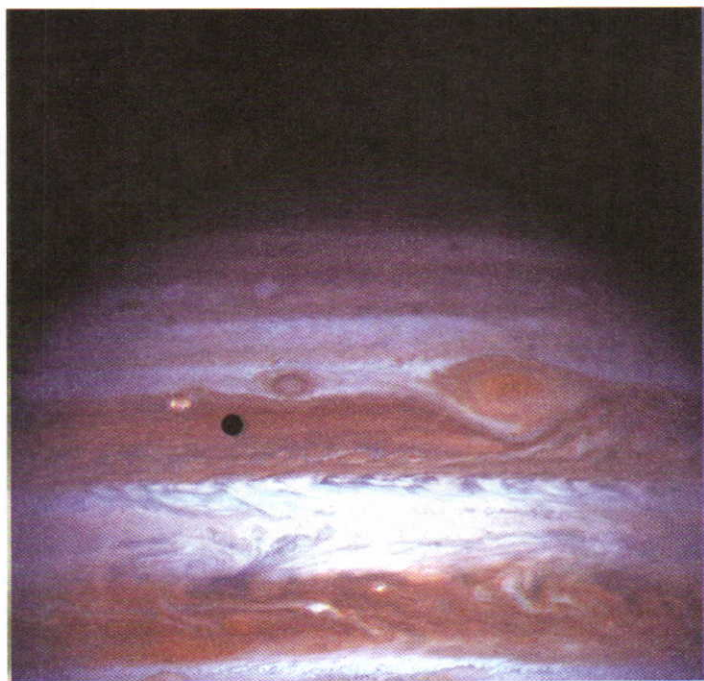
Марс





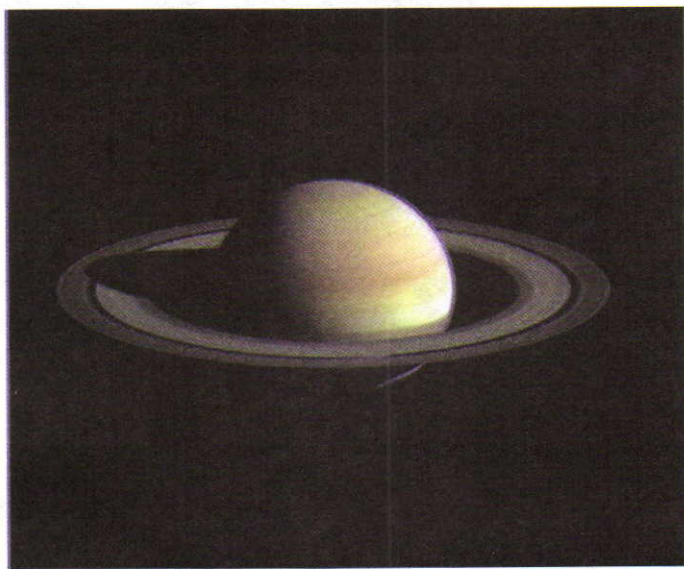
С помощью таких самоходных аппаратов ( марсоходов, США) проводились исследования на поверхности Марса

VI

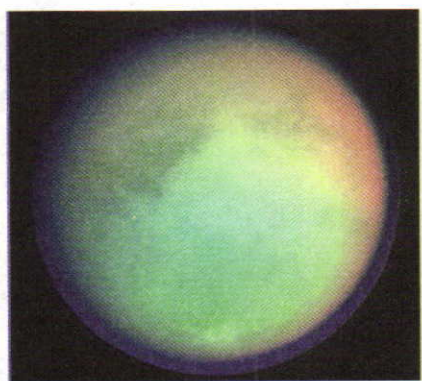


Большое Красное Пятно на Юпитере





Сатурн с системой колец



Титан – спутник Сатурна



Туманность Андромеды  
(спиральная галактика в созвездии  
Андромеды)



Крабовидная туманность  
в созвездии Тельца



| Тип взаимодействия | Переносчики | Обозначение         | Масса              |
|--------------------|-------------|---------------------|--------------------|
| Сильное            | Глюоны      | $g^o$               | 0                  |
| Электромагнитное   | Фотоны      | $\gamma$            | 0                  |
| Гравитационное     | Гравитоны   | $G^o$               | 0                  |
| Слабое             | Вионы       | $W^+, W^-$<br>$Z^o$ | 159 000<br>182 000 |

2. **Лептоны.** О некоторых из этих частиц, получивших свое название от греческого слова «лептос» (легкий), уже говорилось в предыдущей главе. Помимо электрона  $e^-$  и мюона  $\mu^-$ , к лептонам относятся таон  $\tau^-$  и три типа нейтрино — электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  и таонное нейтрино  $\nu_\tau$ .

3. **Кварки.** Так называют частицы, из которых состоят все адроны. Именно их склеивают одну с другой глюоны.

Кварковая модель адронов была предложена в 1964 г. американским физиком М. Гелл-Манном<sup>1</sup>. Название «кварк» было взято им из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану. Жизнь человека ночью» (в этом романе один из персонажей возмнил себя королем Марком, у которого украли жену; во время преследования похитителя на корабле Марк слышит крики кружащих над ним чаек: «Три кварка для мистера Марка! Три кварка, три кварка, три кварка...»).

В настоящее время известны шесть типов (или «ароматов») кварков, обозначаемых латинскими буквами  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $b$  и  $t$ . Их особенностью, не встречающейся у других частиц, является дробный электрический заряд, кратный  $1/3$  элементарного. Так, например, заряд  $u$ -кварка равен  $+2/3$ , а заряд  $d$ -кварка равен  $-1/3$ .

Попытки обнаружить кварки в свободном состоянии к успеху не привели. Современная теория объясняет этот факт тем, что с увеличением расстояния между кварками притяжение их друг к другу не ослабевает, а, наоборот, возрастает, так что для разделения адрона на отдельные изолированные кварки потребовалась бы бесконечно большая энергия.

Таким образом, кварки внутри адронов находятся как бы в пожизненном заключении. Это их свойство в физике называют английским термином «конфайнмент».

<sup>1</sup> Независимо от Гелл-Манна гипотеза о существовании частиц, образующих адроны, была высказана Г. Цвейгом; однако предложенное им название «тузы» не прижилось.



Мюррей  
Гелл-Манн

## Адроны

Особенностью всех адронов является их сложный состав и способность к сильному взаимодействию, чем, собственно говоря, и обусловлено их название (греческое слово «адрос» означает «большой», «сильный»). Никакие другие частицы (кроме кварков, которые и образуют адроны) в сильном взаимодействии участвовать не могут.

Класс адронов самый многочисленный (более 300 частиц, если считать и античастицы). В зависимости от кваркового состава все они делятся на две группы — барионы и мезоны<sup>1</sup>.

**Барионы** — это адроны, состоящие из трех кварков. К ним относятся нуклоны (т. е. протон  $p$  и нейтрон  $n$ ), а также большая группа более тяжелых частиц, называемых гиперонами. Например, три кварка  $uud$  образуют протон, а три кварка  $udd$  — нейтрон.

**Мезоны** — это адроны, состоящие из двух кварков, один из которых обязательно является антикварком. К мезонам относятся уже знакомые нам пионы  $\pi^+$ ,  $\pi^0$  и  $\pi^-$ , а также каоны ( $K$ -мезоны) и некоторые другие частицы. Например, кварковый состав  $\pi^-$ -мезона может быть выражен формулой  $\pi^- = \bar{u}d$ , где тильда над буквой  $u$  означает, что это не просто  $u$ -кварк, а анти- $u$ -кварк.

Все адроны (и мезоны, и барионы) можно разделить на несколько групп, называемых изомультиплетами. Каждый изомультиплет представляет собой совокупность частиц приблизительно равной массы, обладающих одинаковыми свойствами по отношению к сильному взаимодействию. Так, например, протон и нейтрон образуют изомультиплет нуклонов, три пи-мезона — изомультиплет пионов и т. п. (табл. 5).

Таблица 5

| Изомультиплеты |          |       |         |             |            |         |            |
|----------------|----------|-------|---------|-------------|------------|---------|------------|
| Мезоны         |          |       | Барионы |             |            |         |            |
| $\pi^+$        |          | $K^+$ | $p$     |             | $\Sigma^+$ | $\Xi^0$ |            |
| $\pi^0$        | $\eta^0$ |       |         | $\Lambda^0$ | $\Sigma^0$ |         | $\Omega^-$ |
| $\pi^-$        |          | $K^0$ | $n$     |             | $\Sigma^-$ | $\Xi^-$ |            |

Не исключено, что в будущем будет открыта сложная структура и у тех частиц, которые сегодня считаются истинно элементарными. Пока же все попытки построения составных моделей лептонов и кварков, в которых они конструируются из небольшого числа гипотетических преонов, ришенов, гликов и других воображаемых частиц, носят преимущественно умозрительный характер.

<sup>1</sup> Большую часть этих частиц составляют так называемые резонансы. Среднее время их жизни ничтожно мало (порядка  $10^{-23}$  с), и мы их рассматривать не будем.



1. Какие частицы называют элементарными? 2. Перечислите частицы, которые в настоящее время считаются истинно элементарными. 3. Какие частицы состоят из кварков? 4. Чем отличаются мезоны от барионов? 5. Какие частицы являются переносчиками фундаментальных взаимодействий? 6. Как переводится английское выражение, от которого образовано название «вион»? 7. Из каких кварков состоят  $\pi^-$ - и  $\pi^+$ -мезоны? 8. Что происходит с одним из  $d$ -кварков нейтрона при бета-распаде?

## § 60. АНТИЧАСТИЦЫ

Половину всех элементарных частиц составляют *античастицы*. От соответствующих им частиц они различаются знаками электрического, барионного и лептонного зарядов, а также некоторыми другими характеристиками. Масса и среднее время жизни у частицы и ее античастицы строго одинаковы.

Если у какой-то частицы все заряды равны нулю, то ее называют *истинно нейтральной*. Истинно нейтральные частицы совпадают со своими античастицами. Таковы, например, фотон и пиноль-мезон.

Античастицу обычно обозначают тем же символом, что и соответствующую частицу, но с тильдой наверху. Например, антинейтрон обозначается  $\bar{n}$ , антипротон —  $\bar{p}$ , антинейтрино —  $\bar{\nu}$ . Некоторые античастицы обозначаются без использования тильды: например, антиэлектрон обозначается как  $e^+$ , антимюон —  $\mu^+$ , антипион —  $\pi^-$ , антикаон —  $K^-$ .

Первая античастица была открыта 2 августа 1932 г. американским физиком Карлом Андерсоном. Фотографируя следы, оставляемые космическими лучами в камере Вильсона, он обнаружил трек, принадлежащий частице с массой электрона, но с зарядом  $+e$  (а не  $-e$ , как у электрона).

Вообще говоря, аналогичные треки наблюдали и до Андерсона, но никому и в голову не приходило, что их оставляет какая-то новая частица. Получая трек типа того, что изображен на рисунке 114, все приписывали его электрону, движущемуся в магнитном поле из точки  $I$  в точку  $I'$ . С помощью правила левой руки нетрудно убедиться в том, что электрический заряд при этом действительно оказывается отрицательным, как это и должно быть у нормального электрона.

Андерсон же сделал то, до чего никто другой не додумался: он поставил на пути частицы свинцовую пластинку. В результате этого он получил снимок, изображенный на рисунке 115. Направление, в котором уменьшался (из-за торможения частицы) радиус кривизны трека, свидетельствовало о том, что данная частица двигалась на самом деле не из точки  $I$  в точку  $I'$ , а из точки  $I'$  в точку  $I$ . Но это тут же меняло знак заряда частицы на противоположный: обнаруженный трек принадлежал не отрицательно, а положительно заряженному электрону!

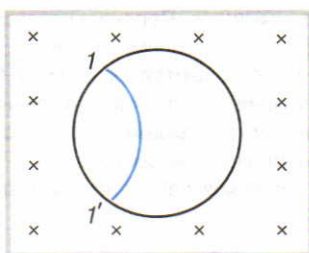


Рис. 114

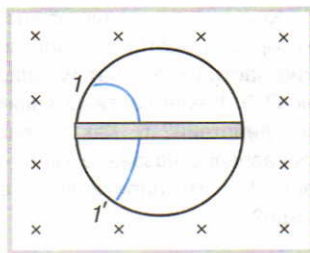


Рис. 115

Назвав новую частицу позитроном (от лат. *positivus* — положительный), Андерсон тут же предложил переименовать электрон в негатрон (от лат. *negativus* — отрицательный). Последнего предложения, однако, никто не поддержал. Более того, было предложено оставить название «электрон», а позитрон переименовать в орестон, что, по мысли автора этой идеи, вызывало в памяти имена героев древнегреческих мифов — брата Ореста и его сестры Электры. Но история рассудила по-своему, и в науке остались названия «электрон» и «позитрон».

Андерсон сообщил о своем открытии не сразу, его статья появилась лишь в 1933 г. В этом же году выяснилось, что открытая Андерсоном частица является не чем иным, как антиэлектроном, теоретически предсказанным за два года до этого двадцатидевятилетним английским физиком П. Дираком.

Поль Дирак предсказал существование античастиц тогда, когда никаких экспериментальных оснований для подобного вывода не существовало. Теория Дирака о положительных электронах и отрицательных протонах казалась в то время настолько фантастической, что никто в нее не верил. А Андерсон в США вообще о ней не слышал!

Желая подчеркнуть «безумный» характер взглядов Дирака, Нильс Бор даже придумал Новый Способ, Как Поймать Слона Живым. Для этого, согласно Бору, около тропы, по которой животные ходят на водопой, надо поставить большой плакат с изложением теории Дирака. Когда слон прочтет этот плакат, он непременно будет ошеломлен и, по крайней мере, несколько минут будет стоять, ничего не замечая вокруг. Вот в это время и должны выскочить охотники и опутать ноги слона толстыми веревками...

В 1932 г., ничего не зная об открытии Андерсона, Дирак приехал в Харьков, чтобы рассказать о своей теории на конференции в физико-техническом институ-



Поль Дирак



те у Ландау. Ландау очень высоко ценил английского физика и с любопытством слушал его. Но идеи, которые излагал на этот раз Дирак, и ему казались неправдоподобными.

Эксперименты Андерсона, а затем и других физиков подтвердили гипотезу Дирака о существовании античастиц. Отмечая заслуги английского ученого, Ландау однажды сказал: «Кто спорит, что Дирак за несколько лет сделал для науки больше, чем все присутствующие в этой комнате за всю свою жизнь?»

В своей классификации физиков-теоретиков Ландау поместил Дирака среди ученых первого класса (вместе с Бором, Шрёдингером, Гейзенбергом и Ферми). Высший — половинный — класс в этой классификации занимал Эйнштейн. Себя Ландау относил ко второму классу.

В первоначальной теории Дирака позитрон рассматривался как дырка в вакууме. Впоследствии эта интерпретация перестала использоваться. В 1940-х гг. сначала Г. А. Зисманом, а затем Штюкельбергом и несколько позже Фейнманом была предложена другая трактовка, согласно которой позитрон интерпретировался как электрон, движущийся назад во времени. Чтобы понять, о чем идет речь, рассмотрим, например, уравнение движения позитрона в магнитном поле:

$$m\vec{a} = (+e) \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \times \vec{B}.$$

Легко заметить, что это же уравнение можно переписать и в таком виде:

$$m\vec{a} = (-e) \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta(-t)} \times \vec{B}.$$

Но теперь оно описывает электрон, движущийся назад во времени! Таким образом, обе эти частицы (позитрон, движущийся вперед во времени, и электрон, движущийся назад во времени) удовлетворяют одному и тому же уравнению. Это и дает основание для их формального отождествления.

Через пять лет после открытия позитрона был обнаружен антимюон, в 1947 г. — антипион, в 1955 г. — антипротон, в 1956 г. — антинейтрон и т. д. Со временем стало ясно, что античастицы есть у всех частиц. Более того, в принципе возможно и антивещество, состоящее из атомов, в ядра которых входят антипротоны и антинейтроны, а их оболочки образуют антиэлектронны (позитроны). И хотя антивещество в макроскопических масштабах еще не получено, отдельные частицы антидейтерия, антитрития и антигелия уже открыты.

В 1957 г. Ландау высказал гипотезу, согласно которой в природе действует принцип комбинированной **CP-симметрии**<sup>1</sup>. Этот принцип утверждает, что замена всех частиц на соответствующие античастицы (и наоборот) с одновременным зеркальным отражением

<sup>1</sup> Буква *C* в названии этой симметрии обозначает операцию замены частиц на античастицы, а буква *P* — зеркальное отражение.

системы (т. е. заменой правого на левое и наоборот) является *преобразованием симметрии физических законов*. На сегодняшний день известны лишь единичные случаи нарушения этого принципа: они касаются обусловленных слабым взаимодействием очень редких распадов нейтральных каонов. Все остальные явления природы свидетельствуют о том, что Ландау был прав.

Таким образом, законы природы, управляющие нашим миром, в равной степени были бы справедливы и в СР-антимире, если бы он существовал. Только жители этого мира были бы нашими зеркальными двойниками и к тому же построенными из антивещества.

- ?
1. Кем и когда были предсказаны античастицы?
  2. Кто открыл позитрон?
  3. Чем отличается антинейтрон от нейтрона?
  4. Из чего состоят антиатомы?
  5. Все частицы по закону всемирного тяготения притягиваются одна к другой. Будет ли действовать гравитационное притяжение между частицами и их античастицами? Или они будут отталкиваться одна от другой?
  6. В чем заключается принцип комбинированной СР-симметрии?

## § 61. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Одним из наиболее фундаментальных свойств элементарных частиц является их **взаимопревращаемость**: образующиеся в результате различных взаимодействий частицы не входят в состав исходных частиц, а рождаются непосредственно в процессах их соударений или распадов. В макромире ничего подобного не происходит, и если бы вдруг кто-то увидел, как в результате столкновения двух автомобилей сами автомобили исчезли, а на их месте появились два новых мотоцикла и осел в придачу, то это показалось бы чудом. Между тем в микромире подобные чудеса происходят постоянно!

Все превращения, происходящие в мире элементарных частиц, можно разделить на две большие группы: распады частиц и реакции рождения частиц.

### 1. Распады частиц

Подавляющее большинство элементарных частиц является нестабильными и, просуществовав некоторое время (обычно доли секунды), распадается на более легкие частицы:

$$a \rightarrow c_1 + \dots + c_n.$$

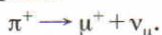
Термин «распад» не следует понимать буквально: образующиеся на месте старой новые частицы нельзя считать ее составными частями; они рождаются в момент распада (а точнее, исчезновения) исходной частицы.

Примерами распадов частиц могут служить бета-распад нейтрона (со средним временем жизни  $\tau \approx 15$  мин):

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e,$$

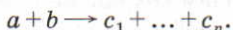


а также превращение пиона (со средним временем жизни  $\tau \approx 10^{-8}$  с) в антимюон и мюонное нейтрино:

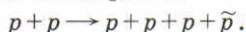


## 2. Реакции рождения частиц

В этих реакциях происходит неупругое столкновение частиц, в результате которого рождается несколько новых частиц:



Примером подобного превращения может служить реакция, в которой впервые был получен антипротон:



Порог этой реакции (т. е. минимальная кинетическая энергия налетающей частицы, при которой реакция становится энергетически возможной) достаточно высок (5,6 ГэВ). Именно поэтому осуществить ее удалось лишь после того, как в Беркли (США) был запущен протонный ускоритель с энергией 6 ГэВ (1955). До этого получать частицы с такой энергией не умели.

Очень важным типом неупругих столкновений частиц являются реакции **аннигиляции** (от лат. annihilio — уничтожение). Так называют реакции, в которых сталкивающиеся одна с другой частица и античастица превращаются в электромагнитное излучение или какие-либо другие частицы.

Например, при столкновении медленно движущихся электрона и позитрона оба они исчезают, а на их месте возникают два фотона:



При столкновении частиц, обладающих достаточно большой энергией, вместо фотонов могут появиться другие (более массивные) частицы, например мюоны:



или пионы:



Пара фотонов может появиться и при аннигиляции протона с антипротоном. Однако чаще при их аннигиляции возникают пи-мезоны. Один из возможных выходных каналов этой реакции (со всеми последующими распадами) изображен на рисунке 116 (числа, указанные на этом рисунке слева, соответ-

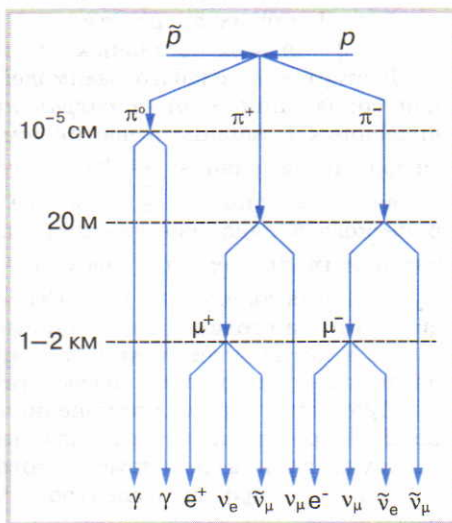


Рис. 116

ствуют тому расстоянию, которое успевает пролететь соответствующая частица до своего распада). Как видим, в результате аннигиляции протон-антипротонной пары в конечном счете рождаются десять новых частиц. Из них на долю нейтрино приходится около 50% выделившейся энергии, на долю фотонов ( $\gamma$ -квантов) — 34% и на долю электрона с позитроном — 16%.

Все реакции, происходящие с элементарными частицами, подчиняются определенным законам сохранения. В физике микромира они играют двоякую роль. С одной стороны, эти законы выступают здесь в качестве принципов запрета, определяя то, чего не может происходить с той или иной системой (запрещаются все процессы, в которых нарушается хотя бы один из законов сохранения). С другой стороны, если какой-то процесс удовлетворяет всем законам сохранения (т. е., как говорят, разрешен ими), то он обязательно будет происходить.

В настоящее время универсальными, т. е. свойственными всем типам взаимодействий, считаются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и трех видов зарядов: электрического  $Q$ , барионного  $B$  и лептонного  $L$  с его тремя компонентами — электронным числом  $L_e$ , мюонным числом  $L_\mu$  и таонным числом  $L_\tau$  ( $L = L_e + L_\mu + L_\tau$ ). Последние три числа, также называемые зарядами, определяются следующим образом:

$L_e = +1$  для электрона  $e^-$  и электронного нейтрино  $\nu_e$ ,

$L_e = -1$  для их античастиц,

$L_e = 0$  для всех остальных частиц,

$L_\mu = +1$  для мюона  $\mu^-$  и мюонного нейтрино  $\nu_\mu$ ,

$L_\mu = -1$  для их античастиц,

$L_\mu = 0$  для всех остальных частиц,

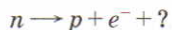
$L_\tau = +1$  для таона  $\tau^-$  и таонного нейтрино  $\nu_\tau$ ,

$L_\tau = -1$  для их античастиц,

$L_\tau = 0$  для всех остальных частиц.

В отсутствие слабого взаимодействия проявляется еще один закон сохранения — закон сохранения странности. Для всех перечисленных в таблице 5 частиц (см. § 59) странность  $S$  определяется как целое, равное:  $S = 2\bar{Q} - B$ , где  $B$  — барионный заряд рассматриваемой частицы, а  $\bar{Q}$  — среднее арифметическое значение электрического заряда изомультиплета, которому принадлежит данная частица (например, для изомультиплета пионов  $\bar{Q} = 0$ , а для изомультиплета каонов  $\bar{Q} = 1/2$ ). Странность частиц, не участвующих в сильном взаимодействии (например, лептонов), считается равной нулю. У античастиц странность равна по модулю, но противоположна по знаку странности соответствующих им «обычных» частиц.

Проиллюстрируем применение законов сохранения в микромире на примере анализа  $\beta$ -распада нейтрона. Допустим, что из трех образующихся в результате этого распада частиц нам известны только две — протон и электрон. Что мы можем сказать о третьей частице?





Обозначив через  $Q$ ,  $B$ ,  $L$  и  $L_e$  заряды неизвестной частицы, запишем уравнения, выражающие законы сохранения соответствующих величин:

$$0 = 1 - 1 + Q, \quad (61.1)$$

$$1 = 1 + 0 + B, \quad (61.2)$$

$$0 = 0 + 1 + L, \quad (61.3)$$

$$0 = 0 + 1 + L_e. \quad (61.4)$$

Решая по очереди эти уравнения, мы приходим к выводу, что интересующая нас частица электрически нейтральна ( $Q=0$ ), не является барионом ( $B=0$ ) и относится к антилептонам ( $L=-1$ ). Такой частицей может быть только антинейтрино  $\bar{\nu}$ . Но существуют три типа антинейтрино: электронное, мюонное и таонное. Решая уравнение (61.4), мы убеждаемся в том, что искомой частицей является  $\bar{\nu}_e$ , ибо только у этой частицы  $L_e = -1$ .

Использование законов сохранения в качестве принципов запрета позволяет понять отсутствие в природе многих, кажущихся на первый взгляд «естественными» процессов. Так, например, никто и никогда не наблюдал распада мюона на фотон и электрон ( $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ ). Это и понятно: ведь он запрещен сразу двумя законами сохранения  $L_e$  и  $L_\mu$ .

С помощью закона сохранения энергии можно определить и энергетический выход любой реакции. Так, например, в результате аннигиляции электрон-позитронной пары на два фотона выделяется энергия

$$Q = (m_e + m_e - m_\gamma - m_\gamma)c^2 = 2m_e c^2 \approx 1 \text{ МэВ}.$$

Эта величина представляет собой всю собственную энергию сталкивающихся частиц. Заметим, что и при делении урана, и в процессе термоядерного синтеза выделяется лишь небольшая часть (порядка десятых долей процента) энергии покоя исходных ядер. Здесь же мы имеем дело со ста процентами! Поэтому аннигиляция вещества и антивещества, взятых в макроскопических количествах, могла бы служить самым грандиозным источником энергии на Земле. Получаемая при этом энергия в 1000 раз превосходила бы ту, которая выделяется при делении и синтезе такой же массы ядерного топлива.



1. Какие два типа превращений элементарных частиц существуют в природе?
2. Что такое аннигиляция?
3. Какую роль играют законы сохранения в микромире?
4. Как определяются барионный и лептонный заряды?
5. Как определяются электронное, мюонное и таонное числа?
6. Чему равны значения всех зарядов (шесть величин) для мюонного нейтрино  $\nu_\mu$ , антитаона  $\tau^+$ , протона  $p$ , антинейтрона  $\bar{n}$  или пи-ноль-мезона  $\pi^0$ ?
7. Что такое странность?
8. При каком условии выполняется закон сохранения странности?
9. Чему равна энергия, выделяющаяся при аннигиляции электрон-позитронной пары?

Астрономия по величине своего объекта и по совершенству своих теорий является самым прекрасным памятником человеческого духа и проявлением самого высокого интеллекта.

*Пьер Лаплас (1749—1827),*  
французский астроном, математик,  
физик

## § 62. ЧТО ТАКОЕ АСТРОНОМИЯ

Законы физики универсальны. Они действуют на Земле, в Солнечной системе и далеко за пределами нашей Галактики. **Астрономия** (от греч. «астрон» — звезда и «номос» — закон) — наука, изучающая Вселенную. Она неразрывно связана с физикой. Эти науки взаимно обогащают друг друга. **Астрофизика**, изучающая природу небесных тел и их систем, стала бурно развивающимся разделом астрономии.

Астрономия — одна из первых наук, которую начали изучать люди. Их внимание издавна привлекали красота и таинственность звездного неба, появляющиеся на нем кометы, падающие звезды, а также казавшиеся загадочными солнечные и лунные затмения. Наблюдения за движением светил в течение суток (их ежедневный восход, путь над горизонтом и заход) и таких строго повторяющихся явлений, как смена лунных фаз, с давних пор помогали ориентироваться на местности и определять время.

Слово «Вселенная» знакомо каждому, но не так прост вкладываемый в него смысл, который неоднократно изменялся. Нам, как и нашим далеким предкам, *кажется*, что все светила движутся вокруг нас. Сегодня нам известно, что на самом деле это не так, а раньше видимые движения светил отождествляли с действительными и думали, что Земля — центр Вселенной. **Геоцентрическая система мира** существовала и математически обосновывалась на протяжении почти полутора тысяч лет. В 1543 г. ей на смену пришла **гелиоцентрическая система** Николая Коперника (1473—1543). Она имела огромное значение, так как именно с открытия Коперника началась *первая революция в астрономии*.

*Вторая революция в астрономии*, начавшаяся в конце XVIII в. с открытия Галактики, завершилась в XX в. обнаружением множества других галактик и грандиозной картины их разбегания. Оказалось, что мы живем в расширяющейся Вселенной, рождение которой связано с Большим взрывом.

В наши дни начинается *третья революция в астрономии*, поскольку на рубеже XX и XXI вв. выяснилось, что масса наблюдаемой нами Вселенной составляет всего несколько процентов от ее об-



щей массы. Получается, что основная масса приходится на невидимую материю, природа большей части которой *неизвестна* современной физике.

На протяжении тысячелетий астрономы проводили наблюдения невооруженным глазом, а угломерные инструменты, которые они применяли, были неоптическими. *Телескопическая астрономия* началась в 1609 г., когда Галилей впервые направил на небо изготовленную им самим зрительную трубу. Это был первый телескоп, оптические возможности которого сравнимы с современным маленьким биноклем. Постепенно линзовые телескопы (*телескопы-рефракторы*) совершенствовались. Диаметр объектива наибольшего из них 1 м. Одновременно создавались и совершенствовались *телескопы-рефлекторы*, в которых лучи света собирает вогнутое зеркало. В первой половине XX в. диаметр зеркала крупнейшего телескопа-рефлектора достиг 5 м. Во второй половине XX в. в нашей стране уже был построен крупнейший в мире телескоп-рефлектор с зеркалом диаметром 6 м. В настоящее время ряд американских и европейских обсерваторий оснащен телескопами-рефлекторами с зеркалами диаметром от 8 до 11 м.

Современные гигантские телескопы снабжены сверхчувствительными приемниками излучения. Фотопластинку сегодня сменяют ПЗС-матрицы — приборы с зарядовой связью, позволяющие улавливать даже отдельные фотоны. Астрономия стала **всеволновой**, потому что наземные и космические телескопы дают возможность проводить наблюдения не только в видимом диапазоне шкалы электромагнитных волн, но и во всех других диапазонах — от  $\gamma$ -излучения до длинноволнового радиоизлучения. Телескопам, работающим на космических обсерваториях, не мешает земная атмосфера, поглощающая значительную часть идущего из космоса излучения. Благодаря космонавтике стали реальностью, кроме внеатмосферных наблюдений, эксперименты на поверхности Луны, планет, их спутников, комет и астероидов. Это имеет принципиальное значение, потому что в отличие от физики астрономия изначально была *наблюдательной наукой*.

Инструменты и методы современной астрономии позволяют приблизиться к пониманию устройства и эволюции Вселенной, узнать, какова наша Вселенная сейчас, какой она была миллиарды лет назад и какой будет через десятки миллиардов лет. Привычный нам *макромир*, в котором мы живем, оказался между *микромиром* — миром элементарных частиц и *мегамиром* — огромной по пространственно-временным масштабам и далеко еще не познанной Вселенной.



1. Чем отличается астрономия от физики по объектам и методам исследования?
2. Почему астрономия, казалось бы оторванная от жизненных интересов людей, стала одной из первых наук, которую начали изучать люди?
3. Почему и благодаря чему современная астрономия стала всеволновой?
4. Как вы думаете, почему Вселенную нередко называют «лабораторией современной физики»?

## § 63. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**Общие представления.** Вокруг Солнца движутся девять планет — Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон. Издавна знали только о пяти из них (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн), которые можно увидеть невооруженным глазом. Статус планеты наша Земля обрела лишь в XVI в. — в гелиоцентрической системе мира Н. Коперника. Уран открыл в 1781 г. английский астроном-любитель, создавший телескоп, Уильям Гершель (1738—1822). Нептун открыли в 1846 г. на кончике пера, т. е. предвычислили его положение на небе, что подтвердилось непосредственными наблюдениями в телескоп. Плутон удалось обнаружить в 1930 г. при тщательном изучении многочисленных фотографий звездного неба.

До сих пор ведутся поиски десятой планеты. В начале XXI в. далеко за пределами орбиты Плутона открыто несколько небесных тел, сравнимых по размеру с Плутоном. Не станут ли хотя бы одно из них считаться десятой планетой?

Расстояния планет от Солнца можно приближенно представить следующим эмпирическим соотношением:

$$r = 0,3 \cdot 2^n + 0,4,$$

где  $r$  — среднее расстояние планеты от Солнца в астрономических единицах (1 а. е. = 149 600 км — среднее расстояние Земли от Солнца). Вычисляя  $r$  по этой формуле, принимают среднее расстояние Меркурия от Солнца равным 0,4 а. е. ( $n = -\infty$ ); для Венеры  $n = 0$ , Земли  $n = 1$ , Марса  $n = 2$ , Юпитера  $n = 4$  и т. д.

В XVIII в. астрономы пытались найти планету ( $n = 3$ ), которая могла бы разместиться между Марсом и Юпитером. Планеты там не оказалось, но зато постепенно обнаружили множество малых планет (*астероидов*). Место «недостающей» планеты занимает *Главный пояс астероидов*. Еще один пояс астероидов (*пояс Койпера*) открыли в конце XX в. Он находится в области орбит Нептуна и Плутона.

*Кометы* тоже небесные тела Солнечной системы. Предполагают, что далеко за орбитой Плутона и поясом Койпера находится «облако комет», расположенное вблизи границ Солнечной системы.

О масштабах Солнечной системы дают представление расстояния от Солнца до Земли (1 а. е.), Плутона (40 а. е.) и «облака комет» (примерно 200 000 а. е.). В настоящее время ни одна из автоматических межпланетных станций (АМС), стартовавших с Земли более 30 лет назад, еще не долетела до границ Солнечной системы, хотя некоторые из них давно пересекли орбиту Плутона и оказались за пределами *планетной системы*.

### Закономерности в Солнечной системе

1. Солнечная система компланарна: планеты, астероиды и многие кометы движутся вокруг Солнца примерно в одной плоскости. Наклонение плоскостей орбит планет к плоскости орбиты Земли не



превышает нескольких градусов (лишь у Плутона  $17^\circ$ , а у многих комет значительно больше).

2. Все планеты движутся вокруг Солнца в одном направлении; в том же направлении и Солнце вращается вокруг своей оси, и большинство спутников обращается вокруг своих планет.

3. У большинства планет (за исключением Венеры и Урана) направление *вращения* вокруг оси совпадает с направлением *обращения* вокруг Солнца.

4. Почти 99% массы вещества Солнечной системы приходится на долю Солнца.

5. Солнце обладает лишь 2% момента количества движения Солнечной системы, а планеты — 98%.

6. По своим физическим характеристикам планеты разделяются на две группы: *планеты-гиганты* и *планеты земной группы*.

Основные закономерности в строении Солнечной системы объясняет **космогония** — раздел астрономии, в котором изучается происхождение и эволюция небесных тел. Современная планетная космогония исходит из предположения о том, что планеты сформировались в результате объединения твердых холодных частиц, входивших в состав окружавшей Солнце туманности. Формирование планет происходило под воздействием различных физических процессов, например механических, термодинамических и электродинамических. Земля как планета сформировалась за 100 млн лет (возраст Земли 4,5 млрд лет). Разогрев изначально холодной Земли был связан с частым падением гигантских метеоритов, гравитационным сжатием и распадом радиоактивных элементов. Недавно открыты *допланетные* диски у десятков звезд, что очень важно для развития планетной космогонии.

**Законы небесной механики.** Раздел астрономии, изучающий движение небесных тел под действием сил тяготения, называется **небесной механикой**. Этот один из самых математизированных разделов современной астрономии позволяет на основе результатов наблюдений предвычислять различные явления, например затмения Солнца и Луны, а также оценивать устойчивость Солнечной системы. **Астродинамика** — часть современной небесной механики — занимается расчетами траекторий космических аппаратов. Основу небесной механики составляют три закона И. Кеплера (1571—1630) и закон всемирного тяготения И. Ньютона (1643—1727).

**Законы Кеплера.** *Первый закон:* орбита каждой планеты — эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

На рисунке 117 показаны фокусы  $F_1$  и  $F_2$  эллипса, большая полуось  $a$ , радиус-вектор  $F_1M$  ( $F_1$  — фокус, в котором находится Солнце;  $M$  — одно из положений планеты на орбите),  $O$  — центр эллипса,  $c$  — расстояние от центра эллипса до фокуса.

Величина  $e = \frac{c}{a}$  называется эксцентриситетом эллипса и характеризует степень его вытянутости (при  $c = 0$  эллипс становится окружностью). Эксцентриситет орбиты Земли  $e = 0,0167$ .

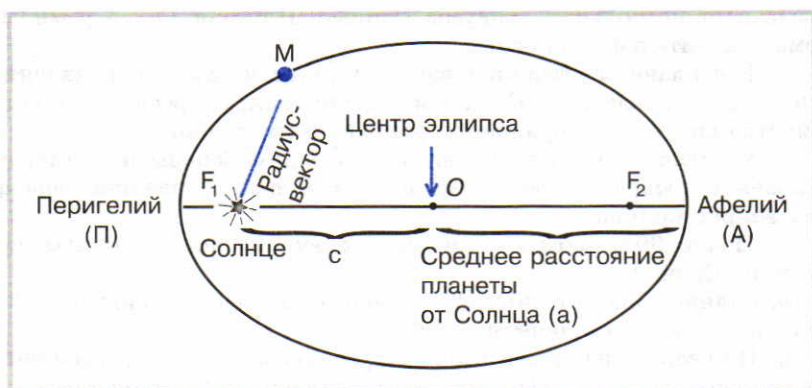


Рис. 117

Двигаясь по эллиптической орбите, планета то приближается к Солнцу (находится в **перигелии**, П), то удаляется от него (находится в **афелии**, А). Легко убедиться в том, что расстояние планеты от Солнца в перигелии  $q_1 = a(1 - e)$ , а в афелии  $q_2 = a(1 + e)$ , где  $a$  — среднее расстояние планеты от Солнца;  $e$  — эксцентриситет орбиты. Вокруг Солнца по эллипсам движутся не только планеты, но и их естественные и искусственные спутники.

Согласно *второму закону Кеплера* радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равные площади. Из этого закона следует, что планеты движутся вокруг Солнца неравномерно — быстрее вблизи перигелия, медленнее вблизи афелия.

Согласно *третьему закону Кеплера* квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца ( $T_1$  и  $T_2$ ) относятся как кубы их больших полуосей ( $a_1$  и  $a_2$ ), т. е.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где периоды  $T_1$  и  $T_2$  измеряются в годах, а полуоси  $a_1$  и  $a_2$  — в астрономических единицах (а. е.).

**Обобщение законов Кеплера.** И. Кеплер пришел к открытию своих законов, анализируя результаты многолетних астрономических наблюдений: *эмпирическим путем*. И. Ньютон открыл эти законы *аналитически*, т. е. он вывел их из уже известного вам закона всемирного тяготения:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $F$  — сила, с которой притягиваются друг к другу материальные точки;  $m_1$  и  $m_2$  — их массы;  $r$  — расстояние между ними;  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$  — постоянная тяготения.



Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения — пример плодотворной связи физики с астрономией. Ведь он прежде всего доказал, что сила, удерживающая Луну на околоземной орбите, представляет собой привычную нам силу тяжести, но действующую слабее, чем на поверхности Земли, в  $60^2$  раз (расстояние между центрами Земли и Луны составляет примерно 60 земных радиусов).

Выведем третий закон Кеплера, для упрощения предположив, что планеты обращаются вокруг Солнца по окружности, а не по эллипсу. Пусть радиус орбиты первой планеты  $a_1$ , масса планеты  $M_1$ , масса Солнца  $M_C$ . Тогда сила, удерживающая планету на орбите,

$$F_1 = G \frac{M_C M_1}{a_1^2}.$$

Если период обращения планеты вокруг Солнца  $T_1$ , то действующую на нее центростремительную силу можно записать в виде  $F_2 = M_1 \frac{4\pi^2}{T_1^2} a_1$ . Очевидно, что  $F_1 = F_2$ , откуда  $\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{GM_C}{4\pi^2} = \text{const.}$

Следовательно, для второй планеты, тоже движущейся вокруг Солнца по круговой орбите, можем написать аналогичную формулу:

$$\frac{a_2^3}{T_2^2} = \frac{GM_C}{4\pi^2},$$

где  $a_2$  — радиус второй планеты,  $T_2$  — ее период обращения.

Из двух последних формул получаем

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

т. е. третий закон Кеплера.

Ньютон не только вывел из закона всемирного тяготения все законы Кеплера, но и получил их в более общем виде. Например, он доказал, что под действием тяготения одно небесное тело может двигаться по отношению к другому по любому коническому сечению (*окружности, эллипсу, параболе, гиперболе*). При этом, разумеется, движение какой-нибудь кометы по разомкнутой кривой (параболе, гиперболе) не будет периодическим: такая комета, обогнув Солнце, может навсегда удалиться от него.

Большое значение для определения масс небесных тел (причем не только Солнечной системы!) имеет уточнение Ньютоном третьего закона Кеплера. Ньютон доказал, что квадраты периодов обращения планет ( $T_1^2$  и  $T_2^2$ ), умноженные на сумму масс Солнца и планет ( $M_C + M_1$  и  $M_C + M_2$ ), относятся как кубы больших полуосей орбит планет:

$$\frac{T_1^2(M_C + M_1)}{T_2^2(M_C + M_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

причем  $M_C \gg M_1$  и  $M_C \gg M_2$ . Аналогичную формулу можно записать и для других пар небесных тел, например: Солнце — планета и планета со спутником.

1. Какие небесные тела входят в состав Солнечной системы? 2. Какие основные закономерности открыты в Солнечной системе? 3. Какова главная идея современной гипотезы о происхождении планет? 4. В чем смысл трех законов Кеплера? 5. В чем состоят уточнения Ньютоном первого и третьего законов Кеплера?

## § 64. СОЛНЦЕ

Солнце — динамический и энергетический центр Солнечной системы. Масса Солнца почти на три порядка больше суммарной массы всех небесных тел, движущихся вокруг него и получающих от него свет и тепло. Солнце — источник многих видов энергии, которые использует человечество.

**Солнце как небесное тело.** Физическая природа Солнца долгое время оставалась непонятной. Например, древнегреческие мыслители думали, что Солнце — это раскаленная каменная глыба размером со ступню. Во времена Ньютона уже было известно, что радиус Солнца примерно в 100 раз больше земного. Но и тогда допускали, что солнечный свет излучают облака, окутывающие светило, а под ними есть твердая поверхность, где, возможно, живут разумные существа (!).

Сейчас всем известно, что Солнце — раскаленный газовый (точнее, плазменный) шар, единственное *самосветящееся* небесное тело в Солнечной системе. Зная массу Солнца ( $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$  кг) и его радиус ( $\approx 7 \cdot 10^5$  км), можно вычислить среднюю плотность Солнца ( $1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

Температура на поверхности Солнца около 6000 К. С глубиной она, как и плотность, повышается и вблизи центра составляет  $15 \cdot 10^6$  К.

В основном Солнце состоит из водорода (70% массы Солнца) и гелия (28% массы Солнца). Гелий, сегодня широко применяющийся в технике, физике низких температур и сыгравший важную роль в понимании строения атома, был открыт на Солнце раньше, чем на Земле. Остальные 2% массы приходятся на многие другие элементы таблицы Д. И. Менделеева. Информацию о природе верхних слоев Солнца получают из анализа его спектра, а модели внутреннего строения теоретики создают на основе законов физики и данных о Солнце как небесном теле.

Солнечный шар вращается вокруг оси, но так как Солнце не твердое тело, оно вращается по слоям. Наибольшая скорость у слоев вблизи экватора Солнца, они совершают один оборот за 25 суток. Период обращения околополярных зон примерно на 7 суток больше, чем экваториальных.

К числу важнейших физических характеристик Солнца относятся его масса и светимость. Светимость — это общая мощность его излучения ( $3,8 \cdot 10^{26}$  Вт). Земля получает лишь миллиардную долю излучаемой Солнцем энергии.

**Видимая «поверхность» Солнца — фотосфера.** Из-за чрезмерной



яркости Солнца наблюдать его надо с предосторожностями. Смотреть на Солнце можно через очень темное стекло (дымчатое или темно-зеленое) или через кусочек засвеченной и проявленной фотопленки. В телескоп Солнце безопаснее всего наблюдать на экране, установленном за окуляром телескопа. При этом удобно и зарисовывать **солнечные пятна**. Они представляют собой облака газа, более холодные, чем окружающая фотосфера: температура фотосферы около 6000 К, а пятен примерно 4500 К. Размеры пятен соизмеримы с размером Земли. Обычно на Солнце появляются не одиночные пятна, а их **группы**.

Светлее и горячее окружающей поверхности **фотосферные факелы**, которые можно наблюдать на экране телескопа вблизи края солнечного диска. Вся «поверхность» Солнца покрыта непрерывно возникающими и исчезающими «зернами», по форме напоминающими рисовые. Это **гранулы**, размеры каждой из которых достигают нескольких сотен километров. В отличие от пятен и факелов, живущих недели или даже месяцы, гранулы существуют лишь несколько минут.

**Атмосфера Солнца.** Слово *поверхность* не случайно ранее было взято в кавычки, потому что фотосфера Солнца — это *слой* толщиной до 200 км. Можно сказать, что фотосфера — нижний слой солнечной атмосферы. Над фотосферой расположены более разреженные верхние слои солнечной атмосферы — **хромосфера** и **корона**. Они лучше всего видны во время полных солнечных затмений. Красноватая хромосфера простирается до высоты 10—12 тыс. км, а серебристо-белая солнечная корона — на несколько радиусов Солнца. Солнечная корона, расширяющаяся в космическое пространство, образует поток частиц — *солнечный ветер*, обволакивающий планеты и кометы. Над группами пятен в верхних слоях атмосферы Солнца нередко возникают **солнечные вспышки** и проникающие в корону выбросы — **протуберанцы**.

**Солнечная активность.** Совокупность явлений, наблюдаемых в фотосфере, хромосфере и короне, называется **солнечной активностью**. Наше Солнце относится к числу обычных, спокойных звезд, но масштабы солнечной активности свидетельствуют о том, что спокойствие Солнца весьма относительно. Возникающие солнечные пятна, факелы, протуберанцы и особенно солнечные вспышки непрерывно развиваются и видоизменяются. Медленнее всего развиваются солнечные пятна, а солнечные вспышки представляют собой наиболее мощные кратковременные проявления солнечной активности. Это взрывы, сопровождающиеся выбросом в межпланетное пространство электрически заряженных частиц, летящих со скоростью до 1000 км/с, и резким усилением коротковолнового излучения. Выделяющаяся при вспышках энергия достигает  $10^{25}$  Дж.

Удивительное свойство солнечной активности — ее **цикличность**. Наиболее изучен 11-летний цикл пятнообразовательной деятельности Солнца. Максимум текущего цикла был в 2000—2001 гг. Синхронно с пятнообразовательной деятельностью и в тесной связи с

ней циклически изменяются число и мощность различных проявлений солнечной активности в хромосфере и короне. 11 лет — это *средняя* продолжительность цикла солнечной активности. К числу других относятся 22-летний и 80-летний циклы.

**Внутреннее строение Солнца.** Под фотосферой расположены слои Солнца, недоступные непосредственным наблюдениям. От центра Солнца до  $0,3R_{\odot}$  находится плотное и горячее ядро, в котором в ходе термоядерных реакций вырабатывается энергия, миллиарды лет поддерживающая почти на постоянном уровне светимость Солнца. Слои от  $0,3R_{\odot}$  до  $0,7R_{\odot}$  называют **зоной лучистого равновесия**. Здесь в ходе бесчисленных процессов переизлучения энергия очень медленно «просачивается» от ядра к подфотосферным слоям. Наконец, в еще более далеких от центра слоях протяженностью  $0,3R_{\odot}$  переизлучение энергии сменяется ее конвективным переносом. Это **конвективная зона** (рис. 118).

Конвективную зону нередко сравнивают с тепловой машиной, в которой энергия теплового излучения переходит в механическую. При этом возникают мощные волны, устремляющиеся в верхние слои атмосферы Солнца и постоянно их нагревающие. В результате температура в короне достигает миллионов кельвинов. Выходы горячих конвективных потоков на поверхность Солнца образуют наблюдаемую там грануляцию.

В горячих конвективных потоках газ ионизован. Взаимодействие ионизованного газа с локальными магнитными полями приводит к важным последствиям. Сильные магнитные поля замедляют конвекцию. В результате на поверхности появляются облака сравнительно охлажденного газа — солнечные пятна. Слабые магнитные поля, наоборот, ускоряют конвекцию ионизованного газа. Из-за этого в фотосфере образуются факелы.

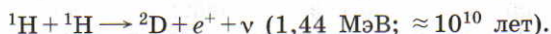


Рис. 118



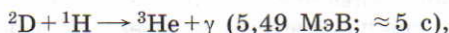
**Источники энергии Солнца.** В недрах Солнца водород превращается в гелий. Соответствующая цепочка термоядерных реакций называется **протон-протонным циклом**.

В условиях, господствующих внутри Солнца, скорость ядер атомов водорода (протонов) так велика, что они могут сближаться, преодолевая кулоновское отталкивание. При слиянии двух протонов образуется дейтерий и испускаются позитрон и нейтрино:



В скобках указаны энергия, освобождающаяся вследствие *дефекта массы*, и время, за которое число частиц уменьшается вдвое.

Далее возможна реакция



в ходе которой образуется изотоп гелия и выделяется энергия в виде  $\gamma$ -квантов. Последнее звено цепочки:



В результате из четырех ядер водорода образуется ядро гелия и выделяется очень большая энергия. С помощью *нейтринных телескопов* — детекторов, устанавливаемых глубоко под поверхностью Земли, удастся регистрировать нейтринное излучение Солнца. Еще недавно результаты нейтринных экспериментов не очень точно согласовывались с теорией протон-протонного цикла. Однако в первые годы XXI в. физики-теоретики доказали, что на пути из недр Солнца к Земле нейтрино видоизменяются, образуя различные виды этих частиц (*нейтринные осцилляции*). Считается, что это открытие устранило противоречие между теорией и экспериментом, подтвердив правильность представлений о протон-протонном цикле.

**Земные проявления солнечной активности.** Солнце постоянно излучает электромагнитные волны во всех диапазонах —  $\gamma$ -излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое, видимое (обычный свет), инфракрасное излучения, радиоизлучение.

Кроме электромагнитного излучения, Солнце, как вы уже знаете, посылает в межпланетное пространство электрически заряженные частицы, летящие с очень большими скоростями.

Все это генерирует спокойное, невозмущенное Солнце. Спокойное Солнце не доставляет нам неприятностей. Наоборот, оно радует и защищает нас. Например, в земной атмосфере формируется *озоновый слой*. Под действием ультрафиолетового излучения Солнца образуется еще один полезный для нас слой — *ионосфера*, выполняющая важную роль в радиосвязи.

Солнечные электрически заряженные частицы захватываются и удерживаются магнитным полем Земли в торообразном (похожем на бублик) **радиационном поясе**. Для людей на поверхности Земли он безопасен, а работающим на околоземной орбите космонавтам приходится от него защищаться.

Во время всплесков солнечной активности особенно резко возрастает интенсивность коротковолнового электромагнитного излучения, радиоизлучения и потоков заряженных частиц. При солнечных вспышках появляются электроны, протоны, ядра более тяжелых элементов, которые движутся со скоростями в тысячи километров в секунду. Их называют *солнечными космическими лучами*.

Коротковолновое излучение, как и обычный свет, через 8 мин 20 с приходит из активных областей Солнца к Земле. Солнечные космические лучи опаздывают примерно на двое суток. Когда их магнитное поле взаимодействует с общим магнитным полем Земли, происходят *магнитные бури*. При этом не только хаотически колеблется стрелка компаса и возникают интенсивные полярные сияния, но и обнаруживается ряд опасных воздействий на сердечно-сосудистую и нервную системы человека. Поэтому сейчас по радио и телевидению людей информируют и о прогнозе погоды, и о геомагнитной обстановке.

В настоящее время астрономы, метеорологи и врачи тщательно исследуют влияние солнечной активности на тропосферу и биосферу. Здесь пока остается много нерешенных проблем. Наряду с этим развивается *гелиотехника*, цель которой — непосредственно максимально использовать практически неисчерпаемую и экологически чистую энергию Солнца на благо человечества.

- ?
1. Что представляет собой Солнце? 2. Каково расстояние от Земли до Солнца? 3. Какова температура на поверхности и в недрах Солнца? 4. Из чего состоит Солнце? 5. Что такое солнечные пятна? 6. Каково строение атмосферы Солнца? 7. Каково внутреннее строение Солнца? 8. Почему Солнце светит и греет? 9. Что, кроме света, излучает Солнце? 10. Что такое солнечная активность? 11. Когда был максимум текущего цикла солнечной активности? 12. Каковы земные проявления солнечной активности?

## § 65. ПЛАНЕТЫ

Планеты земной группы (*Меркурий, Венера, Земля, Марс*)

**Система Земля — Луна.** Наша Земля — главная среди этих планет. Два основных движения Земли — *суточное* (вращение вокруг оси) и *годовое* (обращение вокруг Солнца). При движении Земли вокруг Солнца наклон оси нашей планеты ( $66,5^\circ$ ) к плоскости ее орбиты остается практически постоянным. Этим обусловлена смена времен года.

Во время лунных затмений тень от Земли на Луне всегда круглой формы. Поэтому древние астрономы сделали правильный вывод: Земля — шар. Геодезические измерения подтвердили справедливость предположения И. Ньютона о том, что Земля сжата у полюсов. Сжатие вычисляется по формуле  $\epsilon = \frac{a-b}{a}$ , где  $a$  — эквато-



риальный радиус Земли;  $b$  — полярный;  $\epsilon_3 \approx 1/298$ ;  $a - b = 21$  км; средний радиус Земли  $R_3 = 6371$  км. Зная массу Земли ( $6 \cdot 10^{24}$  кг) и ее средний радиус, легко найти среднюю плотность земного шара:  $\bar{\rho}_3 \approx 5,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**Луна — спутник Земли.** Это ближайшее к Земле небесное тело. Среднее расстояние от Луны до Земли 384 000 км. Луна примерно в 400 раз меньше Солнца и во столько же раз ближе к Земле, чем Солнце. Поэтому на небе Солнце и Луна кажутся нам одинаковых размеров.

Один оборот вокруг Земли Луна совершает за 27,3 земных суток (относительно звезд). Время ее одного оборота вокруг Земли относительно Солнца 29,5 суток. За это же время происходит смена лунных фаз. Основные из них — *новолуние* (Луна на небе не видна), *первая четверть* (половинка видимого лунного диска обращена выпуклостью вправо), *полнолуние* (полная Луна), *вторая, или последняя, четверть* (половинка диска Луны обращена выпуклостью влево).

Плоскость орбиты Луны наклонена под углом  $5,1^\circ$  к плоскости орбиты Земли. Из-за этого солнечные и лунные затмения происходят довольно редко, а не в каждое новолуние и полнолуние. Чаще всего в год бывает два солнечных и два лунных затмения.

Масса Луны примерно в 81 раз меньше земной, а размеры лишь в 4 раза меньше, т. е. Луна довольно большой спутник по сравнению с Землей. Нередко Землю и Луну называют *двойной планетой*.

С Земли видна всегда *одна сторона Луны*, потому что период вращения Луны вокруг оси совпадает с периодом ее обращения вокруг Земли.

На Луне нет атмосферы, воды в жидком состоянии (но лед на Луне обнаружен!), день и ночь на Луне длятся почти по две недели, а дневные и ночные температуры резко различаются (от  $+130$  до  $-170^\circ\text{C}$ ).

Основные детали лунной поверхности — моря (относительно ровные участки) и материки (горные районы). Лунные моря можно увидеть невооруженным глазом, а кольцевые горы (кратеры) хорошо видны в небольшой телескоп или даже в бинокль. Наблюдая Луну, помните, что телескоп дает перевернутое изображение, а бинокль — прямое (см. карту Луны на рисунке 119, а фотографию Луны на наклейке III).

На обратной стороне Луны, которую удалось увидеть с помощью космических аппаратов, преобладают материковые районы с множеством кратеров (в том числе самыми большими в Солнечной системе).

Со временем на Луне начнут строить базы для использования ее сырьевых ресурсов и создания астрофизических обсерваторий.

**Меркурий** ( $a = 0,4$  а. е.;  $T = 0,24$  года). Это самая близкая к Солнцу и довольно маленькая (меньше ее только Плутон) планета. Ее природа напоминает природу Луны. Здесь практически нет атмосферы и еще более резкий перепад дневных и ночных температур (от

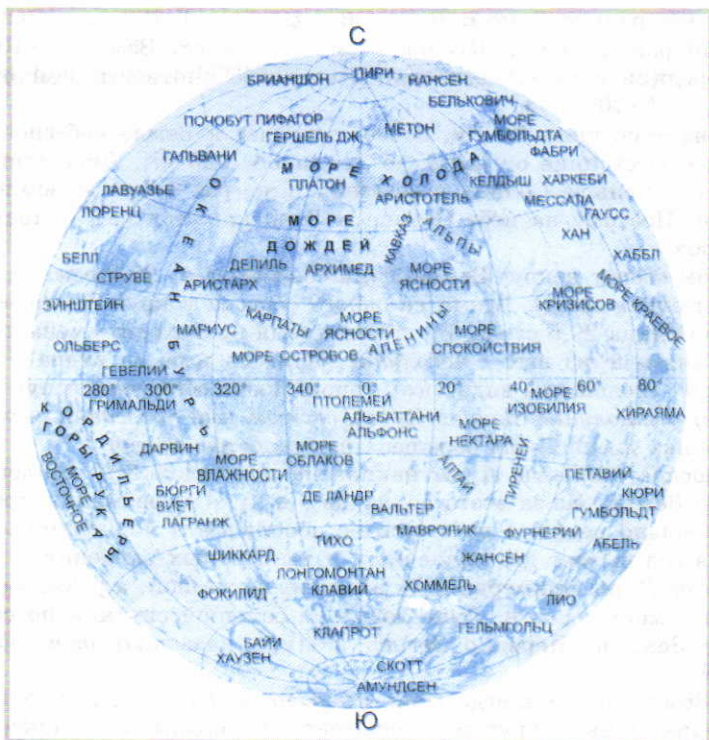


Рис. 119

+500 °С в полдень до -170 °С в полночь). На Меркурии, как и на Луне, множество кратеров. Сутки Меркурия в 2 раза больше, чем его год. Новые данные ожидают получить с борта его искусственного спутника, который должен работать около трех лет, начиная с 2011 г. У Меркурия нет ни одного естественного спутника.

**Венера** ( $a=0,72$  а. е.;  $T=0,62$  года). Эту самую яркую планету можно увидеть вечером вскоре после захода Солнца или утром перед его восходом (см. «Школьный астрономический календарь», ШАК).

Уникально вращение Венеры вокруг оси: один оборот она совершает примерно за 243 земных суток (!), причем в направлении, противоположном направлению своего движения вокруг Солнца.

По размерам и массе Венера почти такая же, как Земля, но природа этих «планет-близнецов» различна. Мощная атмосфера Венеры (она состоит на 97% из углекислого газа —  $\text{CO}_2$ ) скрывает от нас ее поверхность. Она создает давление у поверхности, в 90 раз большее, чем атмосфера Земли. Наличием такой атмосферы объясняется и очень высокая температура поверхности (не менее +470 °С). Излучение Солнца в видимом диапазоне спектра проникает сквозь атмо-



сферу Венеры, а для инфракрасного излучения перегретой поверхности атмосфера непрозрачна (*парниковый эффект*).

*Радиолокационные* наблюдения, выполненные с Земли и с искусственных спутников Венеры, позволили построить карту ее поверхности. В основном там безводные и плоские равнины, но есть много кратеров и гористые области (*континенты*). Самые высокие горы (*горы Максвелла*) достигают 11 км. Как и у Меркурия, у Венеры нет ни одного спутника.

**Марс** ( $a=1,52$  а. е.;  $T=1,88$  года) меньше Земли и Венеры. Его ось наклонена к плоскости орбиты примерно так же, как и ось Земли. Поэтому на Марсе, как и на Земле, происходит смена времен года, хотя продолжительность каждого сезона почти вдвое больше, чем на Земле. Сходны с земными и сутки на Марсе. Но атмосфера и климатические условия на Марсе значительно суровее земных. Атмосфера Марса по основному составу похожа на атмосферу Венеры ( $\text{CO}_2$  — 95%). В отличие от атмосферы Земли и Венеры газовая оболочка Марса очень разрежена, и давление у поверхности в 170 раз меньше земного.

Марс (см. вклейки IV, V) отличается от других планет своим красноватым цветом (Красная планета). Окраска марсианских пустынь объясняется повышенным содержанием в грунте оксидов железа. Даже в небольшой телескоп можно увидеть на Марсе *полярные шапки* — тонкий слой снега ( $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ ). Недавно на Марсе удалось обнаружить толстый слой льда, находящийся неглубоко под некоторыми участками поверхности планеты. В условиях низких давлений на сухом и холодном Марсе может находиться и вода, поиски которой сейчас интенсивно проводятся.

Хотя температура на Марсе не превышает  $0^\circ\text{C}$ , это холодная планета. Средняя температура там  $-59^\circ\text{C}$ , как у нас в Антарктиде (средняя температура поверхности Земли  $+16^\circ\text{C}$ ).

Прилетев на Марс, люди увидят днем под светло-розовым небом красновато-оранжевые пустыни, множество кратеров метеоритного происхождения и огромные давно потухшие вулканы. Один из них, *Олимп*, возвышается над поверхностью планеты почти на 25 км.

Отправляя на Марс лаборатории-роботы и марсоходы, ученые надеялись найти там хотя бы простейшие живые организмы. Пока это не удалось. Безжизненную планету сделают обитаемой люди, которые сумеют преобразить ее атмосферу, создать там более благоприятные климатические условия, построить сначала небольшие базы, а потом и города. У Марса есть два небольших спутника — *Фобос* и *Деймос*, которые тщательно исследуются с помощью автоматических межпланетных станций.

### Планеты-гиганты (*Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун*)

Главная из них — **Юпитер** ( $a=5,20$  а. е.;  $T=11,86$  года). Это самая большая и массивная планета Солнечной системы (средний радиус 69 900 км, масса в 318 раз больше земной). Всего за 10 ч Юпи-

тер делает один оборот вокруг оси, причем он, как и Солнце, вращается по слоям. С быстрым вращением Юпитера связано не только его сильное сжатие, но, возможно, и существование магнитного поля, которое на порядок больше земного. В небольшой телескоп заметны сжатие Юпитера, полосатая структура наблюдаемого облачного слоя и Большое Красное Пятно, открытое почти 130 лет назад и представляющее собой один из самых устойчивых циклонов в атмосфере планеты (см. вклейку VI).

Основные химические элементы, из которых состоит Юпитер, — водород и гелий. По мере продвижения вглубь газовая водородно-гелиевая атмосфера переходит в газожидкую оболочку, где свойства сжатого газа почти не отличаются от свойств жидкости. Еще глубже находится зона «вырожденного», или «металлизированного», водорода. Там электроны, оторванные от протонов, движутся свободно, как в металлах. В центре Юпитера расположено твердое ядро. У Юпитера, как и у других планет-гигантов, *нет твердой поверхности*.

Планеты-гиганты находятся далеко от Солнца, поэтому получают от него мало света и тепла. Температура их верхнего облачного слоя не превышает  $-140^{\circ}\text{C}$ . Расчеты показывают, что Солнце не может обеспечить даже такой нагрев Юпитера. Это означает, что у Юпитера есть какие-то внутренние источники тепла (температура в центре Юпитера близка к  $30\,000\text{ K}$ ). Поскольку там невозможны термоядерные реакции, то, скорее всего, из недр излучается энергия, запасенная в них при гравитационном сжатии планеты.



1. Какие планеты относятся к планетам земной группы, а какие — к гигантам? 2. Чем отличаются планеты земной группы от планет-гигантов? 3. Укажите сходство и различие в природе планет земной группы.
4. Что вы знаете о Луне? 5. Почему сохранение природы и жизни на нашей планете Земля имеет и космическое значение? 6. Возможны ли посадки космических аппаратов на планеты-гиганты?

## § 66. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**Спутники планет.** Кроме Луны, весьма интересны многочисленные спутники планет-гигантов. К 2006 г. было известно в системе Юпитера 63 спутника, Сатурна — 36, Урана — 27, Нептуна — 13.

Первые четыре спутника Юпитера открыл Галилей. Эти *галилеевы спутники* имеют названия **Ио, Европа, Ганимед, Каллисто**. У них обратное движение, и, подобно Луне, они всегда обращены к своей планете одной стороной. На Ио открыты действующие вулканы. Поверхности других галилеевых спутников покрыты льдом. Трещины в ледяной оболочке Европы образуют своеобразную сеть линий. Но самое интересное то, что под ледяной корой Европы не-



давно открыт огромный океан. Может быть, в его водах удастся обнаружить примитивные формы жизни. Диаметр Ио около 3640 км, т. е. этот спутник немного больше Луны. Ганимед, диаметр которого около 5270 км, не только больше Луны, но и больше Плутона и Меркурия. Это, вероятно, самый большой спутник в Солнечной системе.

В системе Сатурна замечателен **Титан** (см. вклейку VII). На этот довольно большой спутник (его диаметр в 1,5 раза больше диаметра Луны), обладающий плотной азотной атмосферой, была впервые в истории космонавтики осуществлена мягкая посадка космического аппарата («Гюйгенс», январь 2005 г.). У планет-гигантов есть кольца (самые роскошные у Сатурна — см. вклейку VII), состоящие из множества глыб и камней. Напомним, что у Меркурия и Венеры нет ни одного спутника, у Земли только один спутник, у Марса два спутника. Три спутника у Плутона, самый крупный из них — *Харон* и два крошечных, открытые в 2005 г. Сравните радиусы Луны (1738 км), Плутона (1140 км) и Харона (570 км).

**Астероиды.** Их еще называют *малыми планетами*. Слово «астероид» означает «звездоподобный», т. е. внешне похожий на звезду. В числе первых астероидов, открытых в начале XIX в., были **Церера** (диаметр 960 км), **Паллада** (550 км), **Веста** (530 км), **Юнона** (247 км). Эти самые крупные астероиды из *Главного пояса астероидов* могли бы разместиться в объеме, занимаемом Луной. Размеры большинства астероидов — от нескольких километров до десятков метров.

В Главном поясе сотни тысяч астероидов. Лишь у части из них определены орбиты. В последние годы открыты астероиды со спутниками (двойные астероиды).

Астероид Гаспра (см. вклейку III) стал первым, который удалось исследовать с борта пролетавшей вблизи него АМС. Первая посадка космического аппарата на астероид *Эрос* была осуществлена в феврале 2001 г. Подтвердилось, что Эрос, имеющий грушеподобную форму (40 × 14 км), вращается вокруг оси, делая один оборот примерно за 5 ч.

Малые планеты не шары, а неправильной формы глыбы с крастерами. Массы даже самых больших астероидов совершенно недостаточны, чтобы малые планеты могли удержать газовые оболочки. Сила тяжести на астероидах так мала, что космонавтам, которые в будущем туда прилетят, придется не без труда удерживаться на поверхности астероида, чтобы не сорваться и не улечь в космос. Известно, что на Луне сила тяжести лишь в 6,5 раза меньше земной, но это не помешало работе астронавтов на Луне.

Химический состав астероидов близок к химическому составу каменных и железных **метеоритов**, изученных в земных лабораториях. Это сходство не случайно, потому что большинство метеоритов (небесных камней) попадает на Землю из Главного пояса астероидов. Оттуда они вылетают при столкновении и дроблении небольших астероидов. Особый интерес представляют астероиды,

прилетевшие на Землю с Луны или даже с Марса. Такие небесные камни обнаружены, например, в Антарктиде, во льдах которой они лежали очень долго, но сохранились хорошо. Куски лунного или марсианского вещества могли быть выброшены с поверхности Луны либо Марса в результате взрыва, вызванного падением на эти небесные тела небольших астероидов или их осколков.

В прошлом на Землю неоднократно падали огромные метеориты. Согласно одной из гипотез следствием подобной катастрофы 65 млн лет назад стало вымирание многих видов земной флоры и фауны, включая динозавров.

Крошечные *метеороидные* тела постоянно влетают в атмосферу Земли со скоростью в десятки километров в секунду, порождая вспышки — *метеоры* (падающие звезды).

Столкновения Земли с крупными метеороидами относятся к числу редких явлений. В XX в. произошло два подобных события: 30 июня 1908 г. — Тунгусское явление (метеорит?), 12 февраля 1947 г. — Сихотэ-Алинский метеоритный дождь. Это заставляет астрономов выявлять и отслеживать *опасные астероиды*, а специалисты в области ракетно-космической техники разрабатывают способ предотвращения астероидной и кометной опасности.

**Кометы.** Эти хвостатые звезды издавна пугали людей, считавших кометы предвестниками войн, эпидемий и других несчастий. На самом деле ко всему этому кометы никакого отношения не имеют. В настоящее время астрономы-профессионалы и астрономы-любители открывают ежегодно несколько новых комет и обнаруживают те, которые уже наблюдались в прошлом.

В Солнечной системе очень много комет, но довольно редко на небе появляются красивые, яркие, иногда обладающие не одним, а несколькими хвостами.

В отличие от орбит планет кометные орбиты — сильно вытянутые эллипсы. Поэтому некоторые кометы могут в перигелии оказаться вблизи Солнца, а в афелии очень далеко уходить от него. Периоды обращения *короткопериодических* комет составляют лишь несколько лет. Периоды обращения *долгопериодических* комет — многие сотни и тысячи лет.

Знаменитая комета Галлея возвращается к Солнцу примерно через 76 лет. В следующий раз она засияет на нашем небе в конце июля 2061 г. Во время предыдущего появления (1986 г.) комету Галлея удалось исследовать с близкого расстояния с помощью бортовой аппаратуры трех АМС, в том числе двух запущенных в нашей стране. Самая твердая и массивная часть кометы (*ядро*) оказалась неправильной формы, напоминающей каштан (14 × 7 км). Основные части кометы — ядро, голова и хвост. Ядро кометы, частицы, входящие в состав окружающей ядро *головы* кометы и ее *хвоста*, светят отраженным и рассеянным солнечным светом. Под действием солнечного излучения возникает холодное свечение (*флуоресценция*). Под действием солнечного ветра и давления лучей сол-



нечного света хвосты комет искривляются и обычно направлены в сторону от Солнца.

Хвост у кометы появляется и развивается по мере приближения к Солнцу. Предполагают, что огромное число бесхвостых кометных ядер составляет *облако Оорта*, расположенное очень далеко за пределами орбиты Плутона.

Предстоящие полеты АМС к кометам должны углубить наши знания о кометах. Например, в ноябре 2014 г. на комету Чурюмова—Герасименко должен сделать посадку 100-килограммовый космический робот, доставленный АМС «Розетта». Важно лучше узнать природу ядер комет, их огромных голов (иногда соизмеримых с размерами Солнца) и хвостов, тянущихся на десятки и даже сотни миллионов километров. Считается, что изучение комет поможет разрешить такие фундаментальные проблемы, как происхождение нашей планетной системы и жизни на ней. Поэтому важное значение придается исследованию *частиц хвоста* одной из комет, которые в январе 2006 г. впервые в истории космонавтики были доставлены на Землю.

Кометы в отличие от планет и астероидов недолговечны. Со временем они разрушаются под воздействием солнечного излучения и притяжения больших планет. Вещество старой кометы растягивается по ее орбите. Когда Земля проходит через рой частиц разрушившейся кометы, на небе можно увидеть не отдельные метеоры, а звездные дожди. В ШАК подробно объясняется, когда и где можно их наблюдать. Например, ежегодно 12 августа — максимум *метеорного потока Персеид* (нам кажется, что падающие звезды появляются из созвездия Персея).

Летом 1994 г. астрономы всего мира наблюдали, как десятки фрагментов одной из комет врезались в Юпитер. Гигантская планета от этого не пострадала, а если бы что-нибудь подобное случилось с Землей, то последствия могли быть катастрофическими. Поэтому проблеме предупреждения и предотвращения кометной, как и астероидной, опасности сейчас уделяется все большее внимание.



1. Сравните число спутников у планет земной группы и планет-гигантов.
2. У какой из планет самая большая система спутников?
3. Какие спутники называются галилеевыми и чем они замечательны?
4. Чем интересен Титан?
5. Из чего состоят кольца планет-гигантов?
6. Какие два пояса астероидов сейчас известны?
7. Каковы размеры самых больших астероидов?
8. Как могли оказаться на Земле лунные и марсианские метеориты?
9. Что такое кометы и каково их строение?
10. Что вы знаете о комете Галлея?
11. Зачем нужно изучать астероиды и кометы?
12. В чем состоит астероидно-кометная опасность?

## § 67. ЗВЕЗДЫ

**Видимые и абсолютные звездные величины.** Звездное небо никого не оставляет равнодушным. В далекой древности уже был выделен ряд созвездий (сейчас их 88). Отыскать важнейшие из них на небе вам поможет подвижная карта звездного неба, которая приведена в «Школьном астрономическом календаре».

При очень хорошем зрении и благоприятных условиях наблюдения на небе можно увидеть одновременно не более 3000 звезд, самые яркие из них — лишь несколько десятков.

Древнегреческий астроном Гиппарх (II в. до н. э.) назвал самые яркие звезды звездами первой величины. Звезды, яркость которых немного меньше, стали называть звездами второй величины и т. д. А звезды, едва различимые невооруженным глазом, — звездами шестой величины. Эти *видимые звездные величины* обозначаются следующим образом:  $1^m$ ,  $2^m$  и т. д. ( $m$  — начальная буква латинского слова *magnitude* — величина).

Видимая звездная величина — условная характеристика звезды, она не имеет никакого отношения к размеру звезды, которая может находиться от нас на любом расстоянии. Ее физический смысл связан с освещенностью ( $E$ ), создаваемой потоком света от звезды на единичной площади, расположенной перпендикулярно лучу зрения. Часто вместо освещенности говорят просто о **блеске** звезды (мы тоже будем обозначать его буквой  $E$ ). Например, блеск звезды  $2^m$  — это освещенность, создаваемая звездой  $2^m$ .

Примерно 150 лет назад выяснили, что блеск звезды  $1^m$  в 100 раз больше блеска звезды  $6^m$ , т. е.  $\frac{E_1}{E_6} = 100$ .

Отсюда легко определяется, во сколько раз различаются по блеску звезды соседних величин (например,  $1^m$  и  $2^m$  или  $4^m$  и  $5^m$  и т. д.):

$$\sqrt[5]{100} = 2,512.$$

Формула, связывающая блеск двух звезд ( $E_1$  и  $E_2$ ) с их звездными величинами ( $m_1$  и  $m_2$ ), имеет вид

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

Звезды и другие светила ярче  $1^m$  имеют нулевую звездную величину ( $0^m$ ), отрицательную звездную величину (например,  $-3^m$ ). Самая яркая звезда нашего неба находится в созвездии Большого Пса, она называется Сириус ( $-1,6^m$ ), а видимая звездная величина Полярной звезды равна примерно  $+2^m$ . Видимая звездная величина Солнца  $-26,8^m$ , Луны в полнолуние  $-12,7^m$ , блеск Венеры в самые благоприятные периоды видимости достигает  $-4,8^m$ . Крупнейшим современным оптическим телескопам доступны чрезвычайно слабые объекты, блеск которых около  $+30^m$  (!).

В отличие от *видимой* звездной величины ( $m$ ) **абсолютная** звездная величина ( $M$ ) — важная **физическая** характеристика звезды.



$M$  — это такая величина, которую имела бы данная звезда, если бы она находилась от нас на определенном расстоянии  $r_0$ . Важна в астрономии формула, связывающая видимую и абсолютную звездные величины. Чтобы вывести ее, введем следующие обозначения: пусть у какой-нибудь звезды, расстояние до которой  $r$ , блеск  $E$  и видимая звездная величина  $m$ . Если  $M$  и  $E_0$  — абсолютная звездная величина и блеск звезды, то  $\frac{E}{E_0} = 2,512^{(M-m)}$ .

Вы знаете, что освещенность изменяется пропорционально квадрату расстояния:  $\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}$ , поэтому  $\frac{r_0^2}{r^2} = 2,512^{(M-m)}$ .

Огромные расстояния до звезд бессмысленно измерять в километрах. Поэтому используют такие единицы *расстояния*, как *световой год*: 1 св. год =  $9,46 \cdot 10^{12}$  км (это *расстояние*, которое свет проходит за один год).

Еще более крупные единицы:

1 парсек = 1 пк = 206 265 а. е. = 3,26 св. года =  $3,08 \cdot 10^{13}$  км,

$10^3$  пк = 1 килопарсек = 1 кпк,

$10^6$  пк = 1 мегапарсек = 1 Мпк.

Стандартное расстояние, которое упомянуто в определении абсолютной звездной величины,  $r_0 = 10$  пк, поэтому  $\frac{10^2}{r^2} = 2,512^{(M-m)}$ .

Отсюда, логарифмируя, найдем:

$$2 - 2 \lg r = 0,4(M - m), \text{ или}$$

$$M - m = 5 - \lg r,$$

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Тогда, зная  $M$  и  $m$ , можно найти расстояние до звезды:

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1.$$

**Пространственные скорости звезд.** Звезды находятся от нас на разных расстояниях. Ближайшая — в созвездии Южного неба (в Кентавре) — находится на расстоянии около 1,3 пк. С таких расстояний звезды кажутся неподвижными светящимися точками, хотя на самом деле движутся в пространстве со скоростями в десятки километров в секунду.

*Пространственная* скорость звезды ( $v$ ) может быть вычислена, если из угловых измерений на небесной сфере найдена ее *тангенциальная* составляющая ( $v_t$ ), а из спектральных наблюдений — *лучевая* скорость ( $v_r$ ) — с этой скоростью звезда удаляется от нас или приближается к нам):

$$v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2}.$$

Измерение лучевых скоростей основано на *эффекте Доплера*, согласно которому линии в спектре удаляющегося источника света смещаются к красному концу спектра, а в приближающемся источнике смещение происходит к фиолетовому концу спектра.

Формула для вычисления лучевой скорости имеет вид  $v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$ , где  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  ( $\lambda_0$  — длина волны неподвижного источника;  $\lambda$  — длина волны движущегося источника, для удаляющегося источника  $\lambda > \lambda_0$ ) и  $c$  — скорость света. Величина  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  называется *красным смещением*.

Линейная зависимость  $v_r = cz$  справедлива лишь для  $v \ll c$ . Но во Вселенной известно множество объектов, например далекие галактики, которые движутся со скоростями, соизмеримыми со скоростью света. Для таких объектов справедлива более сложная формула, учитывающая, что согласно СТО скорость движения объекта никогда не достигнет скорости света. Эта формула имеет вид

$$v_r = \left[ \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} \right] c.$$

**Одиночные стационарные звезды.** Кроме солнцеподобных звезд, существует много других стационарных звезд, различающихся, например, своими физическими характеристиками, химическим составом и магнитным полем.

*Цвет* звезд неодинаков. Это объясняется разной температурой их фотосфер. Красноватые звезды холоднее Солнца, являющегося желтой звездой. Температура поверхности у многих из них примерно такая же, как у солнечных пятен. Температура фотосфер белых звезд порядка  $10^4$  К. В недрах всех звезд температура заведомо выше  $10^7$  К, в противном случае там невозможны были бы термоядерные реакции.

Звезды состоят в основном из *водорода* — самого распространенного химического элемента нашей Вселенной — и гелия. Наблюдаемое различие спектров звезд связано прежде всего с различием температуры фотосфер, а не их химического состава.

Огромны светимости и размеры *звезд-гигантов* и *звезд-сверхгигантов*. Их светимости в миллионы раз больше светимости Солнца, а диаметры в тысячи и десятки тысяч раз больше диаметра Солнца. Совершенно иные, например, *белые карлики*, которые по размерам не больше Земли, но по массе сравнимы с Солнцем, а потому очень плотные.

Через миллиарды лет и Солнцу, возраст которого 5 млрд лет, предстоит пройти стадию красного гиганта, а потом превратиться в белый карлик.

**Одиночные нестационарные звезды.** В отличие от стационарных звезд их размеры и светимость постоянно изменяются. Таковы, например, *цефеиды*, получившие свое название от одной из звезд созвездия Цефея. Эти *пульсирующие* звезды-гиганты то раздуваются, то сжимаются. Их часто называют «маяками Вселенной», потому что, измерив период изменения блеска, можно определить расстояние до цефеиды.



**Сверхновые звезды.** Это взрывающиеся звезды. Светимость их при вспышках ( $10^{34}$  Вт) может в миллиарды раз превышать светимость Солнца, а выделяющаяся на протяжении нескольких недель энергия сопоставима с той, которую излучает Солнце за миллиарды лет!

Вспышка сверхновой — заключительный этап жизни звезд, масса которых значительно больше массы Солнца. При взрыве стремительно сжимаются центральные области звезды, а внешние оболочки срываются и превращаются в красивые туманности (см. вклейку VIII). Сжатие может завершиться образованием сверхплотных *нейтронных звезд* или даже *звездных черных дыр*. Теоретически возможно образование и *кварковых звезд*, которые в отличие от нейтронных состоят не из нейтронов, а из кварков. Нейтронные звезды, давно предсказанные физиками-теоретиками, были открыты в 70-х гг. прошлого века. Ими оказались *пульсары* — компактные источники радиоизлучения, имеющие чрезвычайно стабильные короткие периоды изменения радиоизлучения, а также оптического и рентгеновского излучений. Феномен такого излучения обусловлен тем, что нейтронные звезды в результате взрыва сверхновых стали очень быстро вращаться и приобрели магнитные поля, в  $10^{12}$  раз превышающие магнитное поле Солнца (магнитное поле Солнца сравнимо с магнитным полем Земли). Звездные черные дыры, которые, вероятно, уже открыты, астрономы пытаются обнаружить.

**Звездные черные дыры.** Существование этих объектов строго предсказано общей теорией относительности (ОТО). Однако еще в конце XVIII в. высказывались предположения, что в природе могут быть тела, для преодоления притяжения которых необходима скорость больше скорости света. Из формулы для второй космической (параболической) скорости, считая  $v=c$ , можно вычислить радиус такого тела:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  — масса невидимого тела, обладающего сильной гравитацией. Из ОТО получается такая же формула для  $r_g$  (*гравитационного радиуса*). С точки зрения внешнего наблюдателя, космический корабль, приближившийся к черной дыре, никогда в нее не проникнет. С точки зрения отважного пилота корабля, такое проникновение возможно, причем в иллюминаторы он увидит прошлое и будущее Солнечной системы и нашей Вселенной...

Вблизи черной дыры и тем более внутри ее перестают работать законы ньютоновской физики и даже ОТО. Здесь мы встречаемся с ситуацией, когда возникает потребность в «новой физике», над созданием которой упорно трудятся теоретики.

Чудовищная способность черных дыр втягивать и разрывать находящиеся вблизи них небесные тела проявляется только на расстояниях в несколько  $r_g$ , на расстояниях же в сотни миллиардов  $r_g$  черные дыры безопасны.

Несмотря на то что черные дыры невидимы, их удается обнаружить. Один из наиболее перспективных путей поиска звездных черных дыр связан с исследованием *физических двойных звезд*.

**Физические двойные звезды.** Почти половина звезд нашей Галактики входит в состав двойных систем, в которых обе звезды обращаются вокруг общего центра масс по эллиптическим орбитам, подчиняясь закону всемирного тяготения. Если удастся определить большую полуось орбиты звезды-спутника и его период обращения, то к данной двойной системе и к системе Солнце — Земля можно применить обобщенный Ньютоном третий закон Кеплера.

Введем обозначения:  $A$  и  $P$  — большая полуось орбиты звезды-спутника и период его обращения;  $M_1$  и  $M_2$  — массы главной звезды и спутника;  $a$  и  $T$  — большая полуось орбиты Земли и период ее обращения;  $M_C$  и  $m$  — массы Солнца и Земли. Тогда

$$\frac{(M_1 + M_2)P^2}{(M_C + m)T^2} = \frac{A^3}{a^3},$$

откуда, принимая  $M_C = 1$ ,  $T = 1$  год и  $a = 1$  а. е. и учитывая, что  $M_C \gg m$ , находим:

$$M_1 + M_2 = \frac{A^3}{P^2}.$$

По этой формуле можно вычислить сумму масс обеих звезд — компонентов двойной системы звезд, а в некоторых случаях и массу каждой звезды. Поэтому исследование двойных звезд позволяет определять массы звезд — их *важнейшую физическую характеристику*. От массы зависит не только светимость звезды, пропорциональная массе звезды в четвертой степени, но и *судьба* солнцеподобных и других звезд.

Кроме пар из обычных звезд, в ходе эволюции одна из звезд системы может превратиться в белый карлик, в нейтронную звезду или даже в черную дыру. Плазма, устремляющаяся от нормальной звезды на вращающуюся черную дыру, закручивается вокруг нее, разогревается до миллионов кельвинов, и компактный объект проявляет себя как источник *рентгеновского* излучения. Открытие подобных рентгеновских источников в двойных звездах позволяет предположить, что невидимый объект — черная дыра. Чтобы подтвердить это предположение, нужно *прежде всего* доказать, что масса невидимого небесного тела хотя бы в несколько раз больше массы Солнца.

**Планеты других звезд.** Великие мыслители прошлого, одним из ярких представителей которых был Джордано Бруно (1548—1600), высказывали гениальные догадки о существовании планет, движущихся вокруг далеких звезд. Только в конце XX в. эти гипотезы подтвердились астрономическими наблюдениями. К настоящему времени внесолнечные планеты (*экзопланеты*) открыты у многих десятков звезд. Открытие экзопланет продолжается. Пока обнару-



жены в основном внесолнечные планетные системы с планетами, похожими на Юпитер. Вероятно, очень скоро будут открыты экзопланеты, похожие на планеты земной группы. Эра исследований экзопланет только начинается.

- ?
1. Сравните физическую природу звезд и планет.
  2. Можно ли, основываясь на видимой звездной величине, что-либо сказать о физических характеристиках данной звезды?
  3. Иногда говорят, что Полярная звезда — самая яркая звезда нашего неба. Верно ли это?
  4. Что такое абсолютная звездная величина?
  5. В каких единицах измеряют расстояния до звезд?
  6. Издавна считали, что звезды неподвижны. Так ли это?
  7. Что надо знать, чтобы вычислить пространственную скорость звезды?
  8. В чем сущность эффекта Доплера?
  9. На чем основывается утверждение: «Солнце — рядовая звезда»?
  10. Сравните физические характеристики сверхгигантов, белых карликов и нейтронных звезд.
  11. Равенством каких сил, действующих внутри солнцеподобных звезд, поддерживается равновесие этих звезд?
  12. Какие звезды называются цефеидами?
  13. Какие звезды называются сверхновыми?
  14. Во что превращается взорвавшаяся звезда?
  15. Что такое звездные черные дыры?
  16. Какие звезды называются физическими двойными?
  17. Какое значение имеет исследование двойных звезд для определения масс звезд и открытия черных дыр?
  18. Что такое экзопланеты?

## § 68. НАША ГАЛАКТИКА — МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

Все звезды, видимые невооруженным глазом, и звезды, доступные наблюдениям в современные телескопы, разбросаны в пространстве не хаотично. Они входят в состав нашей Галактики. Ее часто называют *Млечным Путем*, потому что он включает подавляющую часть звезд Галактики.

Галактика содержит  $10^{11}$ — $10^{12}$  звезд (в том числе с их планетными системами), звездные системы — как двойные звезды, так и звездные скопления из тысяч звезд (*рассеянные звездные скопления*) или даже миллионов звезд (*шаровые звездные скопления*). В Галактике множество газопылевых туманностей. В одних и сейчас рождаются звезды, а другие остались после вспышек сверхновых звезд. Кроме того, в Галактике могут быть миллионы звездных черных дыр.

Пространство между звездами не пусто: в нем есть очень разреженный *межзвездный газ* (в основном это водород). Оно пронизывается потоками *космических лучей*. Электрически заряженные частицы, входящие в состав космических лучей, ускоряются в магнитных полях Галактики до субсветовых скоростей. В результате они приобретают огромные энергии, недостижимые в лучших современных ускорителях элементарных частиц.

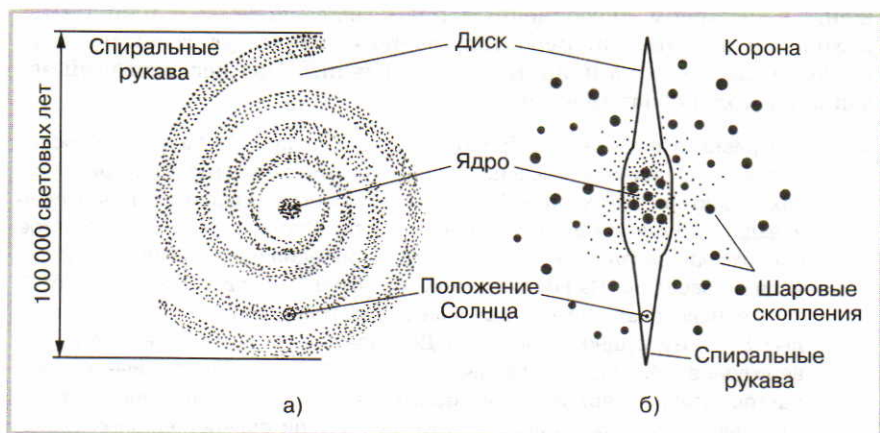


Рис. 120

Звезды и туманности в основном сосредоточены в объеме линзообразной формы (в форме диска — таков вид Галактики сбоку; рис. 120, б). Диаметр этого диска составляет около 30 кпк. Солнце расположено на расстоянии около  $2,6 \cdot 10^4$  св. лет (это 8 кпк) от центра Галактики. Если бы вы могли взглянуть на диск Галактики сверху, то обнаружили бы *спиральные ветви* (рис. 120, а), содержащие наиболее яркие и горячие звезды, а также огромные газопылевые облака. Именно там находятся очаги продолжающегося и в наши дни звездообразования. Диск — это еще не вся Галактика, потому что она занимает сферический объем, заполненный звездами, шаровыми звездными скоплениями, газом, невидимым веществом (скрытой массой, состоящей, возможно, из погасших звезд).

Галактика вращается вокруг оси. Солнце движется по своей орбите вокруг центра Галактики со скоростью около 250 км/с, совершая один оборот примерно за 200 млн лет (таков *галактический год!*).

Во многом загадочен центр Галактики, в котором находится ее ядро — одна из наиболее таинственных ее областей.

До недавнего времени считали, что ядро состоит из множества массивных звезд, источников радио- и рентгеновского излучений и других известных астрофизикам объектов. Недавно, основываясь на изучении очень быстрого обращения звезд, находящихся вблизи галактического центра, ученые сделали вывод о том, что в ядре Галактики расположена **сверхмассивная черная дыра**. Ее масса  $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ , т. е. в миллионы раз больше массы Солнца. Но это не самая большая из почти открытых сейчас сверхмассивных черных дыр в ядрах других галактик.

- ? 1. Что такое Галактика? 2. Только ли звезды входят в состав Галактики? 3. Каков диаметр Галактики в световых годах? 4. На каком расстоянии от центра Галактики находится Солнце? 5. Каково общее строение Галактики и что недавно открыто в ее ядре?



## § 69. НАША ВСЕЛЕННАЯ — МЕТАГАЛАКТИКА

**Галактики и их системы.** Млечный Путь относится к многочисленному типу *спиральных* галактик. Такова, например, и *Туманность Андромеды* — ближайшая к нам галактика, которую можно увидеть даже невооруженным глазом в осенние вечера в созвездии Андромеды (см. вклейку VIII). Расстояние до Туманности Андромеды не менее 700 кпк. Без крупных телескопов различить в ней отдельные звезды невозможно, а потому долгое время ее и принимали за туманность. Рассматривая фотографии этой очень красивой галактики, можно представить себе, как выглядит наша Галактика.

Почти четверть изученных галактик напоминают эллипсоиды и потому называются *эллиптическими*. К *неправильным* галактикам, не имеющим определенной формы, относятся, например, Большое и Малое Магеллановы Облака. Они даже невооруженным глазом видны на небе Южного полушария Земли. Это самые крупные из двух десятков спутников Галактики. Галактики-спутники есть и у Туманности Андромеды.

Наша Галактика, Туманность Андромеды и некоторые другие галактики входят в состав **Местной группы галактик**, размеры которой достигают сотен тысяч парсек. Тысячи галактик образуют **скопления**, размеры которых составляют несколько мегапарсек. Наибольшие системы галактик — **сверхскопления**, содержащие тысячи галактик и простирающиеся на десятки мегапарсек. Они завершают иерархию космических систем.

Все доступные астрономическим наблюдениям галактики, их скопления и сверхскопления — это и есть наша Вселенная, или **Метагалактика**.

**Активные галактики и квазары.** Начиная со второй половины XX в. астрофизики открывают и исследуют галактики, в которых, судя по спектрам, происходит движение газа со скоростями в десятки тысяч километров в секунду, а также наблюдаются мощные радио-, рентгеновское и ультрафиолетовое излучения. Примеры наиболее изученных активных галактик — *радиогалактики* в созвездиях Лебедя, Кентавра и Девы. Предполагают, что в ядре радиогалактики в созвездии Девы (расстояние 60 млн св. лет) может находиться самая большая из известных сверхмассивных черных дыр — с массой порядка трех миллиардов масс Солнца ( $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ).

В 60-х гг. XX в. были открыты **квазары** — радиоисточники, внешне похожие на звезды. Спектры квазаров поразили астрофизиков, потому что сначала они не могли отождествить их с линиями известных химических элементов. Эту тайну квазаров раскрыли, когда узнали, что линии в их спектрах относятся к обычным химическим элементам, но очень сильно смещены к красному концу вследствие эффекта Доплера. Квазары оказались **самыми далекими объектами**. Расстояние до одного из ближайших квазаров примерно 3 млрд св. лет, а до самых далеких — более 10 млрд св. лет. Счи-

тается, что самые далекие квазары мы видим вблизи границ Метагалактики. С таких расстояний можно наблюдать только ярчайшие объекты: светимость квазара превышает светимость обычной галактики, которая, как вы знаете, состоит из миллиардов звезд!

Квазары — переменные источники излучения. Зная период и амплитуду колебания блеска, определили размеры квазаров. Они оказались порядка 1 св. года, т. е. значительно больше звезд, но меньше Галактики. Вместе с тем массы квазаров в миллионы раз больше, чем масса Солнца. Скорее всего, они представляют собой чрезвычайно активные ядра очень далеких галактик, содержащих, возможно, сверхмассивные черные дыры.

**Расширение Метагалактики.** В 1929 г. американский астроном Эдвин Хаббл (1889—1953) установил, что линии в спектрах большинства исследованных им галактик смещены к красному концу спектра. Это *красное смещение* тем больше, чем дальше от нас находится галактика. Объяснив красное смещение эффектом Доплера, астрономы пришли к выводу: расстояния между всеми галактиками непрерывно увеличиваются, следовательно, Метагалактика не стационарна. Мы живем в *расширяющейся Вселенной*. Галактики в ней разбегаются с очень большими скоростями. Наибольшие скорости у квазаров — самых далеких внегалактических объектов.

Э. Хаббл открыл закон, согласно которому скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до нее:  $v = Hr$ , где  $v$  — лучевая скорость галактики;  $r$  — расстояние;  $H$  — *параметр Хаббла*. По современным оценкам  $H \approx 65$  км/(с · Мпк). Это означает, что галактики, расстояние между которыми 1 Мпк, удаляются друг от друга со скоростью 65 км/с. По формуле закона Хаббла можно вычислить расстояние до галактики, если известна ее лучевая скорость. Закон Хаббла наиболее точно выполняется для сравнительно далеких галактик. У близких к нам галактик есть свои индивидуальные движения; например, Туманность Андромеды не удаляется, а приближается к нам, что через несколько миллиардов лет может привести к столкновению.

Общее расширение Метагалактики называют *космологическим*, т. е. относящимся ко всей нашей Вселенной, а также *фридмановским*, тем самым подчеркивая, что наиболее грандиозное из наблюдаемых явлений во Вселенной было предсказано в начале 20-х гг. прошлого века нашим соотечественником Александром Александровичем Фридманом (1888—1925). Это предсказание было сделано на основе общей теории относительности А. Эйнштейна. Космологическое расширение проявляется только в очень больших масштабах пространства Вселенной. Никакого расширения Земли, Солнца, Солнечной системы не происходит. В нем, как мы уже знаем, не участвуют даже ближайшие галактики. Космологическое расширение — одно из самых крупномасштабных свойств нашей Вселенной.

В последние годы XX в. несколько групп астрономов сделали еще одно крупное открытие: *ускоренное разбегание галактик*. Из



него следуют два вывода, чрезвычайно важные для космологии и философии.

Во-первых, можно утверждать, что расширение нашей Вселенной будет продолжаться неограниченно долго. Через очень многие миллиарды лет погаснут звезды, разрушатся галактики, «испарятся» черные дыры и когда-нибудь распадутся даже такие устойчивые (но не вечно стабильные!) элементарные частицы, как протоны.

Во-вторых, ускоренное разбегание галактик свидетельствует о том, что во Вселенной действуют не только силы всемирного тяготения (гравитация), но и **всемирная антигравитация**. Интересно, что и это было предсказано общей теорией относительности Эйнштейна!

Невидимую антигравитационную среду стали называть *космическим вакуумом* или *темной энергией*. Природа космического вакуума загадочна, но узнать, из чего состоит космический вакуум, совершенно необходимо, потому что он составляет почти 70% массы всей Вселенной (!). Кроме того, примерно 25% массы Вселенной приходится на *скрытую массу*, тоже невидимую (это, например, погасшие звезды и галактики). Лишь 1—2% остается звездам, которые еще недавно считались главными небесными телами Вселенной. Следовательно, наблюдаемая нами светящаяся Вселенная, состоящая из огромного числа звезд, галактик и скоплений галактик, — это только верхушка вселенского айсберга. Вполне возможно, что человечество находится на пороге непредсказуемых открытий. Может быть, в XXI в. в естествознании произойдет новая революция, лидерами которой вновь станут астрономия и физика.

**Эволюция Метагалактики.** Наблюдаемое разбегание галактик приводит к важному выводу: расширение началось с *Большого взрыва*. Параметр Хаббла позволяет оценить возраст нашей Вселенной: это величина, обратная параметру Хаббла ( $1/H$ ) и имеющая размерность времени. Полагая  $H = 65$  км/(с·Мпк), получаем искомое значение размера Вселенной — около 14 млрд лет. Это, конечно, больше возраста Галактики (10 млрд лет), Солнца (5 млрд лет), Земли и других планет Солнечной системы (4,5 млрд лет).

Согласно гипотезе *горячей Вселенной* в сверхгорячей и сверхплотной Вселенной, возникшей вскоре после Большого взрыва, происходили физические процессы, которые привели к появлению ядер атомов первых химических элементов — водорода и гелия. Они и сейчас являются самыми распространенными во Вселенной. Более тяжелые химические элементы рождались в недрах звезд, ими Вселенная обогащалась в результате взрывов сверхновых звезд. К числу важнейших доказательств гипотезы горячей Вселенной относится открытие в 1965 г. *реликтового излучения*. Оно почти равномерно заполняет пространство Вселенной и представляет собой остывшее (до 2,7 К) излучение, дошедшее к нам от одной из ранних эпох эволюции Метагалактики.

Уже в первый миллиард лет после Большого взрыва стали рождаться звезды и галактики. Существующие гипотезы *происхожде-*

ния галактик будут, возможно, дорабатываться с учетом открытия космического вакуума. Пока наибольшие успехи достигнуты в теории происхождения звезд. Считается, что звезды рождаются из сгущений, возникающих под действием гравитации в газопылевых облаках. При их сжатии потенциальная энергия переходит в энергию теплового излучения. Постепенно сгусток превращается в звезду — газовый шар. В его недрах начинаются термоядерные реакции, в ходе которых последовательно «выгорают» водород, гелий и другие химические элементы. Вы уже знаете, что солнцеподобные звезды, пройдя через стадию красных гигантов, превращаются в белые карлики, а более массивные звезды — в нейтронные звезды, или звездные черные дыры.

Важный вывод теории заключается в том, что процесс звездообразования в нашей Галактике и в других галактиках происходит и в настоящее время. Это означает, что впереди у нашей Вселенной очень долгая жизнь.

- ?
1. К какому типу галактик относится наша Галактика? 2. Каковы самые большие спутники Галактики? 3. Какие галактики входят в Местную группу галактик? 4. Каковы наибольшие системы галактик? 5. Что такое Метагалактика? 6. Каковы размеры Метагалактики и на чем основана их оценка? 7. В чем заключается закон Хаббла? 8. На чем основывается оценка возраста нашей Вселенной и от чего он отсчитывается? 9. Каков возраст Метагалактики, Галактики, Солнца, Земли? 10. Какие физические характеристики отличали состояние Вселенной в эпоху Большого взрыва? 11. Всегда ли существовали известные нам химические элементы? 12. Есть ли доказательства гипотезы горячей Вселенной? 13. Всегда ли существовали наблюдаемые в настоящее время звезды и галактики, планеты и их спутники?

## § 70. БОЛЬШАЯ ВСЕЛЕННАЯ — МЕТАВСЕЛЕННАЯ

**Другие вселенные.** История астрономии свидетельствует: ошибочными оказались представления о том, что Земля, Солнце, наша Галактика находятся в центре Вселенной. Мы живем в расширяющейся, непрерывно эволюционирующей Метагалактике, в которой галактики разбегаются друг от друга. Мы называем Метагалактику нашей Вселенной, тем самым подчеркивая, что могут быть еще и другие вселенные. Пока ни одна из них не открыта, но есть доводы в пользу их существования. Например, с 80-х гг. XX в. разрабатывается гипотеза «раздувающейся Вселенной». Согласно этой гипотезе «обычному» (фридмановскому) расширению предшествовала кратковременная особая стадия, для которой было характерно стремительное расширение (раздувание). В результате могло возникнуть множество «зародышей» будущих мини-вселенных, одной из которых стала Метагалактика. Другой пример связан с тем, что фунда-



ментальные физические постоянные (константы четырех типов взаимодействий, массы нуклонов и электронов и трехмерность пространства) оказались удивительно «приспособленными» для возникновения звезд, планет и жизни в Метагалактике. Расчеты показывают, что, если бы эти величины были иными, звезды и планеты просто не могли бы появиться и существовать. Возможно, что Метагалактика уникальна, но не исключено, что есть и множество совершенно других вселенных в **Большой Вселенной** (*Метавселенной*, или *Мультиверсе*). В вечно «кипящем» космическом вакууме Метавселенной могут самопроизвольно рождаться мини-вселенные, обладающие разными наборами фундаментальных констант и совершенно необычной для нас геометрией. Большая Вселенная вечна, она наверняка никогда не состарится.

**«Кротовые норы».** Ученые не могут свикнуться с мыслью о том, что мы никогда не получим никакой информации о других вселенных. Этим объясняется интерес к *«кротовым норам»* — гипотетическим тоннелям в пространстве-времени. Возможность существования этих экзотических объектов была тоже предсказана А. Эйнштейном! По некоторым внешним признакам «кротовые норы» могут оказаться сходными со сверхмассивными дырами в ядрах галактик. Но отличаются от них тем, что, например, наблюдениям будут доступны вещество или объекты, попадающие в тоннель или вылетающие из него. Появляется надежда «видеть» сквозь тоннель, а может быть, даже совершать путешествия в любую часть Метагалактики или в какую-нибудь другую вселенную! Сегодня идея создания такой «машины» для путешествий в пространстве (и во времени?) кажется фантастической, но когда-нибудь прогресс в области астрономии и физики превратит ее в реальность. Тогда бесконечно расширится современное представление о Вселенной — уникальной физической лаборатории. На рисунке 121 схематически

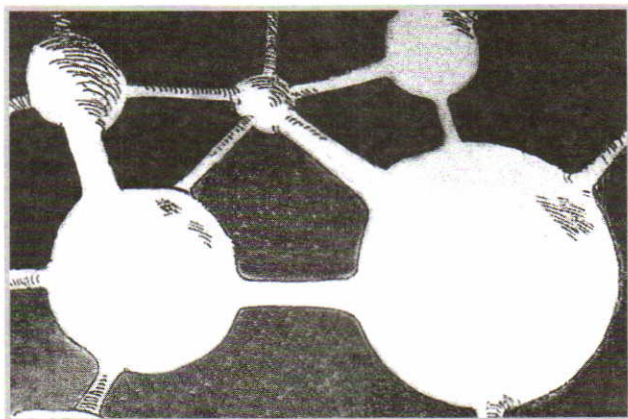


Рис. 121

показано, как ученые сейчас представляют себе мини-вселенные («пузырьки» и соединяющие их тоннели).

В этой связи уместно привести прекрасные слова французского математика, физика и философа Анри Пуанкаре (1854—1912): «Астрономия полезна потому, что она возвышает нас над нами сами; она полезна потому, что она величественна; она полезна потому, что она прекрасна. Именно она являет нам, как ничтожен человек телом и как велик духом, ибо ум его в состоянии объять сияющие бездны, где его тело является лишь темной точкой, в состоянии наслаждаться их безмолвной гармонией. Так приходим мы к сознанию своей мощи. Здесь никакая цена не может быть слишком дорогой, потому что это сознание делает нас сильнее».

- ?
1. Чем принципиально различаются представления о Метагалактике и Метавселенной? 2. Чем интересны «кратовые норы» для дальнейшего развития естествознания и философии? 3. Многие считают астрономию наукой, совершенно оторванной от жизни, и даже путают ее с астрологией. Если вы не согласны с этим, сформулируйте свои возражения.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Однажды, находясь в гостях у друзей, Эйнштейн познакомился с 18-летней девушкой. «А кто Вы, собственно говоря, по специальности?» — спросила девушка седовласого ученого. «Я посвятил себя изучению физики» — ответил Эйнштейн. «Как, в таком возрасте Вы все еще изучаете физику? — удивилась она. — Я и то разделалась с ней больше года назад».

Не спешите «разделяться» с физикой. Физика делает человека не только умнее, но и сильнее. Именно она помогла человеку избавиться от оков первобытного страха и найти общий язык с природой...

«Закройте глаза, освободите уши, напрягите слух, и от нежнейшего дуновения до самого дикого шума, от простейшего звука до высочайшей гармонии, от самого мощного страстного крика до самых кротких слов разума — все это речь природы, которая обнаруживает свое бытие, свою силу, свою жизнь...

Она дает дивное зрелище; видит ли она его сама, не знаем, но она его дает для нас, а мы, незамеченные, смотрим из-за угла... Каждому является она в особенном виде. Она скрывается под тысячей имен и названий, и все равно одна и та же. Она ввела меня в жизнь, она и уведет. Я доверяю ей. Пусть она делает со мной что хочет...» — так писал о природе немецкий поэт, мыслитель и естествоиспытатель Иоганн Вольфганг Гёте.

Человек — дитя природы. И он должен уметь с ней разговаривать. Но как? На каком языке? Французский поэт Шарль Бодлер писал:

Природа — это храм, где камни говорят,  
Хоть часто их язык бывает непонятен.  
Вокруг — лес символов, тревожен, необъятен,  
И символы на нас с усмешкою глядят.

Язык природы люди разгадали уже давно. Еще Галилей говорил, что «книга природы написана математическими знаками». В этом мы не сомневаемся и сегодня, спустя триста лет. «Вопрос приходится ставить природе на математическом языке, — писал Вернер Гейзенберг, — ибо только на нем можно получить ответ».

Любоваться природой можно и не зная математики. Но понять ее и увидеть то, что скрыто за внешними образами явлений, можно лишь с помощью точной науки. Только она позволяет заметить, что «в явлениях природы есть формы и ритмы, недоступные глазу

созерцателя, но открытые глазу аналитика. Эти формы и ритмы мы называем физическими законами»<sup>1</sup>.

«Ученый — писал Анри Пуанкаре, — изучает природу не потому, что это полезно; он исследует ее потому, что это доставляет ему наслаждение, а это дает ему наслаждение потому, что природа прекрасна. Если бы природа не была прекрасна, она не стоила бы того, чтобы быть познанной; жизнь не стоила бы того, чтобы быть прожитой. Я здесь говорю, конечно, не о той красоте, которая бросается в глаза, не о красоте качества и видимых свойств; и притом не потому, что я такой красоты не признаю, отнюдь нет, а потому, что она не имеет ничего общего с наукой. Я имею в виду ту более глубокую красоту, которая кроется в гармонии частей и которая постигается только чистым разумом. Это она создает почву, создает, так сказать, остов для игры видимых красот, ласкающих наши чувства, и без этой поддержки красота мимолетных впечатлений была бы весьма несовершенной, как все неотчетливое и преходящее. Напротив, красота интеллектуальная дает удовлетворение сама по себе, и, быть может, больше ради нее, чем ради будущего блага рода человеческого, ученый обрекает себя на долгие и тяжкие труды...

Я не говорю: наука полезна потому, что она научает нас создавать машины; я говорю: машины полезны потому, что, работая для нас, они некогда оставят нам больше времени для научных занятий...

Однако геологическая история показывает нам, что жизнь есть лишь беглый эпизод между двумя вечностями смерти и что в этом эпизоде прошедшая и будущая длительность сознательной мысли — не более, как мгновение. Мысль — только вспышка света посреди долгой ночи.

Но эта вспышка — всё».

---

<sup>1</sup> Фейнман Р. Характер физических законов. — М., 1968.



# ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ

## ОПТИКА

### Глава 1

1. Глупо улыбаясь, Том забавлялся, играя с куском зеркала, который он выменял у Роджерса на огрызок спелого яблока. Вдруг он заметил, что лучи солнца, отразившись от зеркала, пошли горизонтально. Под каким углом  $\gamma$  к горизонту стояло в этот момент зеркало, если солнечные лучи падали под углом  $60^\circ$  к земной поверхности?

2. Напрягая все свои силы, Абдула все-таки дополз до колодца. Ничего не увидев в зияющем черном отверстии, он вынул из кармана осколок плоского зеркала. Под каким углом к горизонту ему нужно расположить это зеркало, чтобы лучами палящего солнца, падающими под углом  $60^\circ$  к земной поверхности, осветить дно этого узкого вертикального колодца?

3. Круглый бассейн радиусом  $R=5$  м залит до краев водой. Над центром бассейна на высоте  $h=3$  м от поверхности воды висит лампа. На какое расстояние  $l$  от края бассейна может отойти человек ростом  $H=1,8$  м, чтобы все еще видеть отражение лампы в воде?

4. Два плоских зеркала расположены под углом друг к другу. Между ними помещен точечный источник света. Изображение источника в первом зеркале находится на расстоянии  $a_1=6$  см, а во втором зеркале — на расстоянии  $a_2=8$  см от источника. Расстояние между этими изображениями  $l=10$  см. Найдите угол  $\varphi$  между зеркалами.

5. При какой минимальной высоте плоского зеркала смотрящий в него человек ростом  $H$  может увидеть себя во весь рост? Зеркало расположено вертикально.

6. Человек идет по направлению к плоскому зеркалу со скоростью  $2$  м/с. С какой скоростью он приближается к своему изображению?

7. При падении на плоскую границу двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  свет частично отражается, частично преломляется. При каком угле падения отраженный луч перпендикулярен преломленному?

8. Преломленный луч света составляет с отраженным лучом угол  $90^\circ$ . Найдите относительный показатель преломления, если луч падает на границу раздела сред под углом  $\alpha$ , для которого  $\sin \alpha=0,8$ .

9. Докажите, что луч света после прохождения через плоскопараллельную пластинку остается параллельным падающему лучу.

10. Угол падения луча света на плоскопараллельную пластинку равен  $\alpha$ . Толщина пластинки  $d$ , показатель преломления  $n$ . На какое расстояние  $h$  сместится луч по отношению к своему первоначальному направлению после выхода из пластинки?

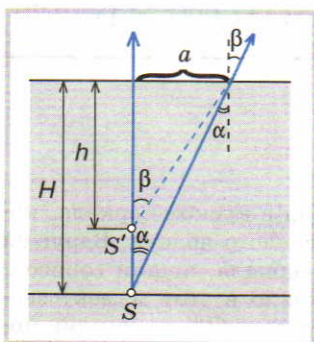


Рис. 122

11. Определите, во сколько раз истинная глубина водоема больше кажущейся, если смотреть на его дно вертикально вниз.

Решение:

Кажущаяся глубина водоема — это расстояние  $h$  от поверхности воды до мнимого изображения  $S'$  той точки дна, которую разглядывает наблюдатель. Из рисунка 122 видно, что истинная глубина

$$H = \frac{a}{\operatorname{tg} \alpha},$$

а кажущаяся глубина  $h = \frac{a}{\operatorname{tg} \beta}$ .

Поэтому их отношение  $\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}$ .

Так как углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы (при вертикальном разглядывании дна лучи с большими углами просто не попадут в глаз человека), то их тангенсы можно заменить на синусы. С учетом закона преломления это дает

$$\frac{H}{h} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n,$$

где  $n \approx 1,3$  — показатель преломления воды. Полученный результат означает, что истинная глубина водоема приблизительно в 1,3 раза больше кажущейся.

12. Мальчик старается попасть веткой дерева в предмет, находящийся на дне ручья глубиной 40 см. На каком расстоянии от предмета ветка воткнется в дно ручья, если мальчик, точно нацелившись, ударяет веткой под углом  $45^\circ$  к поверхности воды?  $n_{\text{в}} = 1,33$ .

13. Выйдет ли световой луч из воды в воздух, если угол падения луча равен: а)  $45^\circ$ ; б)  $50^\circ$ ? Показатель преломления воды 1,33.

14. Предельный угол полного отражения для некоторого вещества на границе с воздухом  $\alpha_0 = 30^\circ$ . Каким будет предельный угол полного отражения для этого вещества на границе с этиловым спиртом? Показатель преломления спирта 1,36.

15. Луч падает на прямую треугольную стеклянную призму перпендикулярно ее боковой поверхности. Постройте дальнейший ход луча (рис. 123).

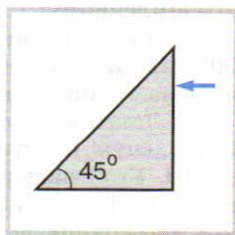


Рис. 123



16. Луч падает на прямую треугольную стеклянную призму перпендикулярно ее основанию. Постройте дальнейший ход луча (рис. 124).

17. На поверхности водоема плавает круглый непрозрачный диск радиусом  $R=4$  м. Глубина водоема  $h=2$  м. Определите радиус полной тени от диска на дне водоема при освещении воды рассеянным светом. Показатель преломления воды  $4/3$ .

18. На дне водоема глубиной 2 м находится точечный источник света. На поверхности воды плавает круглый непрозрачный диск так, что его центр находится над источником. Определите минимальный радиус диска, при котором свет не выходит из воды. Показатель преломления воды  $4/3$ .

19. Луч света выходит из призмы под тем же углом, под которым входит в призму, причем отклоняется от первоначального направления на угол  $\delta=15^\circ$ . Преломляющий угол призмы  $\varphi=45^\circ$ . Найдите показатель преломления материала призмы.

20. Луч света падает перпендикулярно боковой поверхности призмы, преломляющий угол которой  $\varphi=30^\circ$ . Найдите угол отклонения луча от первоначального направления после выхода из призмы. Показатель преломления материала призмы 1,4.

21. Длина световой волны в воде равна 510 нм, частота — 440 ТГц. Найдите показатель преломления и скорость света в воде.

22. Вода освещена красным светом, для которого длина волны в воздухе равна 0,7 мкм. Какой будет длина волны в воде? Какой цвет увидит человек, открывший глаза под водой? Показатель преломления воды 1,3.

23. На белой бумаге наклеены красные буквы. Каким светом надо осветить бумагу, чтобы буквы перестали быть видимыми?

24. На белом листе бумаги написано синим карандашом слово «физика» и желтым — «химия». Через какое стекло — синее или желтое — надо смотреть, чтобы увидеть слово «физика»?

25. С какой скоростью источник красного света ( $\nu_0=440$  ТГц) должен приближаться к наблюдателю, чтобы воспринимаемый им свет стал зеленым ( $\nu=560$  ТГц)?

26. Космический объект, излучающий свет с длиной волны  $\lambda_0=500$  нм, удаляется от Земли со скоростью  $v=0,1$  с. Какую длину волны будут регистрировать земные приемники излучения?

27. Что будет наблюдаться (усиление или ослабление света) в точке схождения двух световых волн с длиной 400 нм, если разность хода этих волн составляет 4 мкм?

28. Что будет наблюдаться (усиление или ослабление света) в точке схождения двух световых волн с длиной 404 нм, если разность хода этих волн составляет 17,17 мкм?

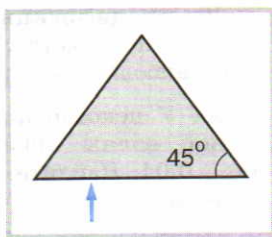


Рис. 124

29. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на каждом миллиметре, падает свет с длиной волны 450 нм. Определите наибольший порядок максимума, который дает эта решетка.

30. У некоторой решетки максимум 2-го порядка для света с длиной волны 400 нм наблюдается под углом, для которого  $\sin \varphi = 0,04$ . Найдите число штрихов, имеющих на каждом сантиметре этой решетки.

31. Постройте изображения, которые дает тонкая собирающая линза в случаях, показанных на рисунке 125.

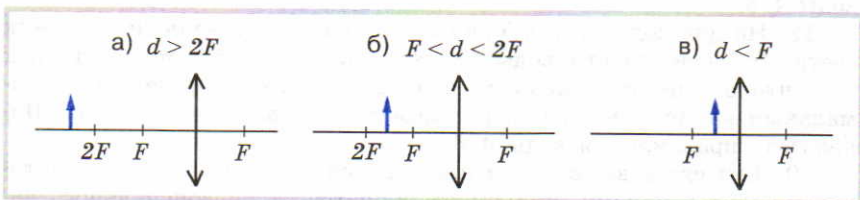


Рис. 125

Охарактеризуйте каждое изображение: а) мнимое оно или действительное; б) увеличенное или уменьшенное; в) прямое или обратное.

32. Постройте и охарактеризуйте изображения, которые дает тонкая рассеивающая линза в случаях, показанных на рисунке 126.

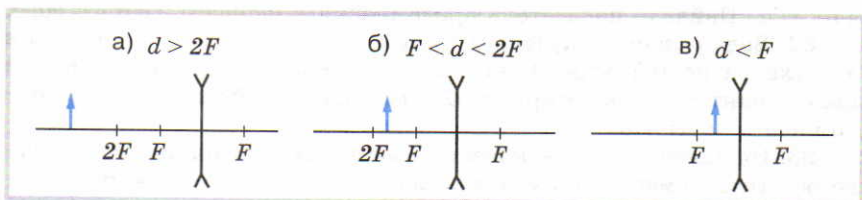


Рис. 126

33. Постройте изображения стрелки в случаях, показанных на рисунке 127.

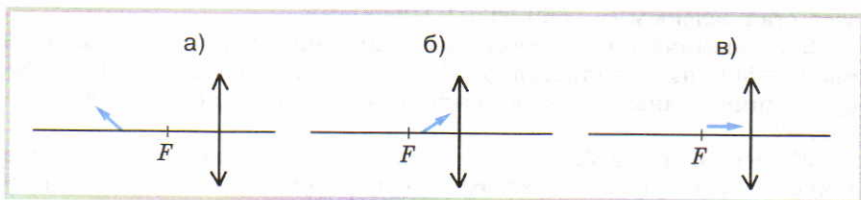


Рис. 127

34. Постройте изображения стрелки в случаях, показанных на рисунке 128.



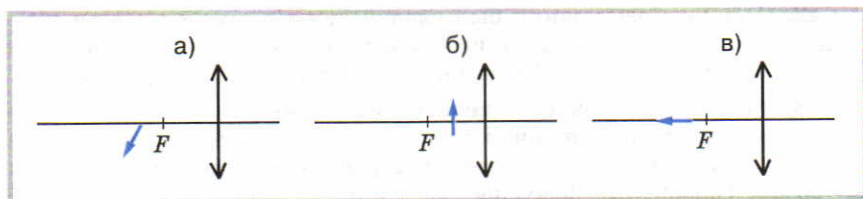


Рис. 128

35. На каком расстоянии от рассеивающей линзы находится предмет, если его изображение получается на расстоянии 2 см от нее? Фокусное расстояние этой линзы 7 см.

36. На рисунке 129 показаны главная оптическая ось линзы, предмет  $AB$  и его изображение  $A'B'$ . Найдите построением оптический центр линзы и ее фокусы.

37. На рисунке 130, *а* и *б* показаны главная оптическая ось линзы, предмет  $AB$  и его изображение  $A'B'$ . Найдите построением оптический центр линзы и ее фокусы.

38. Известен ход луча 1 через линзу. Найдите построением ход луча 2 (рис. 131).

39. Известен ход луча 1 через линзу. Найдите построением ход луча 2 (рис. 132).

40. Предмет находится на расстоянии 5 см от собирающей линзы, а его мнимое изображение — на расстоянии 7 см. Определите фокусное расстояние линзы.

41. Каков размер изображения двухметрового верблюда на сетчатке вытаращенных от удивления глаз боцмана Смита, если верблюд находится на расстоянии 30 м от него? Фокусное расстояние оптической системы глаза 1,5 см.

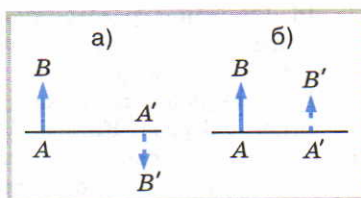


Рис. 129

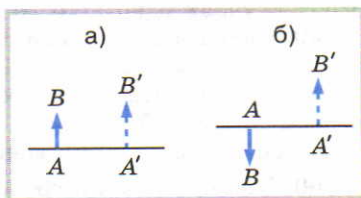


Рис. 130

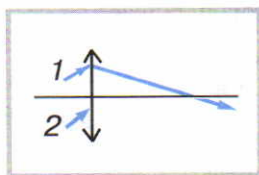


Рис. 131

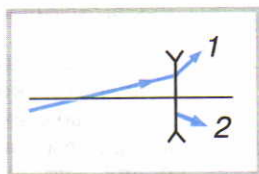


Рис. 132

42. С какого расстояния был сделан снимок трехметрового инопланетянина, если высота его изображения на фотоплёнке оказалась равной 9 мм? Фокусное расстояние объектива фотоаппарата 15 см.

43. Расстояние между точечным источником света и экраном  $l=90$  см. Линза, помещенная между ними, дает на экране четкое изображение при двух положениях, расстояние между которыми  $a=30$  см. Определите фокусное расстояние линзы.

44. Собирающая линза с оптической силой 8 дп дает изображение предмета, равное по размеру самому предмету. На сколько нужно увеличить расстояние между линзой и предметом, чтобы его изображение уменьшилось в 3 раза?

45. Собирающая линза дает прямое изображение предмета с увеличением, равным 2. Расстояние между предметом и изображением  $l=20$  см. Найдите фокусное расстояние линзы.

46. Фокусное расстояние собирающей линзы 10 см, расстояние от предмета до фокуса  $a=4$  см, высота предмета 2 см. Найдите высоту мнимого изображения.

47. Собирающая линза дает прямое изображение предмета, увеличенное в 3 раза. Каким будет увеличение, если собирающую линзу заменить на рассеивающую с тем же по модулю фокусным расстоянием, не меняя положения предмета относительно линзы?

48. Линза дает действительное изображение предмета, увеличенное в 3 раза. Какое увеличение даст линза, оптическая сила которой в 2 раза меньше? Положение предмета относительно линзы в обоих случаях одно и то же.

49. Оптическая система состоит из двух собирающих линз с фокусными расстояниями  $F_1=10$  см и  $F_2=5$  см. Расстояние между линзами  $L=35$  см. Предмет находится на расстоянии  $d_1=25$  см перед первой линзой. Определите, где находится изображение, даваемое такой системой, и чему равно увеличение.

50. Рассеивающая и собирающая линзы с фокусными расстояниями  $F_1=-10$  см и  $F_2=15$  см расположены на расстоянии  $L=30$  см одна от другой. Перед рассеивающей линзой на расстоянии  $d_1=12$  см от нее на главной оптической оси находится точечный источник света. Найдите расстояние  $l$  между источником и его действительным изображением.

51. Оптическая система состоит из двух сложенных вплотную линз 1 и 2 (рис. 133). Линзы сделаны из одного и того же сорта стекла. Оптическая сила первой линзы 5 дп. Чему равна оптическая сила второй линзы?

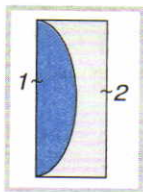


Рис. 133

52. На плоском зеркале лежит плоско-выпуклая линза с фокусным расстоянием 25 см (рис. 134). Чему равна оптическая сила этой системы?



Рис. 134



53. Из-за плохого зрения Вася вынужден читать книгу, держа ее на расстоянии  $d'_0 = 20$  см от глаз. Какова должна быть оптическая сила очков, которые следует носить Васе, чтобы он мог читать книгу на расстоянии наилучшего зрения  $d_0 = 25$  см?

Решение:

| Дано                 | СИ     |
|----------------------|--------|
| $d'_0 = 20$ см       | 0,2 м  |
| $d_0 = 25$ см        | 0,25 м |
| $D_{\text{очк}} - ?$ |        |

Без очков изображение рассматриваемого текста формируется на сетчатке только глазом. Применяя для оптической системы глаза формулу линзы, получаем

$$\frac{1}{d'_0} + \frac{1}{f} = D_{\text{гл}}. \quad (1)$$

Ношение очков позволяет читать текст на стандартном (для нормального глаза) расстоянии наилучшего зрения  $d_0$ . Поэтому

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{f} = D_{\text{гл}} + D_{\text{очк}}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) находим оптическую силу очков:

$$D_{\text{очк}} = \frac{d'_0 - d_0}{d'_0 d_0}.$$

$$D_{\text{очк}} = \frac{0,2 - 0,25}{0,2 \cdot 0,25} \text{ дп} = -1 \text{ дп}.$$

Ответ: оптическая сила очков равна  $-1$  дп.

54. Дальновзоркий человек носит очки с оптической силой 2 дп. На каком расстоянии он будет читать книгу, если снимет очки? Что можно сказать об оптической силе его глаз — она больше или меньше нормальной?

## Глава 2

55. Чему равна энергия фотона с длиной волны 500 нм?

56. Энергия фотона равна  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж. Чему равна его частота?

57. Чему равен импульс фотона, частота которого 800 ТГц?

58. Найдите длину волны фотона, у которого импульс равен  $10^{-27}$  кг·м/с. Чему равна энергия этого фотона?

59. Найдите массу двух фотонов частотой 600 ТГц, движущихся по одной прямой в противоположных направлениях.

60. Найдите массу двух фотонов частотой 450 ТГц, движущихся во взаимно перпендикулярных направлениях.

61. Сколько фотонов испускает за 1 с источник света мощностью 60 Вт, если длина волны излучаемого света равна 1,2 мкм?

62. Источник света мощностью 100 Вт испускает  $5 \cdot 10^{20}$  фотонов за 1 с. Найдите частоту света.

63. Определите абсолютный показатель преломления среды, в которой свет с энергией кванта  $4,4 \cdot 10^{-19}$  Дж имеет длину волны 300 нм.

Дано:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ \lambda &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ n &= ? \end{aligned}$$

Решение:

Абсолютный показатель преломления среды равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = c/v. \quad (1)$$

Скорость света в данной среде можно найти следующим образом:

$$v = \lambda \nu = \lambda \varepsilon / h.$$

Подставляя полученное выражение в формулу (1), находим:

$$n = \frac{ch}{\lambda \varepsilon}.$$

Ответ:  $n = 1,5$ .

64. Вычислите энергию фотона, если известно, что в среде с показателем преломления 1,3 его длина волны равна 590 нм.

65. Литий облучают светом с длиной волны 400 нм. Найдите максимальную кинетическую энергию выбиваемых электронов, если работа выхода электрона из лития равна 2,4 эВ.

66. Какова максимальная скорость электронов, вырываемых с поверхности калия светом с частотой 800 ТГц? Работа выхода электрона из калия равна 2,2 эВ. Масса электрона  $9 \cdot 10^{-31}$  кг.

67. Возникнет ли фотоэффект в цинке под действием излучения с длиной волны 450 нм? Работа выхода электрона из цинка равна 4,2 эВ.

68. Красная граница фотоэффекта для серебра равна  $1,04 \cdot 10^{15}$  Гц. Найдите работу выхода электрона из серебра.

69. Определите длину волны света, который нужно направить на поверхность металла, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна 2000 км/с. Красная граница фотоэффекта для данного металла составляет 690 нм. Масса электрона  $9 \cdot 10^{-31}$  кг.

70. При облучении металла светом с частотой  $\nu$  максимальная скорость фотоэлектронов оказывается равной  $v$ . Чему равна красная граница фотоэффекта для этого металла?

71. При облучении фотоэлемента светом с частотой 750 ТГц запирающее напряжение оказалось равным 2 В, а при облучении светом с частотой 390 ТГц запирающее напряжение стало равным 0,5 В. Определите по этим данным постоянную Планка.  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

72. При какой длине волны света, которым облучают фотоэлемент, задерживающее напряжение равно 2 В? Красная граница фотоэффекта равна 600 нм.  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.



# ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ.

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

### Глава 3

73. Чему равна относительная молекулярная масса: а) кислорода; б) серной кислоты; в) алмаза? Определите молярные массы этих веществ.

74. Чему равна относительная молекулярная масса: а) углекислого газа; б) соляной кислоты; в) железа? Определите молярные массы этих веществ.

75. Определите массу атома золота.

76. Определите массу молекулы углекислого газа.

77. Какое количество вещества содержится в 5,4 кг алюминия?

78. Чему равна масса 10 моль ртути?

79. Сколько молекул содержится в 280 г азота?

80. Сколько атомов содержится в 195 г платины?

81. Цилиндрический стакан с площадью дна  $30 \text{ см}^2$  и высотой 10 см доверху наполнен водой. В эту воду бросили кристаллик поваренной соли ( $\text{NaCl}$ ) массой 0,01 г. После того как вся эта соль растворилась и равномерно распределилась по всему объему воды, 2 мл воды случайно пролили. Сколько молекул соли оказалось в пролитой воде?

82. За сколько суток испарится вода, налитая в стакан, если ее масса равна 200 г и за каждую секунду с поверхности воды вылетает в среднем  $4 \cdot 10^{18}$  молекул?

83. Оцените максимальную площадь нефтяного пятна, которое может образоваться на поверхности воды капля нефти объемом  $1 \text{ мм}^3$ . Плотность нефти  $800 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $0,016 \text{ кг/моль}$ .

84. Чему равен диаметр атома золота, если  $0,1 \text{ см}^3$  этого вещества имеет массу 1,932 г?

### Дополнительные задачи

Д1. Проволоку длиной 5,4 м растянули на 2,7 мм. Чему равны абсолютное и относительное удлинения проволоки?

Д2. Абсолютное и относительное удлинения стержня равны 1 мм и 0,001 соответственно. Какой была длина недеформированного стержня?

Д3. Какого диаметра нужно взять стальной стержень, чтобы при силе упругости 25 кН механическое напряжение составляло 60 МПа? Найдите абсолютное удлинение стержня, если его длина в недеформированном состоянии была равна 2 м. Модуль Юнга стали  $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Д4. Найдите площадь поперечного сечения тонкого стального стержня, в котором возникновение силы упругости, равной 2,5 кН, не будет сопровождаться остаточной деформацией. Предел упругости стали при растяжении  $1,0 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ . Модуль Юнга стали  $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Д5. Чему равна высота подъема воды в капилляре растения радиусом  $0,03$  мм? Коэффициент поверхностного натяжения воды  $7,3 \cdot 10^2$  Н/м. Можно ли только капиллярными явлениями объяснить подъем воды к листьям деревьев из почвы?

Д6. Две капиллярные стеклянные трубки радиусами  $0,1$  и  $1$  мм опущены в сосуд с ртутью. На сколько уровень ртути в капиллярах будет ниже уровня ртути в сосуде?

Д7. Капля воды диаметром  $1$  мм отрывается от вертикальной стеклянной трубки, заполненной водой. Найдите массу капли. Коэффициент поверхностного натяжения воды  $0,073$  Н/м.

Д8. Сферическая капля ртути диаметром  $6$  мм разделилась на две одинаковые капли. На сколько увеличилась при этом энергия поверхностного слоя? Коэффициент поверхностного натяжения ртути равен  $0,465$  Дж/м<sup>2</sup>.

#### Глава 4

85. Внутренняя энергия  $10$  г гелия равна  $10$  кДж. Чему равна при этих условиях средняя кинетическая энергия одного атома гелия?

86. Какое количество атомов содержит неон, если его внутренняя энергия равна  $20$  кДж, а средняя кинетическая энергия каждого атома составляет  $6 \cdot 10^{-23}$  Дж?

87. Расширяясь при постоянном давлении, газ совершил работу  $20$  кДж. Чему было равно давление в газе, если объем газа при расширении увеличился на  $0,2$  м<sup>3</sup>?

88. Какую работу совершают внешние силы при сжатии газа от  $0,3$  до  $0,1$  м<sup>3</sup>, если давление при этом остается неизменным и равным  $100$  кПа? Какую работу при этом совершает сам газ?

89. Определите работу газа, совершаемую в процессах, графики которых изображены на рисунке 135.

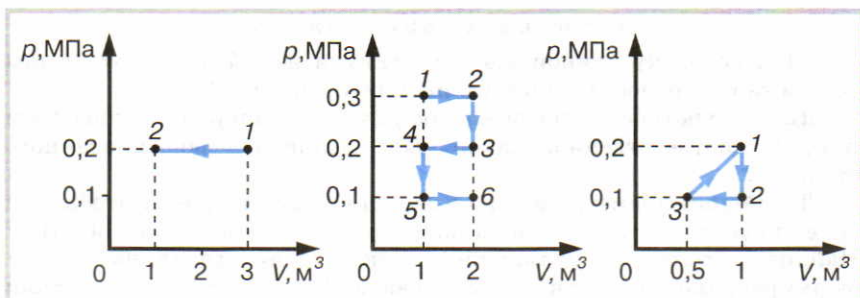


Рис. 135

90. Определите работу газа, совершаемую в процессах, графики которых изображены на рисунке 136.



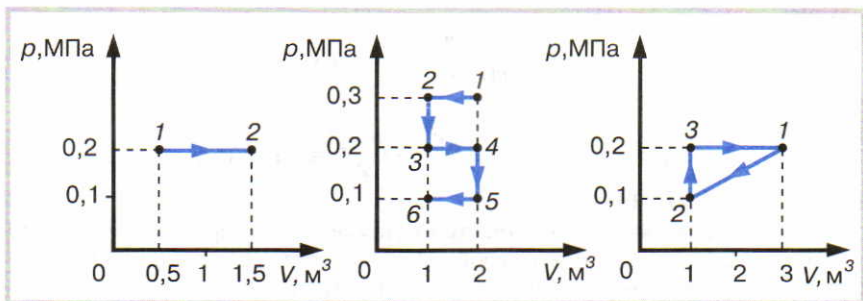


Рис. 136

91. В вертикально расположенном цилиндре с гладкими стенками и площадью основания  $1 \text{ дм}^2$  под поршнем массой  $10 \text{ кг}$  находится воздух. При нагревании воздуха поршень поднялся на  $h = 20 \text{ см}$ . Какую работу совершил воздух, если наружное давление атмосферы  $P_0 = 100 \text{ кПа}$ ?

92. При остывании газа, находящегося под поршнем в вертикальном цилиндре, поршень опустился (без трения) на  $10 \text{ см}$ . При этом над газом была совершена работа  $102 \text{ Дж}$ . Площадь основания цилиндра равна  $0,01 \text{ м}^2$ . Внешнее давление атмосферы составляет  $100 \text{ кПа}$ . Чему равна масса поршня?

93. Найдите количество теплоты, которое выделилось после абсолютно неупругого соударения двух шаров, двигавшихся навстречу друг другу со скоростями  $v_1 = 3 \text{ м/с}$  и  $v_2 = 12 \text{ м/с}$ . Масса первого шара  $0,4 \text{ кг}$ , второго —  $0,2 \text{ кг}$ .

Дано:

$$m_1 = 0,4 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,2 \text{ кг}$$

$$v_1 = 3 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 12 \text{ м/с}$$

$Q = ?$

Решение:

В результате неупругого столкновения шары «слипаются» и часть их механической энергии переходит во внутреннюю энергию. Температура системы из-за этого повышается, после чего начинается теплообмен с окружающей средой. Количество теплоты, выделяющейся при этом, будет равно изменению механической энергии системы:

$$Q = E_2 - E_1.$$

Так как потенциальную энергию системы в данном случае можно считать равной нулю, то в полную механическую энергию здесь будет входить лишь кинетическая энергия шаров:

$$E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}, \quad E_2 = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2},$$

где  $v$  — скорость шаров после неупругого столкновения. Для нахождения этой скорости воспользуемся законом сохранения импульса:

$$m_2 v_2 - m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v,$$

откуда

$$v = \frac{m_2 v_2 - m_1 v_1}{m_1 + m_2} = 2 \text{ м/с.}$$

Таким образом,

$$Q = \frac{(m_1 + m_2)v^2}{2} - \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{m_2 v_2^2}{2} = -15 \text{ Дж.}$$

Ответ:  $Q = -15$  Дж.

94. На тележку массой  $m$ , движущуюся со скоростью  $v$ , падает с малой высоты кирпич массой  $M$  и остается на движущейся тележке. Определите количество теплоты, выделившееся после этого. Трением между колесами тележки и поверхностью земли пренебречь.

95. Брусок массой 1 кг соскальзывает с наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол  $30^\circ$ . Длина наклонной плоскости  $l = 20$  м. Начальная скорость бруска равна 0, конечная (у основания плоскости) — 4 м/с. Какое количество теплоты выделилось в результате трения бруска о плоскость?

96. Поезд массой 2000 т тормозит с ускорением  $0,3 \text{ м/с}^2$ . Через 50 с после начала торможения он остановился. Какое количество теплоты выделилось в результате торможения?

97. Два шарика с массами  $m_1 = 70$  г и  $m_2 = 60$  г движутся перпендикулярно друг другу по гладкому столу. Какое количество теплоты выделится после их абсолютно неупругого столкновения? Скорости шариков до столкновения были соответственно равны 6 и 4 м/с.

98. Пуля массой  $m$ , летящая со скоростью  $v_1$ , попадает в деревянный куб массой  $M$ , лежащий на гладком столе, и пробивает его. Найдите изменение внутренней энергии системы, если пуля прошла через центр куба, вылетев из него со скоростью  $v_2$ .

99. Какое количество теплоты выделяется в результате превращения 100 г воды, взятой при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , в лед, имеющий температуру  $t_2 = -10^\circ\text{C}$ ?

| Некоторые характеристики воды и льда  |                 |
|---------------------------------------|-----------------|
| Удельная теплоемкость воды            | 4,2 кДж/(кг·°C) |
| Удельная теплоемкость льда            | 2,2 кДж/(кг·°C) |
| Удельная теплота парообразования воды | 2257,0 кДж/кг   |
| Удельная теплота плавления льда       | 332,4 кДж/кг    |

100. Какое количество теплоты требуется для превращения 10 г льда, взятого при температуре  $0^\circ\text{C}$ , в водяной пар при  $100^\circ\text{C}$ ?

101. Для приготовления ванны смешивают холодную воду при температуре  $16^\circ\text{C}$  с горячей водой при температуре  $66^\circ\text{C}$ . Сколько литров той и другой воды нужно смешать, если ванна должна содержать 100 л воды при температуре  $\Theta = 36^\circ\text{C}$ ?



Дано:

$$\begin{aligned}t_1 &= 16^\circ\text{C} \\ t_2 &= 66^\circ\text{C} \\ \Theta &= 36^\circ\text{C} \\ V &= 100 \text{ л} \\ \rho &= 1 \text{ кг/л}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_1 &= ? \\ V_2 &= ?\end{aligned}$$

Решение:

Считая рассматриваемую систему замкнутой (теплоизолированной), применим к происходящему в ней теплообмену уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{пол}} = |Q_{\text{отд}}|,$$

где  $Q_{\text{пол}}$  — количество теплоты, полученное холодной водой:

$$Q_{\text{пол}} = cm_1(\Theta - t_1) = c\rho V_1(\Theta - t_1),$$

а  $Q_{\text{отд}}$  — количество теплоты, отданное горячей водой:

$$|Q_{\text{отд}}| = c\rho V_2(t_2 - \Theta) = c\rho(V - V_1)(t_2 - \Theta).$$

Таким образом,

$$c\rho V_1(\Theta - t_1) = c\rho(V - V_1)(t_2 - \Theta),$$

откуда объем холодной воды

$$V_1 = \frac{t_2 - \Theta}{t_2 - t_1} V = 60 \text{ л.}$$

Объем горячей воды

$$V_2 = V - V_1 = 40 \text{ л.}$$

Ответ:  $V_1 = 60$  л,  $V_2 = 40$  л.

**102.** В сосуде смешиваются три химически не взаимодействующие жидкости, имеющие массы  $m_1 = 1$  кг,  $m_2 = 10$  кг,  $m_3 = 5$  кг, температуры  $t_1 = 6^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = -40^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = 60^\circ\text{C}$  и удельные теплоемкости  $c_1 = 2$  кДж/(кг $\cdot$ °C),  $c_2 = 4$  кДж/(кг $\cdot$ °C),  $c_3 = 2$  кДж/(кг $\cdot$ °C). Найдите установившуюся температуру  $\Theta$  жидкой смеси.

**103.** В калориметр с теплоемкостью  $C = 63$  Дж/°C (теплоемкостью тела называют произведение массы этого тела на его удельную теплоемкость:  $C = cm$ ) было налито  $m_1 = 250$  г масла при  $t_1 = 12^\circ\text{C}$ . После опускания в масло медного тела, имеющего массу  $m_2 = 500$  г и температуру  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ , масло нагрелось до  $\Theta = 33^\circ\text{C}$ . Чему равна удельная теплоемкость этого масла? Удельная теплоемкость меди равна 380 Дж/(кг $\cdot$ °C).

**104.** Для определения температуры  $t_1$  печи нагретый в ней стальной цилиндр массой  $m_1 = 0,3$  кг бросили в медный сосуд массой  $m = 0,2$  кг, содержащий  $m_2 = 1,27$  кг воды при  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ . Температура воды после этого повысилась до  $\Theta = 32^\circ\text{C}$ . Вычислите температуру печи. Удельные теплоемкости стали и меди равны соответственно 460 и 380 Дж/(кг $\cdot$ °C).

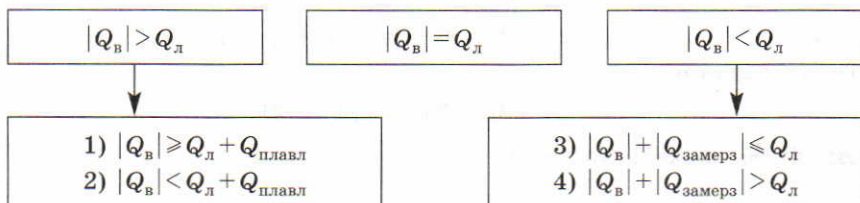
**105.** В теплоизолированный калориметр, содержащий воду, имеющую массу  $m_1$  и температуру  $t_1 > 0$ , положен кусок льда, имеющий массу  $m_2$  и температуру  $t_2 < 0$ . После установления теплового равновесия температура системы оказалась равной  $\Theta$ . Составьте уравнение теплового баланса для всех процессов, возможных в данной системе.

### Решение:

В данной задаче заранее неясно, в каком агрегатном состоянии будет находиться рассматриваемая система после установления теплового равновесия. Поэтому следует учесть все возможные случаи.

Обозначим через  $Q_B$  количество теплоты, выделяемое водой при ее остывании от  $t_1$  до  $0^\circ\text{C}$  ( $|Q_B| = c_B m_1 t_1$ ); через  $Q_L$  количество теплоты, поглощаемое льдом при его нагревании от  $t_2$  до  $0^\circ\text{C}$  ( $Q_L = c_L m_2 |t_2|$ ); через  $Q_{\text{замерз}}$  количество теплоты, отдаваемое водой при ее замерзании ( $|Q_{\text{замерз}}| = \lambda m_1$ ), и через  $Q_{\text{плавл}}$  количество теплоты, поглощаемое льдом при плавлении ( $Q_{\text{плавл}} = \lambda m_2$ ).

Возможны следующие случаи:



В 1-м из этих случаев весь лед растает, и система в конечном состоянии будет представлять собой воду при температуре  $\Theta \geq 0^\circ\text{C}$ . Уравнение теплового баланса при этом будет иметь вид

$$c_B m_2 (0 - t_2) + \lambda m_2 + c_B m_2 (\Theta - 0) = c_B m_1 (t_1 - \Theta).$$

Во 2-м случае растает только часть льда, и система в конечном состоянии будет представлять собой смесь воды и льда при температуре  $\Theta = 0^\circ\text{C}$ . Уравнение теплового баланса при этом будет иметь вид

$$c_L m_2 (0 - t_2) + \lambda m = c_B m_1 (t_1 - 0),$$

где  $m$  — масса растаявшего льда.

В 3-м случае вся вода замерзнет, и система в конечном состоянии будет представлять собой лед при температуре  $\Theta \leq 0^\circ\text{C}$ . Уравнение теплового баланса при этом будет иметь вид

$$c_L m_2 (\Theta - t_2) = c_B m_1 (t_1 - 0) + \lambda m_1 + c_L m_1 (0 - \Theta).$$

В 4-м случае замерзнет только часть воды, и система в конечном состоянии будет представлять собой смесь воды и льда при температуре  $\Theta = 0^\circ\text{C}$ . Уравнение теплового баланса при этом будет иметь вид

$$c_L m_2 (0 - t_2) = c_B m_1 (t_1 - 0) + \lambda m,$$

где  $m$  — масса замерзшей воды.

Если же  $|Q_B| = Q_L$ , то система в конечном состоянии будет представлять собой смесь воды массой  $m_1$  и льда массой  $m_2$  при температуре  $\Theta = 0^\circ\text{C}$ . Уравнение теплового баланса при этом будет иметь вид

$$c_L m_2 (0 - t_2) = c_B m_1 (t_1 - 0).$$

**106.** В воду массой  $m_1 = 2$  кг, имеющую температуру  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ , положили кусок льда массой  $m_2 = 4$  кг, имеющий температуру  $t_2 = -20^\circ\text{C}$ . Определите установившуюся температуру и состав системы после наступления теплового равновесия.



107. В теплоизолированный сосуд, содержащий воду массой  $m_1 = 10$  кг при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , бросили стальной предмет массой  $m_2 = 2$  кг, нагретый до температуры  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ . При этом некоторое количество воды превратилось в пар. Конечная температура, установившаяся в системе,  $\Theta = 24^\circ\text{C}$ . Определите массу воды, обратившуюся в пар. Удельная теплоемкость стали равна  $460$  Дж/(кг $\cdot$ °C).

108. В сосуд, содержащий  $1,5$  кг воды при температуре  $15^\circ\text{C}$ , впускают  $200$  г водяного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Определите температуру в сосуде после наступления теплового равновесия.

109. В калориметр, содержащий  $200$  г воды при температуре  $15^\circ\text{C}$ , брошено  $20$  г мокрого снега. Температура воды в калориметре снизилась до  $10^\circ\text{C}$ . Определите массу воды, которая была в снеге. Теплоемкость калориметра равна  $164$  Дж/°C.

110. Какова теплоемкость печи, если при охлаждении ее от  $60$  до  $20^\circ\text{C}$  она отдает такое количество теплоты, которого достаточно для обращения в пар  $4$  кг льда, взятого при температуре  $-20^\circ\text{C}$ ?

111. На сколько градусов нагревается вода у основания водопада высотой  $10$  м, если на это нагревание идет  $\eta = 50\%$  механической энергии воды?

112. На какую высоту можно было бы поднять груз массой  $1$  т, если бы удалось полностью использовать энергию, выделяющуюся при остывании  $250$  см<sup>3</sup> воды от  $100$  до  $20^\circ\text{C}$ ?

113. Свинцовая пуля, летящая со скоростью  $400$  м/с, попадает в стальную плиту и отскакивает от нее со скоростью  $290$  м/с. Какая часть пули расплавится, если ее температура перед ударом была равна  $107^\circ\text{C}$  и во внутреннюю энергию пули перешло  $80\%$  всей работы, совершаемой при ее ударе о плиту? Удельная теплоемкость свинца  $130$  Дж/(кг $\cdot$ °C), температура плавления свинца  $327^\circ\text{C}$ , удельная теплота плавления свинца  $25$  кДж/кг.

114. Свинцовая пуля, летящая со скоростью  $200$  м/с, попадает в препятствие и застревает в нем. На сколько градусов повысилась при этом температура пули, если в ее внутреннюю энергию перешло  $78\%$  кинетической энергии? Удельная теплоемкость свинца равна  $130$  Дж/(кг $\cdot$ °C).

115. Реактивный самолет пролетает со скоростью  $v = 900$  км/ч путь  $s = 1800$  км, затрачивая топливо массой  $m = 4$  т. Мощность двигателя самолета  $N = 5900$  кВт, его КПД равен  $23\%$ . Какова удельная теплота сгорания топлива, применяемого на самолете?

116. Какая масса пороха сгорает при выстреле из карабина пулей массой  $10$  г? Скорость пули при вылете из карабина  $700$  м/с, удельная теплота сгорания пороха  $q = 3,8$  МДж/кг, КПД карабина  $30\%$ .

117. Какой длины надо взять никелиновую проволоку с площадью поперечного сечения  $0,84$  мм<sup>2</sup>, чтобы изготовить нагреватель на  $220$  В, при помощи которого можно было бы нагреть  $2$  кг воды от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  за  $\tau = 10$  мин при КПД равном  $80\%$ ? Удельное сопротивление никелина  $\rho = 0,42$  мкОм $\cdot$ м.

118. Электрокипятильник со спиралью сопротивлением  $160$  Ом поместили в сосуд, содержащий  $0,5$  л воды при  $20^\circ\text{C}$ , и включили

в сеть напряжением 220 В. Через 20 мин, когда вода уже закипела, электрокипятильник выключили. Какое количество воды выкипело за это время, если КПД спирали 80%.

119. Когда газу сообщили количество теплоты 8 МДж, он расширился и совершил работу 3 МДж. Найдите изменение внутренней энергии газа. Увеличилась она или уменьшилась?

120. При адиабатном расширении газ совершил работу 1 МДж. Чему равно изменение внутренней энергии газа? Увеличилась она или уменьшилась?

121. Газ, находящийся в металлическом сосуде, нагревают на  $20^\circ\text{C}$ . Чему равно изменение внутренней энергии газа, если его масса равна 30 г? Удельная теплоемкость газа  $655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ .

122. Газ массой 50 г нагревают при постоянном давлении от  $20$  до  $70^\circ\text{C}$ . При этом его объем увеличивается на  $0,02 \text{ м}^3$ . Давление газа равно 100 кПа. Удельная теплоемкость газа равна  $1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ . На сколько при этом изменяется внутренняя энергия газа?

123. В одном цикле работы теплового двигателя его рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты 1,5 МДж. Какое количество теплоты оно отдает за цикл холодильнику, если КПД двигателя 20%? Чему равна работа, совершаемая этим двигателем за один цикл?

124. В процессе работы теплового двигателя его рабочее тело получает от нагревателя 1,5 МДж и отдает холодильнику 1,2 МДж теплоты. Во сколько раз КПД этого двигателя меньше максимального возможного для него, если температуры нагревателя и холодильника равны соответственно  $250$  и  $30^\circ\text{C}$ ?

125. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает от нагревателя 40 кДж энергии. Какую работу она при этом произведет, если температуры ее нагревателя и холодильника равны соответственно  $150$  и  $25^\circ\text{C}$ ?

126. В идеальной тепловой машине Карно, КПД которой 30%, газ получил от нагревателя 10 кДж теплоты. Какова температура нагревателя, если температура холодильника  $20^\circ\text{C}$ ? Какое количество теплоты машина отдала холодильнику?

127. КПД теплового двигателя 16%. Каким станет КПД теплового двигателя, если количество теплоты, подводимое за цикл от нагревателя, увеличить на  $\alpha=20\%$ , а количество теплоты, отдаваемое за цикл холодильнику, уменьшить на  $\alpha=20\%$ ?

128. Тепловая машина совершает за цикл работу 100 Дж и отдает холодильнику 400 Дж теплоты. Определите КПД тепловой машины и количество полученной от нагревателя теплоты.

## Глава 5

129. Чему равна внутренняя энергия 10 г гелия при температуре  $27^\circ\text{C}$ ?

130. Найдите внутреннюю энергию пяти молей аргона при температуре  $37^\circ\text{C}$ ?



131. Найдите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул кислорода, если средний квадрат скорости этих молекул равен  $10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

132. При какой температуре средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна  $6,21 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ ?

133. Найдите среднюю квадратичную скорость молекул азота при температуре  $27^\circ\text{C}$ .

134. На сколько процентов увеличивается тепловая скорость молекул воды в крови человека при повышении его температуры от  $37$  до  $40^\circ\text{C}$ ?

135. Чему равна внутренняя энергия гелия, занимающего объем  $0,1 \text{ м}^3$  при давлении  $10^5 \text{ Па}$ ?

136. Найдите давление одного моля газа, занимающего объем  $1 \text{ м}^3$  при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

137. Современная техника позволяет откачивать воздух из сосуда до давления  $0,1 \text{ нПа}$ . Сколько молекул остается в  $1 \text{ см}^3$  такого «вакуума» при температуре  $300 \text{ К}$ ?

138. Чему равна концентрация  $n$  молекул газа, находящегося под давлением  $200 \text{ кПа}$  при температуре  $27^\circ\text{C}$ ?

139. Какое количество вещества содержится в газе, если при давлении  $200 \text{ кПа}$  и температуре  $240 \text{ К}$  он занимает объем  $40 \text{ л}$ ?

140. Каково давление сжатого воздуха, находящегося в баллоне вместимостью  $20 \text{ л}$  при температуре  $12^\circ\text{C}$ , если масса этого воздуха  $2 \text{ кг}$ ? Молярная масса воздуха равна  $29 \text{ г/моль}$ .

141. Чему равна плотность углекислого газа при нормальных условиях ( $p_0 = 101325 \text{ Па} \approx 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ )?

142. Какую температуру имеет кислород, если его масса  $150 \text{ г}$  и он занимает объем  $0,1 \text{ м}^3$  при давлении  $100 \text{ кПа}$ ?

143. Определите молярную массу смеси, состоящей из  $32 \text{ г}$  кислорода и  $118 \text{ г}$  азота (эта смесь по своему составу близка к воздуху).

Дано:

$$\text{O}_2: m_1 = 32 \text{ г}$$

$$\text{N}_2: m_2 = 118 \text{ г}$$

$$M - ?$$

Решение:

Из формулы (20.5) следует, что молярная масса смеси газов определяется выражением

$$M = \frac{m}{N} N_A,$$

где

$$m = m_1 + m_2 -$$

масса смеси, а

$$N = N_1 + N_2 -$$

общее число присутствующих в ней молекул кислорода и азота. Согласно формуле (20.5)

$$N_1 = \frac{m_1}{M_1} N_A, \quad N_2 = \frac{m_2}{M_2} N_A,$$

и, следовательно,

$$N = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) N_A.$$

Таким образом,

$$M = \frac{m_1 + m_2}{N_1 + N_2} N_A = \frac{m_1 + m_2}{m_1/M_1 + m_2/M_2}.$$

Произведем вычисления:

$$M = \frac{150}{32/32 + 118/28} \text{ г/моль} \approx 29 \text{ г/моль}.$$

Ответ:  $M \approx 29$  г/моль.

144. Определите молярную массу смеси, состоящей из 32 г кислорода, 48 г водорода и 44 г углекислого газа.

145. В сосуде находится молекулярный азот  $N_2$  при температуре  $27^\circ\text{C}$ . После того как его нагрели до температуры  $1500^\circ\text{C}$ , 30% молекул азота диссоциировало на атомы. Во сколько раз при этом увеличилось давление в сосуде?

Дано:

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 1773 \text{ К}$$

$$\alpha = 0,3 \text{ К}$$

$$p_2/p_1 = ?$$

Решение:

Запишем уравнение Менделеева — Клапейрона для двух состояний азота (до нагревания и после нагревания):

$$p_1 V = \frac{m}{M_1} RT_1, \quad p_2 V = \frac{m}{M_2} RT_2.$$

Разделив второе из этих уравнений на первое, получим

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{M_1}{M_2} \frac{T_2}{T_1}.$$

Найдем молярную массу смеси  $M_2$ , образовавшейся после нагревания азота. Для этого воспользуемся формулой, полученной при решении задачи 143:

$$M_2 = \frac{m}{\frac{\alpha m}{0,5M_1} + \frac{(1-\alpha)m}{M_1}} = \frac{M_1}{1+\alpha}.$$

Здесь учтено, что молярная масса атомарного азота в 2 раза меньше молярной массы молекулярного азота.

Таким образом,

$$\frac{p_2}{p_1} = (1+\alpha) \frac{T_2}{T_1} = 7,7.$$

Ответ:  $p_2/p_1 = 7,7$ .

146. В закрытом сосуде находится газ массой 100 г под давлением 500 кПа. Какое давление установится в этом сосуде, если после открытия крана 80 г газа выйдет наружу? Температуру газа считать постоянной.

147. В баллоне находится газ при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Во сколько раз уменьшится давление газа, если 40% его массы выйдет из баллона, а температура при этом понизится на  $8^\circ\text{C}$ ?

148. При уменьшении объема газа в 2 раза давление увеличилось на 120 кПа, а абсолютная температура возросла на 10%. Каким было первоначальное давление?



149. Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  давление газа увеличивается на 0,4% первоначального давления.

150. При увеличении абсолютной температуры газа в 2 раза его давление возрастает на 25%. Во сколько раз изменяется объем?

151. Газ при давлении 0,2 МПа и температуре  $15^\circ\text{C}$  имеет объем 5 л. Чему будет равен объем этой массы газа при нормальных условиях?

152. При давлении 100 кПа и температуре  $15^\circ\text{C}$  воздух имеет объем  $0,002\text{ м}^3$ . При каком давлении данная масса воздуха займет объем  $0,004\text{ м}^3$ , если температура воздуха станет равной  $20^\circ\text{C}$ ?

153. Объем воздушного шара  $V=224\text{ м}^3$ , масса его оболочки  $m_{об}=145\text{ кг}$ . Шар наполнен горячим воздухом, находящимся при атмосферном давлении  $p=100\text{ кПа}$ . Какую температуру должен иметь воздух внутри шара, чтобы он начал подниматься? Температура воздуха снаружи шара  $T_0=273\text{ К}$ , молярная масса воздуха  $M=29\text{ г/моль}$ .

Дано:

$$\begin{aligned} V &= 224\text{ м}^3 \\ m_{об} &= 145\text{ кг} \\ p &= 10^5\text{ Па} \\ T_0 &= 273\text{ К} \\ M &= 0,029\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \\ T &= ? \end{aligned}$$

Решение:

Воздушный шар поднимается тогда, когда архимедова (выталкивающая) сила  $F_A = \rho_0 g V$  (где  $\rho_0$  — плотность наружного воздуха) превышает действующую на шар силу тяжести  $F_T = (m + m_{об})g$  (где  $m = \rho V$  — масса горячего воздуха в шаре):

$$\rho_0 g V > (m_{об} + \rho V)g. \quad (1)$$

Плотности воздуха снаружи и внутри шара можно найти с помощью уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$\rho_0 = \frac{pM}{RT_0}, \quad \rho = \frac{pM}{RT}.$$

Подставляя эти выражения в неравенство (1) и сокращая на  $g$ , получаем

$$\frac{pMV}{RT_0} > m_{об} + \frac{pMV}{RT},$$

откуда после несложных алгебраических преобразований находим:

$$T > \frac{T_0}{1 - \frac{m_{об}RT_0}{pMV}} = 553\text{ К}.$$

Ответ:  $T > 553\text{ К}$  ( $t > 280^\circ\text{C}$ ).

154. Определите, при каком наименьшем радиусе шара, наполненного гелием, он начинает подниматься. Давление снаружи и внутри шара  $p=100\text{ кПа}$ , температура  $T=300\text{ К}$ . Молярная масса воздуха  $M_1=29\text{ г/моль}$ . Поверхностная плотность материала оболочки шара  $\rho=0,1\text{ кг/м}^2$ . Молярная масса гелия  $M_2=4\text{ г/моль}$ .

155. При каком давлении газ, занимавший объем  $230\text{ см}^3$ , будет сжат до объема  $225\text{ см}^3$ , если температура газа останется неизменной? Первоначальное давление газа равно  $95\text{ кПа}$ .

156. Собрано  $500 \text{ см}^3$  водорода при давлении  $96 \text{ кПа}$ . Какой объем будет иметь этот газ после изотермического увеличения давления до  $98 \text{ кПа}$ ?

157. В цилиндре под поршнем находится газ, имеющий температуру  $50^\circ\text{C}$ . Во сколько раз уменьшится объем газа после его изобарного охлаждения до температуры  $223 \text{ К}$ ?

158. На сколько градусов надо изобарно нагреть газ, чтобы он занял объем, вдвое больший того, который занимал при  $0^\circ\text{C}$ ?

159. Баллон, содержащий газ под давлением  $2,8 \text{ МПа}$ , находился на складе при температуре  $7^\circ\text{C}$ . Когда баллон перенесли в другое помещение, давление газа в нем стало равным  $3 \text{ МПа}$ . Чему равна температура воздуха в этом помещении?

160. Давление газа в баллоне при температуре  $0^\circ\text{C}$  равно  $200 \text{ кПа}$ . Какое давление установится в баллоне при повышении температуры до  $100^\circ\text{C}$ ?

161. На рисунке 137 изображены графики трех изопроцессов, происходящих с идеальным газом. Назовите эти процессы. Как изменяются давление, объем и температура в каждом из них?

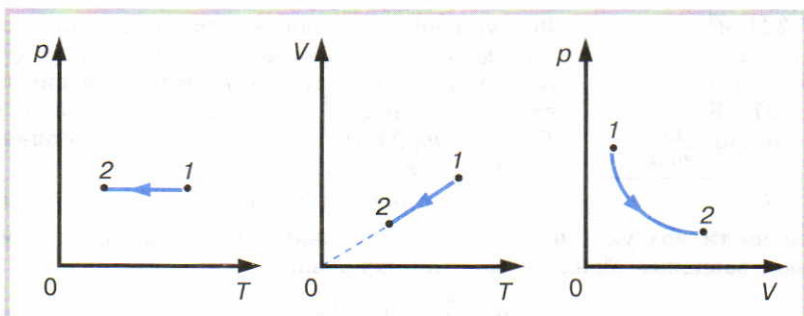


Рис. 137

162. На рисунке 138 изображены графики трех изопроцессов, происходящих с идеальным газом. Назовите эти процессы. Как изменяются давление, объем и температура в каждом из них?

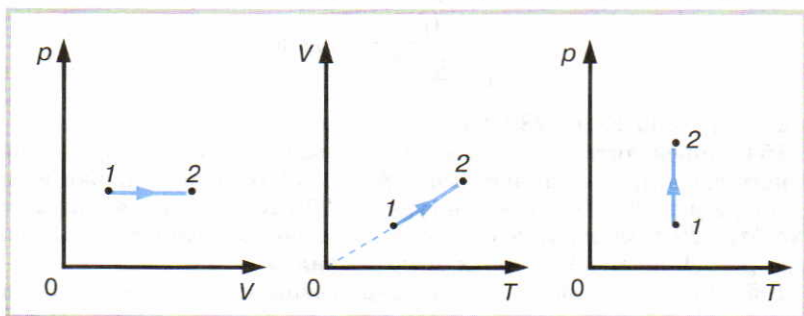


Рис. 138



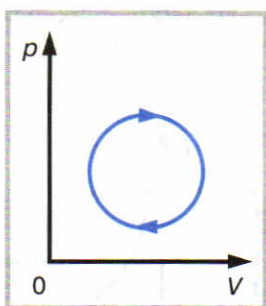


Рис. 139

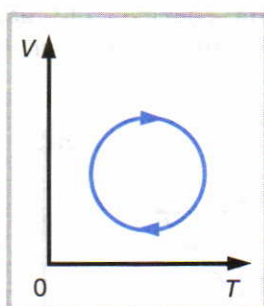


Рис. 140

163. На рисунке 139 изображен график замкнутого процесса, происходящего с идеальным газом. Каким точкам этого графика соответствует наибольшая и наименьшая температура газа?

164. На рисунке 140 изображен график замкнутого процесса, происходящего с идеальным газом. Каким точкам этого графика соответствует наибольшее и наименьшее давление?

165. На рисунке 141 изображен график изменения состояния идеального газа в координатах  $p, T$ . Начертите графики этого процесса в координатах  $p, V$  и  $V, T$ .

Указание. Начните решение этой задачи с заполнения следующей таблицы:

| Участок графика | Какой параметр постоянен на данном участке? | Как изменяются другие параметры? |
|-----------------|---|----------------------------------|
| 1—2             |   |                                  |
| 2—3             |   |                                  |
| 3—4             |   |                                  |
| 4—1             |   |                                  |

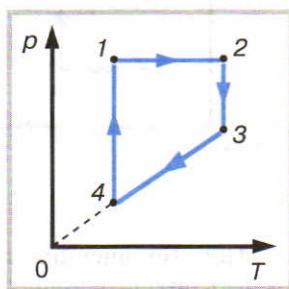


Рис. 141

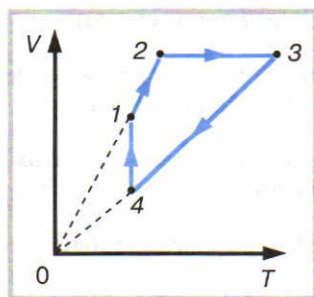


Рис. 142

После того как заполните таблицу, поставьте в новой системе координат точку 1 (ее местоположение выбирается произвольно), затем начертите графики процессов 1—2, 2—3, 3—4 и 4—1 в соответствии с заполненной таблицей.

166. На рисунке 142 изображен график изменения состояния идеального газа в координатах  $V, T$ . Изобразите графики этого процесса в координатах  $p, V$  и  $p, T$ .

167. На рисунке 143 изображены графики трех замкнутых процессов. Постройте графики этих процессов в других координатах.

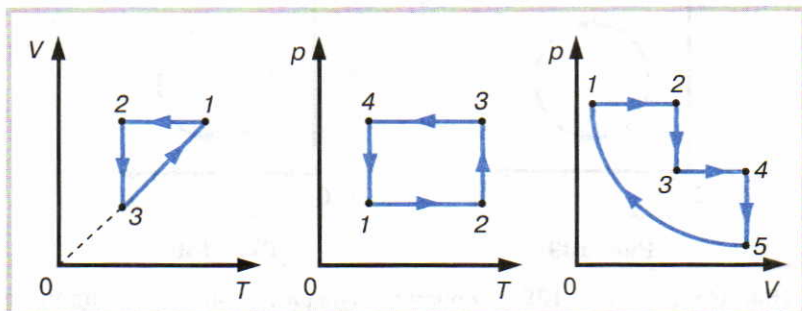


Рис. 143

168. На рисунке 144 изображены графики трех замкнутых процессов. Постройте графики этих процессов в других координатах.

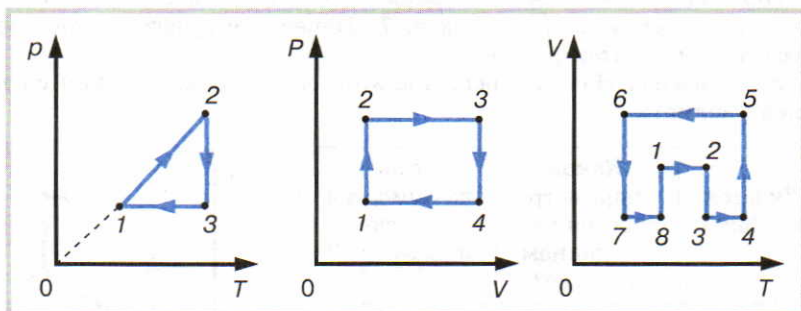


Рис. 144

169. На рисунке 145 изображен график замкнутого процесса (цикл), происходящего с одним молем идеального газа. Температура газа в точке 1 равна  $T_1$ , в точке 3 —  $T_3$ . Определите работу, совершаемую газом за цикл, если в точках 2 и 4 он имел одинаковую температуру.

170. На рисунке 146 изображены два цикла, происходящие с одним и тем же газом:  $1-2-3-1$  и  $2-4-3-2$ . В каком из этих циклов газ совершает большую работу?

171. При адиабатном сжатии двух молей идеального одноатомного газа внешними силами была совершена работа 124,5 Дж. Найдите изменение температуры газа.

172. В закрытом баллоне находится идеальный одноатомный газ. В результате нагревания давление газа увеличилось от 100 до 500 кПа. Найдите объем баллона, учитывая, что внутренняя энергия данного газа возросла при этом на 5 кДж.



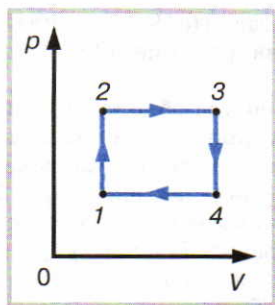


Рис. 145

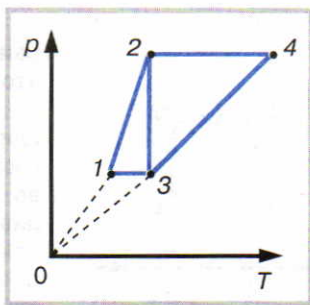


Рис. 146

173. В сосуде вместимостью 20 л находится идеальный одноатомный газ, имеющий температуру  $50^\circ\text{C}$ . Чему равна внутренняя энергия этого газа, если известно, что в  $1\text{ см}^3$  этого газа находится  $10^{20}$  атомов?

174. Баллон вместимостью 20 л, содержащий гелий при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении 300 кПа, охладили на 50 К. Найдите изменение внутренней энергии газа.

175. Чтобы нагреть 5 кг идеального газа на  $2^\circ\text{C}$  при постоянном давлении, потребовалось на 41,55 кДж больше теплоты, чем на нагревание того же газа на  $2^\circ\text{C}$  при постоянном объеме. Определите молярную массу газа.

176. В результате изохорного охлаждения газа, начальная температура которого была равна  $T_1$ , давление газа уменьшилось в  $n$  раз. После этого газ изобарно нагрели до первоначальной температуры. Найдите работу, совершенную газом при нагревании, если масса газа равна  $m$ , а молярная масса равна  $M$ .

177. Температура в бане была равна  $7^\circ\text{C}$ . После того как протопили печь, температура поднялась до  $87^\circ\text{C}$ . На сколько процентов уменьшилось при этом число молекул в бане?

178. Воздух, имеющий температуру  $27^\circ\text{C}$  и объем  $0,05\text{ м}^3$ , находится в цилиндрическом сосуде, закрытом сверху легко скользящим поршнем массой 500 кг и площадью поперечного сечения  $0,1\text{ м}^2$ . Атмосферное давление 100 кПа. Найдите работу, совершаемую воздухом при его нагревании на  $100^\circ\text{C}$ .

179. Какое количество теплоты получил одноатомный газ в ходе процесса 1—2—3, график которого изображен на рисунке 147? Начальный объем газа  $V_1 = 2,5\text{ л}$ , начальное давление  $p_1 = 100\text{ кПа}$ .

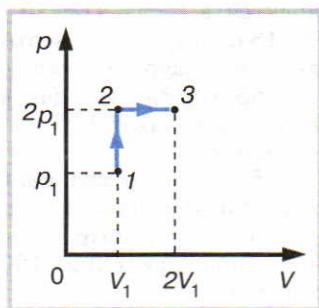


Рис. 147

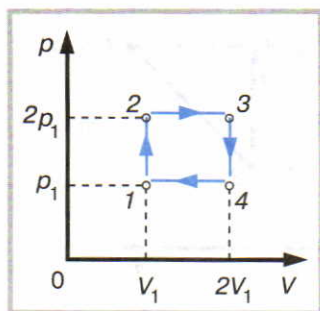


Рис. 148

180. Определите КПД цикла, изображенного на рисунке 148. Газ одноатомный.

181. Два сосуда объемами  $V_1$  и  $V_2$  соединены трубкой с краном. В первом сосуде газ находится под давлением  $p_1$ , во втором — под давлением  $p_2$ . Какое давление установится в сосудах после открытия крана? Температуру считать постоянной. Объемом соединительной трубки пренебречь.

Дано:

$$\begin{array}{l} p_1, V_1, \\ p_2, V_2, \\ T = \text{const} \\ \hline p - ? \end{array}$$

Решение:

После открытия крана в сосудах образуется газовая смесь, давление которой определяется законом Дальтона

$$p = p'_1 + p'_2,$$

где  $p'_1$  и  $p'_2$  — парциальные давления газов, образующих смесь. Каждое из этих давлений можно найти с помощью закона Бойля — Мариотта:

$$p_1 V_1 = p'_1 (V_1 + V_2) \rightarrow p'_1 = p_1 V_1 / (V_1 + V_2),$$

$$p_2 V_2 = p'_2 (V_1 + V_2) \rightarrow p'_2 = p_2 V_2 / (V_1 + V_2).$$

Подставляя найденные давления в закон Дальтона, получаем

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}.$$

182. В сосуде вместимостью 2 л находится смесь 8 г кислорода с 7 г азота. Чему равно давление этой смеси при температуре  $0^\circ\text{C}$ ?

183. Два сосуда, содержащие по 1 моль газа, соединены между собой трубкой с краном. Давление газа в одном сосуде  $3 \cdot 10^5$  Па, в другом —  $5 \cdot 10^5$  Па. Температура одинакова. Какое давление установится в сосудах, если открыть кран?

184. Определите плотность смеси газов, состоящей из  $m_1$  кислорода и  $m_2$  водорода, если давление смеси равно  $p$ , а температура —  $T$ .

185. Определите давление кислорода, если концентрация его молекул составляет  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ , а их средняя квадратичная скорость равна 500 м/с.

186. Чему равна концентрация молекул азота, если при давлении 100 кПа их средняя квадратичная скорость равна 600 м/с?

187. Определите количество молекул в  $0,1 \text{ м}^3$  углекислого газа, если при давлении 120 кПа их тепловая скорость составляет 500 м/с.

188. Какова средняя квадратичная скорость молекул газа массой 600 г, который при давлении 100 кПа занимает объем  $1 \text{ м}^3$ ?



189. Определите давление азота, если его плотность равна  $1,35 \text{ кг/м}^3$ , а средняя квадратичная скорость его молекул —  $500 \text{ м/с}$ .

190. В закрытом сосуде находится газ. Во сколько раз возрастет его давление на стенки сосуда, если средняя квадратичная скорость молекул увеличится на 22%?

191. В сосуде вместимостью  $1,2 \text{ л}$  содержится  $3 \cdot 10^{22}$  молекул газа. Какова средняя кинетическая энергия молекулы этого газа при давлении  $100 \text{ кПа}$ ?

192. В баллоне вместимостью  $0,01 \text{ м}^3$  находится газ, средняя кинетическая энергия всех молекул которого равна  $7,5 \text{ кДж}$ . Под каким давлением находится этот газ? Какова плотность этого газа, если тепловая скорость его молекул равна  $2400 \text{ м/с}$ ?

## Глава 6

193. Определите силу давления воды, действующую на пробку с площадью поперечного сечения  $1 \text{ см}^2$ , вставленную в бочку с водой на  $40 \text{ см}$  ниже уровня воды в ней. Плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

194. Определите высоту столба воды, который создает давление, равное давлению атмосферы  $100 \text{ кПа}$ . Плотность воды равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

195. На какой глубине находился пузырек воздуха, если в процессе его всплытия на поверхность воды его радиус увеличился в  $n = 2$  раза? Атмосферное давление  $p = 100 \text{ кПа}$ , плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Температуру воды считать постоянной.

196. Сосуд, наполненный газом, плотно закрыт пробкой, площадь поперечного сечения которой  $S = 2,5 \text{ см}^2$ . При температуре  $T_1 = 270 \text{ К}$  давление газа  $p_1 = 100 \text{ кПа}$ . На сколько градусов следует нагреть сосуд, чтобы пробка из него вылетела? Максимальная сила трения покоя, удерживающая пробку в сосуде,  $F = 12,5 \text{ Н}$ . Атмосферное давление равно  $100 \text{ кПа}$ .

197. В запаянной с одного конца стеклянной трубке, расположенной горизонтально, находится столбик воздуха длиной  $l_1$ , закрытый столбиком ртути длиной  $h$  (рис. 149). Атмосферное давление равно  $p_1$ . Какой будет длина воздушного столбика, если трубку расположить: а) вертикально отверстием вверх; б) под углом  $\alpha$  к горизонту отверстием вниз? Плотность ртути равна  $\rho$ .

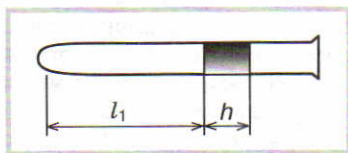


Рис. 149

Решение:

Применяя закон Бойля—Мариотта к процессу, происходящему с воздухом, запертым столбиком ртути, и учитывая, что площадь поперечного сечения трубки одна и та же (и поэтому сокращается), мы можем записать:

$$p_1 l_1 = p_2 l_2,$$

где  $l_2$  — новая длина столбика воздуха, а  $p_2$  — новое давление в этом воздухе. Последнее можно найти из условия равновесия нижнего основания столбика ртути (давления на него снизу и сверху должны быть равны):

$$а) p_2 = p_1 + \rho gh;$$

$$б) p_1 = p_2 + \rho g(h \sin \alpha) \Rightarrow p_2 = p_1 - \rho gh \sin \alpha.$$

Подставляя найденные давления в закон Бойля—Мариотта, получаем

$$а) l_2 = \frac{p_1 l_1}{p_1 + \rho gh};$$

$$б) l_2 = \frac{p_1 l_1}{p_1 - \rho gh \sin \alpha}.$$

**198.** В запаянной с одного конца узкой стеклянной трубке, расположенной горизонтально, находится столбик воздуха длиной  $l_1$ , закрытый столбиком ртути длиной  $h$  (см. рис. 149). Атмосферное давление равно  $p_1$ . Какой будет длина воздушного столбика, если трубку расположить: а) вертикально отверстием вниз; б) под углом  $\alpha$  к горизонту отверстием вверх? Плотность ртути равна  $\rho$ .

**199.** Открытую с обоих концов трубку длиной 1 м погружают в сосуд с ртутью на половину ее длины. Затем верхнее отверстие закрывают и трубку вынимают из ртути. При этом в трубке остается столбик ртути длиной 25 см. Определите атмосферное давление (в мм рт. ст.).

**200.** Посередине откачанной и запаянной с обоих концов горизонтально расположенной трубки длиной 1 м находится столбик ртути длиной 20 см. Если трубку поставить вертикально, столбик ртути сместится на 10 см. Какое давление (в мм рт. ст) в трубке?

**201.** Парциальное давление водяного пара в воздухе равно 1,1 кПа, а давление насыщенного пара при той же температуре составляет 2,2 кПа. Чему равна относительная влажность воздуха?

**202.** Относительная влажность воздуха равна 60%. Чему равно парциальное давление водяного пара, если давление насыщенного пара при той же температуре равно 2,33 кПа?

**203.** Вечером при температуре  $14^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха равна 80%. Выпадет ли ночью роса, если температура воздуха понизится до  $9^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного пара при температуре  $14^\circ\text{C}$  равно 1,6 кПа, а при  $9^\circ\text{C}$  — 1,14 кПа?

Дано:

$$t_1 = 14^\circ\text{C}$$

$$\varphi = 80\% = 0,8$$

$$t_2 = 9^\circ\text{C}$$

$$p_0(t_1) = 1,6 \text{ кПа}$$

$$p_0(t_2) = 1,14 \text{ кПа}$$

Выпадет ли роса?

Решение:

Воспользуемся формулой (40.4). Выражая относительную влажность в виде десятичной дроби (а не в процентах), получаем

$$\varphi = \frac{p_0(t_p)}{p_0(t_1)},$$

откуда давление в точке росы

$$p_0(t_p) = \varphi \cdot p_0(t_1) = 0,8 \cdot 1,6 \text{ кПа} = 1,28 \text{ кПа}.$$



Так как

$$p_0(t_2) < p_0(t_p),$$

то

$$t_2 < t_p.$$

Ответ: роса выпадет.

**204.** Относительная влажность воздуха вечером при температуре  $16^\circ\text{C}$  равна  $55\%$ . Выпадет ли ночью роса, если температура воздуха понизится до  $8^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного пара при температуре  $16^\circ\text{C}$  равно  $1,8$  кПа, а при  $8^\circ\text{C}$  —  $1,06$  кПа.

**205.** Сколько молекул водяного пара содержится в комнате объемом  $100$  м<sup>3</sup> при температуре  $0^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $20\%$ ? Давление насыщенного пара при  $0^\circ\text{C}$  равно  $0,61$  кПа.

**206.** В комнате объемом  $100$  м<sup>3</sup> при температуре  $20^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха составляет  $60\%$ . Определите массу водяного пара в этом воздухе, если давление насыщенного пара при  $20^\circ\text{C}$  равно  $2,3$  кПа.

**207.** Смешали  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup> воздуха с относительной влажностью  $\varphi_1 = 20\%$  и  $V_2 = 2$  м<sup>3</sup> воздуха с относительной влажностью  $\varphi_2 = 30\%$ . Обе порции воздуха были взяты при одинаковой температуре. Определите относительную влажность смеси, если она заняла объем  $V = 3$  м<sup>3</sup>.

**208.** Относительная влажность воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$  равна  $0,8$ . Какова будет относительная влажность воздуха, если, не меняя объема, нагреть его до температуры  $30^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного пара при  $20^\circ\text{C}$  равно  $2,3$  кПа, а при  $30^\circ\text{C}$  —  $4,2$  кПа.

## Глава 7

**209.** Сколько электронов находится внутри атома золота? Чему равен заряд ядра этого атома?

**210.** Атом какого химического элемента содержит  $50$  электронов? Чему равен заряд ядра этого атома?

**211.** Сколько электронов содержится в молекуле воды?

**212.** Сколько электронов содержится в  $320$  г кислорода?

**213.** Чему равна энергия атома водорода во 2-м стационарном состоянии?

**214.** Определите номер квантового состояния, в котором атом водорода имеет энергию  $-1,51$  эВ.

**215.** Найдите частоту излучения атома водорода при его переходе из 2-го стационарного состояния в 1-е.

**216.** Найдите длину волны фотона, излучаемого атомом водорода при переходе из 3-го стационарного состояния во 2-е.

**217.** Сколько фотонов различных энергий могут излучить атомы водорода, если их электроны находятся в состоянии с главным квантовым числом, равным  $3$ ?

**218.** При облучении электронами паров ртути энергия атома ртути увеличивается на  $4,9$  эВ. Какова длина волны излучения, возникающего при переходе атома ртути в основное состояние?

219. Определите частоту и период обращения электрона в основном состоянии атома водорода.

220. Во сколько раз уменьшается скорость электрона в атоме водорода при его переходе из основного состояния в 3-е стационарное состояние? Во сколько раз при этом увеличивается радиус атома?

221. Рассчитайте, на какое наименьшее расстояние к ядру атома золота может приблизиться альфа-частица, двигаясь по прямой, проходящей через центр ядра. Начальная скорость альфа-частицы (на «бесконечности»)  $1,9 \cdot 10^7$  м/с. Масса и заряд альфа-частицы равны соответственно  $6,6 \cdot 10^{-27}$  кг и  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл. Постоянная Кулона  $k = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>.

222. Электрон с энергией  $W = 12,8$  эВ при столкновении с атомом водорода, находящимся в основном состоянии, переводит его в некоторое возбужденное состояние, передав ему всю свою энергию. Какие линии спектра атома водорода (т. е. какой длины волны) могут излучаться при переходе этого атома в состояние с главным квантовым числом, равным 2?

## Глава 8

223. Сколько нуклонов, протонов и нейтронов содержится в ядре бериллия  ${}^9_4\text{Be}$  и ядре кобальта с массовым числом 59?

224. Сколько нуклонов, протонов и нейтронов содержится в ядре бария  ${}^{137}_{56}\text{Ba}$  и ядре урана с массовым числом 238?

225. Чему равен дефект массы тритона, если масса атома трития равна 3,01605 а.е.м.?

226. Чему равен дефект массы дейтрона, если масса атома дейтерия равна 2,01410 а.е.м.?

227. Найдите энергию связи ядра бора  ${}^8_5\text{B}$ , если его атомная масса равна 8,02461 а. е.м.

228. Найдите удельную энергию связи ядра углерода  ${}^{10}_6\text{C}$ , если его атомная масса равна 10,01683 а.е.м.

229. Напишите реакцию альфа-распада ядра полония с массовым числом 210.

230. Напишите реакцию альфа-распада ядра радия с массовым числом 226.

231. Напишите реакцию бета-распада ядра гелия с массовым числом 6.

232. Напишите реакцию бета-распада ядра кислорода с массовым числом 19.

233. Какой изотоп образуется из тория с массовым числом 232 после четырех альфа-распадов и двух бета-распадов?

234. Определите атомный номер и массовое число иония, получающегося из урана-238 в результате двух альфа-распадов и двух бета-распадов. Изотопом какого элемента является ионий?

235. В результате серии альфа-распадов массовое число ядра уменьшилось на 16. Сколько альфа-распадов произошло?

236. В результате серии радиоактивных распадов ядро урана с массовым числом 238 превращается в стабильный изотоп свинца с



массовым числом 206. Сколько при этом происходит альфа- и бета-распадов?

237. Во сколько раз уменьшается число радиоактивных ядер за время, равное четырем периодам полураспада?

238. Чему равен период полураспада одного из изотопов франция, если за 6 с количество ядер этого изотопа уменьшается в 8 раз?

239. Какая доля радиоактивных ядер распадается за время, равное половине периода полураспада?

240. Сколько процентов радиоактивных ядер кобальта останется через 3 дня, если период полураспада данного изотопа составляет 18 ч?

241. Активность некоторого радиоактивного элемента за 4 мин уменьшилась в 16 раз. Чему равен период полураспада этого элемента?

242. Во сколько раз уменьшается активность радиоактивного элемента за время, равное пяти периодам полураспада?

243. Определите возраст образца урановой руды, если накопившийся за время его существования свинец составляет 41% от числа оставшихся ядер урана-238. Период полураспада урана 4,5 млрд лет.

244. Определите возраст уранового образца, если на каждый грамм урана-238 в нем приходится 0,86 г свинца-206.

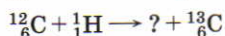
245. Напишите ядерную реакцию, при которой столкновение альфа-частицы с ядром алюминия с массовым числом 27 сопровождается образованием протона.

246. Напишите ядерную реакцию, при которой столкновение альфа-частицы с ядром бора с массовым числом 11 сопровождается образованием нейтрона.

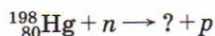
247. Напишите ядерную реакцию, при которой столкновение нейтрона с ядром бора с массовым числом 10 сопровождается образованием альфа-частицы.

248. Напишите ядерную реакцию, при которой столкновение нейтрона с ядром азота с массовым числом 14 сопровождается образованием протона.

249. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:



250. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:



251. Определите энергетический выход следующей ядерной реакции:



Атомные массы изотопов лития, водорода и бериллия равны соответственно 7,01601, 2,01410 и 8,00531 а.е.м.

252. Определите энергию, выделяющуюся в следующей ядерной реакции:



Какая это реакция: экзо- или эндотермическая? Атомные массы изотопов лития, гелия и бора равны соответственно 7,01601, 4,00260 и 10,01294 а.е.м.

253. При делении одного ядра урана-235 выделяется  $Q_1 \approx 200$  МэВ энергии. Определите, за какое время первоначальная загрузка урана в реакторе массой 10 кг уменьшится на 10%, если мощность реактора 10 МВт.

254. При делении одного ядра урана-235 выделяется около 200 МэВ энергии. Какая масса урана сжигается в реакторе мощностью 10 МВт за 1 год непрерывной работы?

255. Первая в мире атомная электростанция имела мощность 5 МВт и КПД 17%. Считая, что при каждом делении ядра урана-235 выделяется 200 МэВ энергии, определите расход урана в сутки.

256. Какова электрическая мощность атомной электростанции, расходующей в сутки 220 г урана-235, если ее КПД равен 25%?

## Глава 9

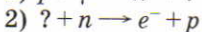
257. Какие из приведенных ниже реакций не существуют? Почему?



258. Какие из приведенных ниже реакций существуют в природе?



259. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:



260. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:



261. Чему равна странность: а) протона; б) фотона; в) сигма-минус-гиперона; г) кси-ноль-гиперона?



262. Чему равна странность: а) нейтрона; б) омега-минус-гиперона; в) пи-плюс-мезона; г) лямбда-ноль-гиперона?

263. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:

- |  |  |
|--|--|
| 1) $\Sigma^0 \rightarrow ? + \gamma$       | 4) $p + ? \rightarrow \Lambda^0 + K^0 + K^0$ |
| 2) $\pi^- + p \rightarrow ? + K^0 + \pi^-$ | 5) $p + \bar{p} \rightarrow \Xi^- + ?$       |
| 3) $K^- + p \rightarrow ? + \Xi^- + \pi^0$ | 6) $p + d \rightarrow ? + {}^3_1\text{H}$    |

264. Определите недостающие частицы в следующих реакциях:

- |  |  |
|--|--|
| 1) $p + \pi^- \rightarrow \Lambda^0 + ?$ | 4) $K^+ + p \rightarrow K^0 + ? + \pi^+$       |
| 2) $? + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$    | 5) $p + K^- \rightarrow K^0 + \pi^+ + ?$       |
| 3) $p + K^- \rightarrow ? + K^+ + K^0$   | 6) $d + ? \rightarrow \pi^0 + {}^3_2\text{He}$ |

265. Какие из приведенных ниже реакций не могут существовать в природе?

- 1)  $K^- + \bar{n} \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
- 2)  $\pi^+ + d \rightarrow p + p + \eta^0$
- 3)  $\Omega^- + p \rightarrow \Xi^0 + \Lambda^0$

266. Какие из приведенных ниже реакций не могут существовать в природе?

- 1)  $\Sigma^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + p$
- 2)  $\Xi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + n$
- 3)  $p + p \rightarrow p + \Sigma^+ + K^0$

## СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

267. Начертите схему, показывающую, как вы представляете себе строение Солнечной системы.

268. Сделайте чертеж, поясняющий второй закон Кеплера. Для этого отметьте на эллиптической орбите положения  $P_1$  и  $P_2$  планеты вблизи перигелия,  $P_3$  и  $P_4$  вблизи афелия, а также соответствующие радиус-векторы. Что можно сказать о площадях  $P_1SP_2$  и  $P_3SP_4$  (где  $S$  — Солнце), если планета проходит  $\cup P_1P_2$  и  $\cup P_3P_4$  за одинаковое время?

269. Зная среднее расстояние от Земли до Солнца и эксцентриситет земной орбиты, вычислите расстояние от Земли до Солнца в перигелии (приблизительно 3 января) и афелии (приблизительно 3 июля).

270. Сколько времени длится год на Плутоне?

271. Угловой диаметр солнечного пятна, которое можно наблюдать через темное стекло (без телескопа!),  $2'$ . Сравните размеры этого пятна с размерами Земли.

Указание. Используйте формулу приближенного вычисления  $\sin p'' = p''/206\,265''$ ,  $\sin 1'' = 0,00000485$ .

272. Вычислите, во сколько раз масса Урана больше массы Земли, зная, что период обращения одного из его спутников (Титании) 8 сут. 17 ч и большая полуось орбиты равна примерно 436 тыс. км.

273. Зная, во сколько раз масса Земли больше массы Луны, вычислите, на каком расстоянии от центра Земли находится *барицентр* — общий центр масс системы Земля—Луна. Расстояние между центрами небесных тел принять равным 382 420 км.

274. На каком расстоянии от центра Земли должна находиться пробная масса, которая с одинаковой силой притягивается Землей и Луной?

275. Во сколько раз звезда  $0^m$  ярче объектов (например, далеких галактик), едва доступных лучшим современным телескопам?

Указание. Вычисление выполните с помощью известной вам формулы и без нее.

276. Каково расстояние до звезды, если считать, что ее абсолютная и видимая звездные величины равны соответственно  $-2,4^m$  и  $+2,1^m$ ?

277. С какой скоростью относительно Солнца движется кажущаяся нам неподвижной звезда, у которой лучевая скорость равна  $+54$  км/с (знак «+» означает, что звезда удаляется) и тангенциальная скорость равна  $18$  км/с?

278. До каких размеров надо было бы сжать Землю и Солнце, чтобы эти небесные тела стали обладать свойствами черных дыр?

279. Через сколько лет земляне могли бы в лучшем случае получить ответ на свое послание разумным обитателям Туманности Андромеды?

280. Сколько времени пришлось бы мчаться к нам лучу света от далекого квазара, у которого красное смещение ( $z$ ) оказалось равным  $3,4$ ? Сравните его лучевую скорость ( $v_r$ ) со скоростью света и вычислите ее значение в километрах.

281. Как оценить размеры квазара, если период изменения блеска этого протяженного внегалактического объекта составляет одни сутки?

282. Если изобразить отрезком в  $1$  см радиус Солнечной системы, то на каком расстоянии от Солнца окажутся ближайшая звезда? ближайшая галактика? самые далекие квазары?



# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

**Оборудование:** плоскопараллельная стеклянная пластинка, линейка, четыре булавки, транспортир, таблицы Брадиса (или калькулятор, позволяющий находить значения тригонометрических функций), кусок картона.

### Указания к выполнению работы

1. Положите на тетрадный лист плоскопараллельную пластинку и обведите ее контуры карандашом (рис. 150).

2. Положив под тетрадный лист кусок картона и расположив тетрадь с пластинкой на уровне глаз, воткните в лист одну за другой четыре булавки так, чтобы все они оказались на одном луче (если они действительно расположены на одном луче, то при рассмотрении их через пластинку они будут загромождать друг друга).

3. Убрав картон, пластинку и булавки, соедините точки 1, 2, 3 и 4 (места проколов на листе) ломаной линией. Обозначив углы падения и преломления света на границе  $AB$ , измерьте эти углы транспортиром, после чего заполните таблицу.

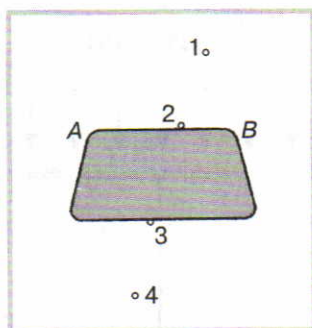


Рис. 150

| $\alpha$ | $\beta$ | $\sin\alpha$ | $\sin\beta$ |
|----------|---------|--------------|-------------|
|          |         |              |             |

4. Вычислите показатель преломления стекла  $n_{ст} = \sin\alpha / \sin\beta$ .

5. Зная показатель преломления стекла, определите скорость света в стекле.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА

**Оборудование:** прибор для определения длины волны света (с дифракционной решеткой), лампа накаливания.

### Указания к выполнению работы

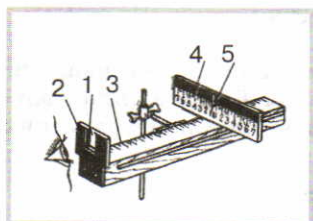


Рис. 151

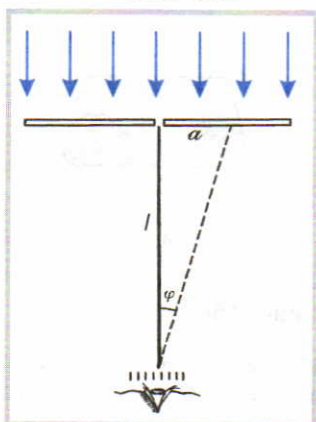


Рис. 152

1. Установите экран 4 со щелью 5 на расстоянии  $l = 50$  см от решетки 1, укрепленной в держателе 2 (рис. 151). Это расстояние определяется с помощью линейки 3.

2. Рассматривая освещенную лампой щель в экране через дифракционную решетку, измерьте расстояния  $a_{кр}$  и  $a_{ф}$  от центра щели до красного и фиолетового краев спектра 1-го порядка. Результаты измерений занесите в таблицу.

3. Используя рисунок 152 и формулу дифракционной решетки, докажите, что длину световой волны можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{ad}{nl},$$

где  $d$  — период решетки;  $n$  — порядок спектра. При выводе этой формулы учтите, что вследствие малости углов, под которыми наблюдаются в данной работе максимумы, их синусы можно заменить на тангенсы.

4. Используя полученную формулу, вычислите длину волны для красного ( $\lambda_{кр}$ ) и фиолетового ( $\lambda_{ф}$ ) света.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ФОРМУЛЫ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

**Оборудование:** источник тока, лампа на подставке, ключ, линза собирающая с рейтером, экран, соединительные провода.

### Указания к выполнению работы

1. Измерьте фокусное расстояние  $F$  линзы. Для этого на экране с помощью линзы получите изображение какого-либо удаленного источника света. Источник света должен быть настолько удален от линзы, чтобы его лучи можно было считать параллельными. В этом случае расстояние от экрана до центра линзы и будет ее фокусным расстоянием  $F$ .



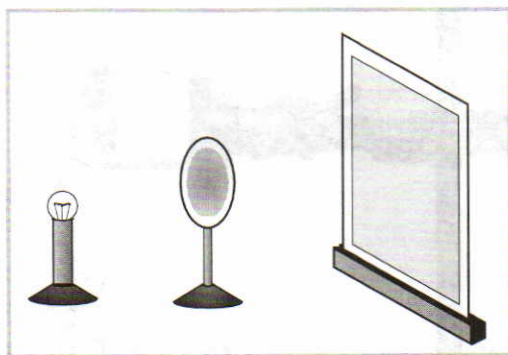


Рис. 153

2. Соберите экспериментальную установку, как показано на рисунке 153.

3. Получите увеличенное изображение лампы и измерьте расстояния  $d$  и  $f$ .

4. Получите уменьшенное изображение лампы и измерьте расстояния  $d$  и  $f$ .

5. Повторите опыт 2—3 раза для различных расстояний между лампой и экраном.

6. Вычислите значения  $1/F$ ,  $1/d$ ,  $1/f$  по результатам каждого опыта.

7. Вычислите сумму  $(1/d + 1/f)$  по результатам каждого опыта, найдите среднее значение  $(1/d + 1/f)$  и заполните таблицу.

| Номер опыта | $F$ , см | $1/F$ , см <sup>-1</sup> | $\Delta 1/F$ , см <sup>-1</sup> | $d$ , см | $1/d$ , см <sup>-1</sup> | $f$ , см | $1/f$ , см <sup>-1</sup> | $(1/d + 1/f)$ , см <sup>-1</sup> | $(1/d + 1/f)_{\text{ср}}$ , см <sup>-1</sup> |
|-------------|----------|--------------------------|---------------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------------------------------|--|
|             |          |                          |                                 |          |                          |          |                          |                                  |  |

8. Сделайте вывод о справедливости формулы линзы.

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВЕРДЕВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ТЕЛ

*Оборудование:* кристаллическое и аморфное вещества из набора «Кристаллизация», термометр лабораторный, стакан с горячей водой, наручные часы.

#### *Указания к выполнению работы*

1. Соберите установку по рисунку 154.

2. Опустите в стакан с горячей водой одну из пробирок с исследуемым веществом и наблюдайте за тем, как оно плавится.

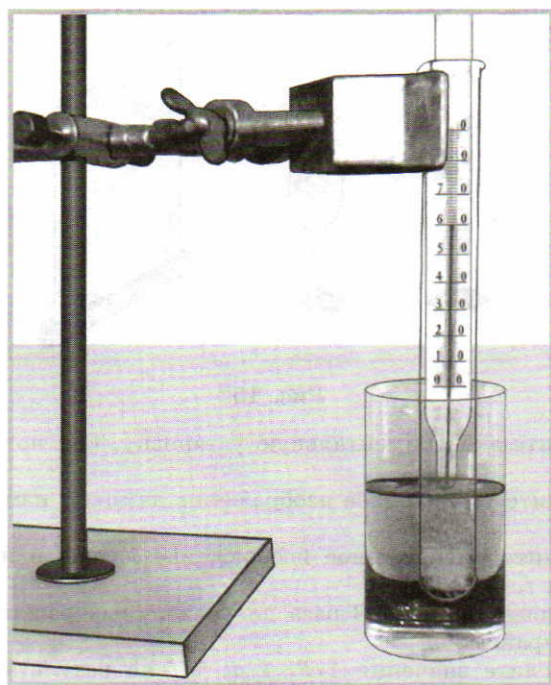


Рис. 154

3. Определите цену деления шкалы термометра.
4. После того как все вещество расплавится, опустите в него термометр и перенесите пробирку в стакан, куда налита горячая вода объемом 150 мл.
5. С момента, когда температура вещества начнет понижаться, с интервалом 1 мин запишите показания термометра и заполните таблицу.

|   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Время, мин                                |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Температура кристаллического вещества, °C |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Температура аморфного вещества, °C        |  |  |  |  |  |  |  |  |

6. Продолжая записывать показания термометра, наблюдайте этап перехода вещества в твердое состояние.
7. При охлаждении до температуры 50 °C прекратите измерения.
8. Повторите опыт с другим веществом.
9. По полученным данным постройте в одних координатных осях графики зависимости температуры веществ от времени.



10. По виду графиков определите, какой из них соответствует отвердеванию кристаллического вещества.

11. По графику отвердевания кристаллического вещества определите температуру его кристаллизации и время, в течение которого она продолжалась.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

*Оборудование:* калориметр, горячая и холодная вода, металлический цилиндр с нитью, термометр, мензурка, весы с гирями.

### Указания к выполнению работы

1. Решите задачу. В калориметр с водой, имеющей массу  $m_1$  и температуру  $t_1$ , опускают металлический цилиндр, имеющий массу  $m_2$  и температуру  $t_2$ . Чему равна удельная теплоемкость цилиндра, если после наступления теплового равновесия температура воды оказалась равной  $\Theta$ ?

2. Налейте в калориметр воду массой  $m$ , равной 100—150 г, комнатной температуры. Взвесив металлический цилиндр, нагрейте его в горячей воде и быстро опустите в калориметр. Измерьте установившуюся температуру  $\Theta$ . Результаты измерений занесите в таблицу.

| $m_1$ , кг | $c_v$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $t_1$ , $^\circ\text{C}$ | $m_2$ , кг | $t_2$ , $^\circ\text{C}$ | $\Theta$ , $^\circ\text{C}$ |
|------------|--|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------------|
|            | 4200   |                          |            |                          |                             |

3. Воспользовавшись формулой, полученной в начале данной работы, вычислите удельную теплоемкость металла, из которого сделан цилиндр. Определите по справочнику, что это за металл.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА В ГАЗЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

*Оборудование:* прозрачная трубка с двумя кранами на концах, лента измерительная из набора «Газовые законы», термометр лабораторный, внешний стакан калориметра, сосуды с теплой и холодной водой.

### Указания к выполнению работы

1. Измерьте длину  $l_1$  воздушного столба в трубке (рис. 155, а).  
2. Закройте один кран и уложите трубку виток к витку во внешний стакан калориметра. Кран на верхнем конце оставьте открытым.

3. Заполните стакан теплой водой и поместите в него термометр.

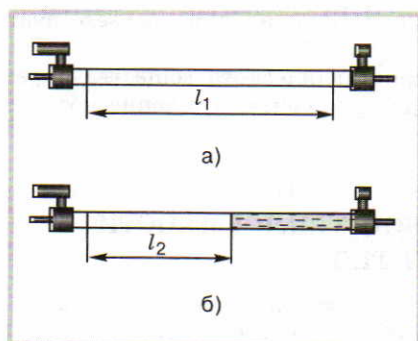


Рис. 155

7. Закройте кран, слейте воду, извлеките шланг из стакана, встряхните его и измерьте длину  $l_2$  столба воздуха в нем (рис. 155, б).
8. Переведите записанные показания термометра в градусах Цельсия в температуру по шкале Кельвина:  $T = t + 273$ .
9. Вычислите отношения  $l_1/T_1$  и  $l_2/T_2$ .
10. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

| $l_1$ , м | $t_1$ , °С | $T_1$ , К | $l_2$ , м | $t_2$ , °С | $T_2$ , К | $l_1/T_1$ | $l_2/T_2$ |
|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
|           |            |           |           |            |           |           |           |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНА БОЙЛЯ—МАРИОТТА

*Оборудование:* мензурка с водой комнатной температуры, линейка, узкая стеклянная трубка, закрытая с одного конца.

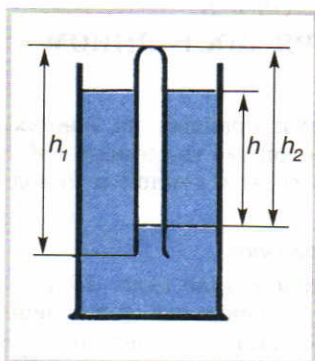


Рис. 156

*Указания к выполнению работы*

1. Решите задачу. Стеклянную трубку длиной  $h_1$  опустили в мензурку с водой закрытым концом вверх; проникшая в трубку вода сжала имеющийся там столб воздуха до длины  $h_2$ . Чему равно атмосферное давление, если трубка была погружена на глубину  $h$  (рис. 156)?

2. Измерьте значения величин, необходимых для определения атмосферного давления. Результаты измерений занесите в таблицу.



|           |           |         |                              |
|-----------|-----------|---------|------------------------------|
| $h_1$ , м | $h_2$ , м | $h$ , м | $\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup> |
|           |           |         | 1000                         |

3. Воспользовавшись формулой, полученной в начале данной работы, вычислите атмосферное давление.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

*Оборудование:* термометр лабораторный, стакан химический, сосуд с водой комнатной температуры, сосуд с кусочками льда, кусок ткани, нить, таблица «Давление насыщенного водяного пара при различных температурах», психометрическая таблица.

### Указания к выполнению работы

Опыт 1. Измерение относительной влажности воздуха с помощью модели конденсационного гигрометра.

1. Измерьте температуру  $t$  воздуха в помещении.

2. Определите по таблице «Давление насыщенного водяного пара при различных температурах» давление насыщенного пара  $p_n$ , соответствующее этой температуре.

### Давление насыщенного водяного пара (Па) при различных температурах (°C)

| Температура | Давление | Температура | Давление |
|-------------|----------|-------------|----------|
| 0           | 611      | 10          | 1227     |
| 1           | 653      | 11          | 1307     |
| 2           | 707      | 12          | 1400     |
| 3           | 760      | 13          | 1493     |
| 4           | 813      | 14          | 1600     |
| 5           | 880      | 15          | 1707     |
| 6           | 933      | 16          | 1813     |
| 7           | 1000     | 17          | 1933     |
| 8           | 1067     | 18          | 2067     |
| 9           | 1147     | 19          | 2200     |
| 20          | 2333     | 26          | 3360     |
| 21          | 2493     | 27          | 3560     |

| Температура | Давление | Температура | Давление |
|-------------|----------|-------------|----------|
| 22          | 2640     | 28          | 3787     |
| 23          | 2813     | 29          | 4000     |
| 24          | 2987     | 30          | 4240     |
| 25          | 3173     |             |          |

3. стакан, наполовину заполненный водой комнатной температуры, поставьте так, чтобы на его стенке был хорошо заметен блик света. Поместите в стакан термометр и несколько кусочков льда.

4. Наблюдайте за бликом на поверхности стакана и отметьте момент, когда блик потускнеет из-за появления конденсата водяного пара. Измерьте температуру  $t_p$  воды в стакане.

5. Определите по таблице давление насыщенного пара  $p_{н,р}$ , которое соответствует этой температуре. Так как давление  $p$  водяного пара в воздухе при проведении опыта не изменилось, можно утверждать, что  $p_{н,р} = p$ .

6. Вычислите относительную влажность  $\varphi$  воздуха:  $\varphi = (p/p_{н}) \times 100\%$ .

Опыт 2. Измерение относительной влажности воздуха с помощью модели психрометра.

1. Измерьте температуру  $t$  воздуха в помещении.

2. Опустите термометр в воду и убедитесь, что она имеет комнатную температуру.

3. Оберните резервуар термометра со спиртом куском ткани и закрепите его нитью.

4. Смочите ткань водой и наблюдайте за изменениями показаний термометра. Запишите его показание  $t_{вл}$  в тот момент, когда столбик спирта перестанет опускаться.

5. Вычислите разность  $\Delta t$  показаний сухого и влажного термометров и, воспользовавшись психрометрической таблицей, определите относительную влажность  $\varphi$  воздуха в классе.

6. При наличии в кабинете психрометра определите с его помощью относительную влажность воздуха. Сравните результаты, полученные в опытах 1 и 2, со значением относительной влажности, определенной психрометром. Укажите, какой из двух опробованных способов дает более точные результаты.



Психрометрическая таблица

| $t$ (показания<br>сухого<br>термометра,<br>°C) | $t - t_1$ (разность показаний сухого<br>и влажного термометров, °C) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|  | 0   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
|  | Относительная влажность, %  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 0  | 100   | 81 | 63 | 45 | 28 | 11 |    |    |    |    |    |    |
| 1  | 100   | 83 | 65 | 48 | 32 | 16 |    |    |    |    |    |    |
| 2  | 100   | 84 | 68 | 51 | 35 | 20 |    |    |    |    |    |    |
| 3  | 100   | 84 | 69 | 54 | 39 | 24 | 10 |    |    |    |    |    |
| 4  | 100   | 85 | 70 | 56 | 42 | 28 | 14 |    |    |    |    |    |
| 5  | 100   | 86 | 72 | 58 | 45 | 32 | 19 | 6  |    |    |    |    |
| 6  | 100   | 86 | 73 | 60 | 47 | 35 | 23 | 10 |    |    |    |    |
| 7  | 100   | 87 | 74 | 61 | 49 | 37 | 26 | 14 |    |    |    |    |
| 8  | 100   | 87 | 75 | 63 | 51 | 40 | 29 | 18 | 7  |    |    |    |
| 9  | 100   | 88 | 76 | 64 | 53 | 42 | 31 | 21 | 11 |    |    |    |
| 10   | 100   | 88 | 76 | 65 | 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 5  |    |    |
| 11   | 100   | 88 | 77 | 66 | 56 | 46 | 36 | 26 | 17 | 8  |    |    |
| 12   | 100   | 89 | 78 | 68 | 57 | 48 | 38 | 29 | 20 | 11 |    |    |
| 13   | 100   | 89 | 79 | 69 | 59 | 49 | 40 | 31 | 23 | 14 | 6  |    |
| 14   | 100   | 89 | 79 | 70 | 60 | 51 | 42 | 34 | 25 | 17 | 9  |    |
| 15   | 100   | 90 | 80 | 71 | 61 | 52 | 44 | 36 | 27 | 20 | 12 | 5  |
| 16   | 100   | 90 | 81 | 71 | 62 | 54 | 46 | 37 | 30 | 22 | 15 | 8  |
| 17   | 100   | 90 | 81 | 72 | 64 | 55 | 47 | 39 | 32 | 24 | 17 | 10 |
| 18   | 100   | 91 | 82 | 73 | 65 | 56 | 49 | 41 | 34 | 27 | 20 | 13 |
| 19   | 100   | 91 | 82 | 74 | 65 | 58 | 50 | 43 | 35 | 29 | 22 | 15 |
| 20   | 100   | 91 | 83 | 74 | 66 | 59 | 51 | 44 | 37 | 30 | 24 | 18 |
| 21   | 100   | 91 | 83 | 75 | 67 | 60 | 52 | 46 | 39 | 32 | 26 | 20 |
| 22   | 100   | 92 | 83 | 76 | 68 | 61 | 54 | 47 | 40 | 34 | 28 | 22 |
| 23   | 100   | 92 | 84 | 76 | 69 | 61 | 55 | 48 | 42 | 36 | 30 | 24 |
| 24   | 100   | 92 | 84 | 77 | 69 | 62 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 |
| 25   | 100   | 92 | 84 | 77 | 70 | 63 | 57 | 50 | 44 | 38 | 33 | 27 |
| 26   | 100   | 92 | 85 | 78 | 71 | 64 | 58 | 51 | 46 | 40 | 34 | 29 |
| 27   | 100   | 92 | 85 | 78 | 71 | 65 | 59 | 52 | 47 | 41 | 36 | 30 |
| 28   | 100   | 93 | 85 | 78 | 72 | 65 | 59 | 53 | 48 | 42 | 37 | 32 |
| 29   | 100   | 93 | 86 | 79 | 72 | 66 | 60 | 54 | 49 | 43 | 38 | 33 |
| 30   | 100   | 93 | 86 | 79 | 73 | 67 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 | 34 |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9 ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

**Оборудование:** фотография треков, оставленных двумя заряженными частицами в камере Вильсона (рис. 157), линейка, калька.

*Указания к выполнению работы*

1. Решите задачу. В поперечное однородное магнитное поле с одной и той же скоростью в одном и том же направлении влетают две заряженные частицы. Чему равно отношение удельных зарядов этих частиц, если радиусы кривизны их траекторий оказались равными  $R_1$  и  $R_2$ ?

2. Положите на фотографию лист прозрачной бумаги (кальку) и переведите на нее изображения треков.

3. Проведите на кальке хорды начальных участков треков, как это показано на рисунке 158. Измерьте высоту  $h$  и длину  $l$  хорды для каждого трека. Воспользовавшись формулой

$$R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}, \quad (1)$$

определите радиусы  $R_1$  и  $R_2$  кривизны треков на их начальных участках.

4. Воспользовавшись формулой, полученной в начале данной работы, найдите отношение удельного заряда неизвестной частицы (оставившей трек 2) к удельному заряду протона (оставившего трек 1).

5. Сравнив полученный результат с данными, приведенными в таблице, определите, какой именно частице принадлежит трек 2.

| Отношение                 | Позитрон | Тритон | Альфа-частица | Пи-мезон |
|---------------------------|----------|--------|---------------|----------|
| $\frac{q_2/m_2}{q_1/m_1}$ | 1836     | 0,33   | 0,5           | 9        |

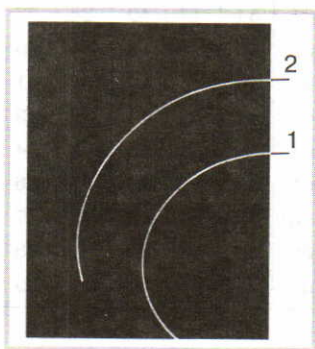


Рис. 157

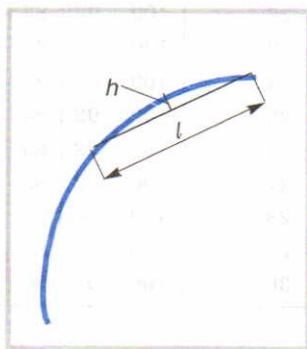


Рис. 158



6. Ответьте на вопросы: а) как направлена индукция магнитного поля, в котором двигались данные частицы, по отношению к плоскости фотографии; б) почему радиус кривизны трека у каждой частицы на начальном участке больше, чем на конечном?

7. Выведите формулу (1).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10 ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

*Оборудование:* дозиметр бытовой, инструкция по его использованию.

### *Указания к выполнению работы*

1. Внимательно изучите инструкцию по работе с дозиметром и определите:

каков порядок подготовки его к работе;

какие виды ионизирующих излучений он измеряет;

в каких единицах регистрирует прибор мощность дозы излучения;

какова длительность цикла измерения;

каковы границы абсолютной погрешности измерения;

каков порядок контроля и замены внутреннего источника питания;

каково расположение и назначение органов управления работой прибора.

2. Произведите внешний осмотр прибора и его пробное включение.

3. Убедитесь, что дозиметр находится в рабочем состоянии.

4. Подготовьте прибор для измерения мощности дозы излучения.

5. Измерьте 8—10 раз уровень радиационного фона, записывая каждый раз показание дозиметра.

6. Вычислите среднее значение радиационного фона.

7. Вычислите, какую дозу ионизирующих излучений получит человек в течение года, если среднее значение радиационного фона на протяжении года изменяться не будет. Сопоставьте ее значение со значением, безопасным для здоровья человека.

8. Сравните полученное среднее значение фона с естественным радиационным фоном, принятым за норму, — 0,15 мкЗв/ч.

## ОТВЕТЫ

1.  $\gamma_1 = 30^\circ$ ;  $\gamma_2 = 60^\circ$ . 2.  $75^\circ$ . 3.  $l = RH/h$ . 4.  $90^\circ$ . 5.  $h = H/2$ . 7.  $\alpha = \text{arctg}(n_2/n_1)$ .
8. 1,33. 10.  $h = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}\right) d \sin \alpha$ . 12.  $l = h \left(\text{tg} \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}\right)$ .
14.  $\sin \alpha'_0 = 1,36 \sin \alpha_0$ . 17.  $r = R - \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}$ . 18.  $R = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}$ . 19.  $n = \frac{\sin[(\delta + \varphi)/2]}{\sin(\varphi/2)} = \sqrt{\frac{1 - \cos(\delta + \varphi)}{1 - \cos \varphi}}$ . 20.  $14^\circ 30'$ . 21. 1,3; 224 400 км/с. 22. 538 нм.
25.  $v = 0,21$  с. 26. 550 нм. 27. Усиление света. 28. Ослабление света.
29. 4. 30. 500. 35. 2,8 см. 40. 17,5 см. 41.  $h' = \frac{F}{d-F} h$ . 42.  $d = \left(1 + \frac{h}{h'}\right) F$ .
43.  $F = \frac{l^2 - a^2}{4l}$ . 44.  $d_2 - d_1 = 25$  см. 45.  $F = \frac{\Gamma l}{(\Gamma - 1)^2}$ . 46.  $h' = (F/a)h$ . 47.  $\Gamma' = \frac{\Gamma}{2\Gamma - 1}$ . 48.  $\Gamma' = \frac{2\Gamma}{\Gamma - 1}$ . 49.  $\Gamma = 0,25$ . 50. 68 см. 51.  $D_2 = -5$  дп. 52. 8 дп.
54.  $d_0 = 50$  см. 55.  $3,96 \cdot 10^{-19}$  Дж. 56. 606 ТГц. 57.  $1,76 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с. 58. 660 нм;  $3 \cdot 10^{-19}$  Дж. 59.  $8,8 \cdot 10^{-36}$  кг. 60.  $4,7 \cdot 10^{-36}$  кг. 61.  $3,6 \cdot 10^{20}$ . 62. 300 ТГц. 64.  $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. 65.  $1,1 \cdot 10^{-19}$  Дж. 66. 600 км/с.
68. 4,3 эВ. 69. 95 нм. 70.  $v_0 = v - \frac{mv^2}{2h}$ . 71.  $h = \frac{e(U_1 - U_2)}{v_1 - v_2}$ . 72. 305 нм.
73. а)  $M_r = 32$ ;  $M = 0,032$  кг/моль. 74. в)  $M_r = 56$ ;  $M = 0,056$  кг/моль.
75.  $3,3 \cdot 10^{-25}$  кг. 77. 200 моль. 78. 2 кг. 79.  $6 \cdot 10^{24}$ . 80.  $6 \cdot 10^{23}$ .
81.  $6,7 \cdot 10^{17}$ . 82. 19 сут. 83. 3,1 м<sup>2</sup>. 84.  $2,6 \cdot 10^{-10}$  м. Д1. 2,7 мм;  $5 \cdot 10^{-4}$ . Д2. 1 м. Д3. 23 мм; 0,6 мм. Д4. 2,5 мм<sup>2</sup>. Д5. 0,5 м. Д6. 7 см; 0,7 см. Д7.  $2,3 \cdot 10^{-2}$  г. Д8.  $1,37 \cdot 10^{-5}$  Дж. 85.  $6,7 \cdot 10^{-21}$  Дж.
86.  $3,3 \cdot 10^{26}$ . 87. 100 кПа. 88. 20 кДж; -20 кДж. 89. -0,4 МДж; 0,2 МДж; 25 кДж. 90. 0,2 МДж; -0,2 МДж; 0,1 МДж.
91.  $A = \left(P_0 + \frac{mg}{S}\right) Sh$ . 92. 2 кг. 94.  $Q = -\frac{M}{M+m} \frac{mv^2}{2}$ . 95. -92 Дж.
96. -225 МДж. 97.  $Q = -\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{v_1^2 + v_2^2}{2}$ . 98.  $\Delta U = \frac{m}{2} (v_1^2 - v_2^2 - \frac{m}{M} (v_1 - v_2)^2)$ . 99.  $Q = -m(c_{в1} t_1 + \lambda_{л} - c_{л} t_2)$ . 100. 300 094 Дж. 102. -19 °С.
103. 2,17 кДж/(кг·°С). 104. 698 °С. 106. Смесь 2,23 кг воды и 3,77 кг льда при 0 °С. 107. 0,1 кг. 108. 88,2 °С. 109. 9,9 г. 110. 305,3 кДж/°С.
111. 0,01 °С. 112. 8,4 м. 113.  $\Delta m/m = 0,07$ . 114. 120 °С. 115.  $q = \frac{Ns}{\eta mv}$ .
116. 2,1 г. 117. 69 м. 118.  $\Delta m = 54$  г. 119. 5 МДж. 120. -1 МДж.
121. 393 Дж. 122. 500 Дж. 123.  $Q_2 = -1,2$  МДж;  $A = 0,3$  МДж.
124. 2,15. 125. 11,8 кДж. 126. 145,6 °С; -7 кДж. 127. 44%. 128. 20%; 500 Дж. 129. 9,3 кДж. 130. 19,3 кДж. 131.  $2,67 \cdot 10^{-21}$  Дж.
132. 27 °С. 133. 517 м/с. 134. 0,5%. 135. 15 кДж. 136. 2,27 кПа. 137.  $2,4 \cdot 10^4$ . 138.  $4,8 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>. 139. 4 моль. 140. 8,2 МПа.



141.  $1,96 \cdot \text{кг/м}^3$ . 142.  $-16^\circ\text{C}$ . 144.  $4,77 \text{ г/моль}$ . 146.  $100 \text{ кПа}$ .  
 147.  $p_1/p_2=1,7$ . 148.  $100 \text{ кПа}$ . 149.  $-23^\circ\text{C}$ . 150.  $V_2/V_1=1,6$ . 151.  $9,4 \text{ л}$ .  
 152.  $51 \text{ кПа}$ . 154.  $r = \frac{3\rho RT}{p(M_1 - M_2)}$ . 155.  $97 \text{ кПа}$ . 156.  $490 \text{ см}^3$ .  
 157.  $V_1/V_2=1,45$ . 158.  $\Delta t = 273^\circ\text{C}$ . 159.  $27^\circ\text{C}$ . 160.  $273 \text{ кПа}$ . 169.  $A =$   
 $= \nu R (\sqrt{T_3} - \sqrt{T_1})^2$ . 171.  $\Delta t = 5 \text{ К}$ . 172.  $8,3 \text{ л}$ . 173.  $13,4 \text{ кДж}$ . 174.  $-3 \text{ кДж}$ .  
 175.  $2 \text{ г/моль}$ . 176.  $A = \frac{n-1}{n} \frac{m}{M} RT_1$ . 177.  $22\%$ . 178.  $2,5 \text{ кДж}$ .  
 179.  $Q = 6,5 p_1 V_1$ . 180.  $15\%$ . 182.  $567 \text{ кПа}$ . 183.  $p = \frac{2p_1 p_2}{p_1 + p_2}$ . 184.  $\rho = \frac{p}{RT} \times$   
 $\times \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1/M_1 + m_2/M_2} \right)$ . 185.  $44,4 \text{ кПа}$ . 186.  $1,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . 187.  $2 \cdot 10^{24}$ .  
 188.  $707 \text{ м/с}$ . 189.  $112,5 \text{ кПа}$ . 190.  $p_2/p_1 = 1,49$ . 191.  $6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ .  
 192.  $500 \text{ кПа}$ ;  $0,26 \text{ кг/м}^3$ . 193.  $0,4 \text{ Н}$ . 194.  $10 \text{ м}$ . 195.  $h = \frac{7p}{\rho g}$ .  
 196.  $\Delta T = \frac{FT_1}{p_1 S}$ . 198. б)  $l_2 = \frac{\rho l_1}{\rho_1 + \rho g h \sin \alpha}$ . 199.  $750 \text{ мм рт. ст.}$ . 200.  $375 \text{ мм рт. ст.}$ .  
 201.  $50\%$ . 202.  $1,4 \text{ кПа}$ . 205.  $3,2 \cdot 10^{24}$ . 206.  $1 \text{ кг}$ . 207.  $\varphi = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{V_1 + V_2}$ .  
 208.  $0,45$ . 209.  $Z = 79$ ;  $q = 12,6 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$ . 210.  $8 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$ . 211.  $10$ .  
 212.  $9,6 \cdot 10^{23}$ . 213.  $E_2 = -3,4 \text{ эВ}$ . 214.  $n = 3$ . 215.  $2,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ . 216.  $650 \text{ нм}$ .  
 218.  $250 \text{ нм}$ . 219.  $1,5 \cdot 10^{-16} \text{ с}$ ;  $6,7 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ . 220.  $v_1/v_3 = 3$ ;  $r_3/r_1 = 9$ .  
 221.  $3 \cdot 10^{-14} \text{ м}$ . 222.  $\lambda_1 = 1,8 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_2 = 0,65 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_3 = 0,48 \text{ мкм}$ .  
 225.  $0,0091 \text{ а.е.м.}$ . 226.  $0,00239 \text{ а.е.м.}$ . 227.  $37,7 \text{ МэВ}$ . 228.  $6,03 \text{ МэВ}$ .  
 236.  $n_\alpha = 8$ ;  $n_\beta = 6$ . 237.  $N_0/N = 16$ . 238.  $2 \text{ с}$ . 239.  $0,29$ . 240.  $6,25\%$ .  
 241.  $1 \text{ мин}$ . 242. 32. 243.  $2,25 \cdot 10^9 \text{ лет}$ . 244.  $4,5 \cdot 10^9 \text{ лет}$ .  
 245.  ${}^4_2\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_0\text{n}$ . 251.  $15 \text{ МэВ}$ . 252.  $-2,8 \text{ МэВ}$ .  
 253.  $t = \frac{0,1 m N_A Q_1}{MP}$ . 254.  $3,86 \text{ кг}$ . 255.  $31 \text{ г}$ . 256.  $52 \text{ МВт}$ .  
 269.  $\approx 147 \cdot 10^6 \text{ км}$ ;  $\approx 152 \cdot 10^6 \text{ км}$ . 270.  $250 \text{ лет}$ . 271. Диаметр этого  
 пятна примерно в 7 раз больше земного. 272. Примерно в 14 раз.  
 273.  $4664 \text{ км}$  от центра Земли, т. е. внутри ее. 274.  $54 \text{ земных ради-$   
 $\text{уса}$ . 275. Примерно в триллион ( $10^{12}$ ) раз. 276.  $\approx 260 \text{ св. лет}$ .  
 277.  $57 \text{ км/с}$ . 278.  $9 \text{ мм}$ ;  $3 \text{ км}$ . 279.  $\approx 4600000 \text{ лет}$ . 280.  $\approx 12 \text{ млрд лет}$ ;  
 $\approx 0,9 \text{ с}$ ;  $\approx 270000 \text{ км/с}$ .

**Основные формулы**

**Оптика**

Закон преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Предельный угол полного отражения

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Условие интерференционного максимума

$$\Delta\varphi = 0, \pm 2\pi, \dots = 2\pi n$$

Условие интерференционного минимума

$$\Delta\varphi = \pm \pi, \pm 3\pi, \dots = (2n + 1)\pi$$

Формула дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = n\lambda$$

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}$$

Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

Энергия кванта (фотона)

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

Импульс фотона

$$p = \frac{\varepsilon}{c}$$

Длина волны фотона (в вакууме)

$$\lambda = c/\nu$$

Скорость света в веществе

$$v = c/n$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3$$

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = A_{\text{вых}}/h \text{ или } \lambda_0 = c/\nu_0 = ch/A_{\text{вых}}$$

**Молекулярная физика**

Молярная масса

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Количество вещества

$$\nu = N/N_A = m/M$$

Масса молекулы

$$m_0 = M/N_A$$

Число частиц в теле

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

$$U = N\bar{E}_k = \frac{3}{2}\nu RT$$

Работа газа при  $p = \text{const}$

$$A = p(V_2 - V_1)$$

Количество теплоты, необходимое для:

а) нагревания

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$



## Основные формулы

|   |   |
|---|---|
| б) плавления  | $Q = \lambda m$   |
| в) парообразования  | $Q = rm$  |
| Первый закон термодинамики  | $\Delta U = Q + A_{\text{внеш}}$                            |
| Абсолютная температура  | $T = t + 273$   |
| КПД теплового двигателя   | $\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{ Q_2 }{Q_1}$              |
| КПД цикла Карно   | $\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$                   |
| Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной частицы | $\bar{E}_k = \frac{m_0 v_T^2}{2} = \frac{3}{2} kT$          |
| Давление идеального газа  | $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k = nkT$                         |
| Основное уравнение МКТ идеального газа                              | $p = \frac{1}{3} n m_0 v_T^2$                               |
| Концентрация молекул  | $n = N/V$   |
| Уравнение Клапейрона (при $m = \text{const}$ )                      | $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$                        |
| Первый газовый закон (при $m, T = \text{const}$ )                   | $pV = p_0 V_0$  |
| Второй газовый закон (при $m, V = \text{const}$ )                   | $\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}$                             |
| Третий газовый закон (при $m, p = \text{const}$ )                   | $\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$                             |
| Уравнение Менделеева—Клапейрона                                     | $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R$                              |
| Абсолютная влажность воздуха  | $\varphi_{\text{абс}} = \frac{m}{V} \text{ (г/м}^3\text{)}$ |
| Относительная влажность воздуха                                     | $\varphi = \frac{p(t)}{p_0(t)} \cdot 100\%$                 |
| Парциальное давление водяного пара                                  | $p(t) = p_0(t_p)$   |
| Плотность вещества  | $\rho = \frac{m}{V}$  |
| <b>Строение атома и ядра. Элементарные частицы</b>                  |   |
| Энергия атома водорода  | $E_n = -\frac{Ry}{n^2}$                                     |
| Ридберг   | $1 Ry = 13,6 \text{ эВ}$                                    |
| Электронвольт   | $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$              |

## Основные формулы

Энергия фотона, излучаемого или поглощаемого атомом

$$h\nu = |E_{n_2} - E_{n_1}|$$

Массовое число ядра

$$A = Z + N$$

Заряд атомного ядра

$$q = Ze$$

Дефект массы ядра

$$\Delta M = ZM_{\text{H}} + Nm_n - M_{\text{ат}}$$

Энергия связи ядра

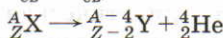
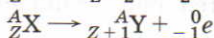
$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2$$

Квадрат скорости света

$$c^2 = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.}$$

Удельная энергия связи ядра

$$\varepsilon_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A$$

Уравнение  $\alpha$ -распадаУравнение  $\beta$ -распада

Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 2^{-t/T}$$

Энергетический выход ядерной реакции ( $a + b \rightarrow c + d$ )

$$Q = (m_a + m_b - m_c - m_d)c^2$$

Барионный заряд

$$B = \begin{cases} +1 & \text{— для барионов} \\ -1 & \text{— для антибарионов} \\ 0 & \text{— для остальных частиц} \end{cases}$$

Лептонный заряд

$$L = \begin{cases} +1 & \text{— для лептонов} \\ -1 & \text{— для антилептонов} \\ 0 & \text{— для остальных частиц} \end{cases}$$

Странность

$$S = 2\bar{Q} - B$$



# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аберрации 50  
Абсолютная температура 137  
Абсолютный нуль температуры 141  
Агрегатные состояния вещества 98  
Адиабатный процесс 123  
Адроны 240  
Активность 216  
Альфа-распад 212  
Аморфные тела 101  
Анизотропия 101  
Аннигиляция 247  
Античастицы 243  
Атмосфера 170  
Атмосферное давление 170  
Атом 92  
Атомная бомба 230
- Барийонный заряд 242  
Бариионы 242  
Бета-распад 212  
Броуновское движение 95
- Вечный двигатель 125  
Вионы 240  
Влажность воздуха  
— абсолютная 172  
— относительная 173  
Внутренняя энергия 116  
Водородная бомба 235  
Водородоподобные ионы 189  
Возбужденное состояние 184  
Второй закон термодинамики 129  
Вынужденное излучение 190
- Газовые законы:  
— первый 160  
— второй 162  
— третий 163
- Гамма-излучение 210  
Гигрометр 173
- Главное квантовое число 184  
Глюоны 241  
Гравитон 241
- Давление 166  
Детекторы частиц 220  
Дефект массы 208  
Диоптрия 46  
Дисперсия света 21  
Дифракционная решетка 41  
Дифракция света 39  
Диффузия 95  
Длина волны де Бройля 86
- Естественный свет 5
- Закон Авогадро 158  
— Бойля—Мариотта 161  
— Дальтона 158  
— Джоуля 153  
— Кеплера 253  
— отражения света 8  
— преломления света 11  
— радиоактивного распада 215
- Законы фотоэффекта  
— первый 73  
— второй 74  
— третий 75
- Идеальный газ 99, 152  
Изобара 164  
Изобарный процесс 163  
Изображение 47  
Изомультиплет 242  
Изотерма 161  
Изотермический процесс 160  
Изотопная хронология 216  
Изотопы 204  
Изохора 162  
Изохорный процесс 162  
Интерференция света 31  
Инфракрасное излучение 56  
Ионизирующее излучение 237

- Камера Вильсона 220  
 Квазистатический процесс 120  
 Квант света 65  
   — энергии 65  
 Кварки 241  
 Кельвин 137  
 Количество теплоты 121  
 Кольца Ньютона 36  
 Корпускула 81  
 Корпускулярно-волновой дуализм 81  
 Коэффициент отражения света 8  
   — размножения нейтронов 225  
 КПД теплового двигателя 146  
 Красная граница фотоэффекта 75  
 Кристаллы 101  
 Критическая масса 225
- Лазер 191  
 Лептонный заряд 213  
 Лептоны 213, 241  
 Линейчатые спектры 185  
 Линза 44  
 Лучевая скорость 29
- Макроскопические параметры 111  
 Массовое число 202  
 Мезоны 242  
 Механическое напряжение 104  
 Молекула 92  
 Молекулярный хаос 113  
 Моль 92  
 Монохроматическое излучение 22  
 Мюон 189  
 Мюоний 189  
 Мюонный атом 189
- Насыщенный пар 172  
 Нейтрино 213  
 Нейтрон 203  
 Нуклоны 203
- Общее начало термодинамики 112
- Объединенный газовый закон 159  
 Оптическая сила линзы 46  
 Основное состояние 184  
   — уравнение МКТ идеального газа 167  
 Основные положения МКТ 84
- Парциальное давление 158  
 Первый закон термодинамики 123  
 Период полураспада 215  
 Пи-мезоны 205  
 Плоскопараллельная пластинка 12  
 Поверхностное натяжение 106  
 Позитрон 244  
 Показатель преломления  
   — абсолютный 11  
   — относительный 11  
 Полное отражение света 14  
 Поляризация света 5  
 Постулаты Бора 183  
 Принцип  
   — Гюйгенса 40  
   — Гюйгенса—Френеля 40  
   — комбинированной симметрии 245  
   — обратимости световых лучей 14  
   — Ферма 3  
 Промежуточные бозоны 240  
 Протон 203  
 Психрометр 174  
 Пузырьковая камера 220
- Работа газа 120  
 Радиоактивность 210  
 Распределение Гиббса 117  
 Распределение Максвелла 100  
 Резонансы 242  
 Релаксация 112  
 Рентгеновское излучение 59
- Сверхтекучесть 142  
 Свет 4  
 Световой луч 44



- Сильное взаимодействие 207  
Скорость света 16  
Слабое взаимодействие 214  
Соотношение неопределенностей 199  
Спектр  
— излучения 25  
— линейчатый 25  
— непрерывный 26  
— поглощения 26  
— полосатый 26  
Спектральный анализ 27  
Спектрограф 25  
Спектроскоп 25  
Средняя квадратичная скорость 100, 154  
Странность 248  
Счетчик Гейгера 220
- Температура 134  
Тепловая скорость 154  
Тепловое равновесие 112  
Тепловой двигатель 145  
Теплообмен 120  
Термический коэффициент объемного расширения 139  
Термодинамическая температура 137  
Термоядерные реакции 234  
Точка росы 173  
Третий закон термодинамики 141
- Увеличение линзы 49  
Удельная энергия связи 209  
Ультрафиолетовое излучение 57  
Уравнение Клапейрона 159  
— Менделеева—Клапейрона 158  
Уравнение состояния 156  
— Эйнштейна для фотоэффекта 75  
Условие наблюдения дифракции 40
- Фазовое пространство 113  
Флуктуации 169  
Фокус  
— главный 45  
— побочный 46  
Фокусное расстояние 46  
Формула тонкой линзы 47  
Фотон 67  
Фотоэлемент 70  
Фотоэффект 70  
Фундаментальные частицы 240
- Химические действия света 78
- Цепная реакция 224  
Цикл Карно 147
- Элементарные частицы 239  
Энергетический выход ядерной реакции 218  
Энергия связи ядра 207  
Энтропия 126  
Эффект Доплера 28  
— Комптона 79
- Ядерная модель атома 180  
Ядерные реакции 218  
— силы 205  
Ядерный реактор 226

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <b>ОПТИКА</b> . . . . .  | 3   |
| <b>Глава 1. Волновая и геометрическая оптика</b> . . . . .                   | 5   |
| § 1. Поляризация света . . . . .   | 5   |
| § 2. Отражение света . . . . .   | 7   |
| § 3. Преломление света . . . . .   | 10  |
| § 4. Скорость света . . . . .  | 16  |
| § 5. Дисперсия света. Цвета тел . . . . .                                    | 20  |
| § 6. Спектральный анализ . . . . .   | 24  |
| § 7. Эффект Доплера . . . . .  | 28  |
| § 8. Интерференция света (I) . . . . .                                       | 31  |
| § 9. Интерференция света (II) . . . . .                                      | 33  |
| § 10. Дифракция света . . . . .  | 38  |
| § 11. Геометрическая оптика. Линзы . . . . .                                 | 44  |
| § 12. Оптические явления в атмосфере . . . . .                               | 52  |
| § 13. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения . . . . .                    | 56  |
| § 14. Рентгеновское излучение . . . . .                                      | 59  |
| Итоги и обобщения . . . . .  | 61  |
| <b>Глава 2. Квантовая оптика</b> . . . . .                                   | 62  |
| § 15. Гипотеза Планка . . . . .  | 62  |
| § 16. Фотоны . . . . .   | 67  |
| § 17. Фотоэффект . . . . .   | 70  |
| § 18. Другие квантовые эффекты . . . . .                                     | 77  |
| § 19. Корпускулярно-волновой дуализм . . . . .                               | 81  |
| Итоги и обобщения . . . . .  | 88  |
| <b>ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА</b>                        | 89  |
| <b>Глава 3. Основные положения молекулярно-кинетической теории</b> . . . . . | 91  |
| § 20. Первое положение МКТ . . . . .   | 92  |
| § 21. Второе положение МКТ . . . . .   | 95  |
| § 22. Третье положение МКТ . . . . .   | 98  |
| § 23. Свойства твердых тел и жидкостей . . . . .                             | 103 |
| Итоги и обобщения . . . . .  | 108 |
| <b>Глава 4. Основы статистической термодинамики</b> . . . . .                | 111 |
| § 24. Фазовое пространство . . . . .   | 113 |
| § 25. Внутренняя энергия . . . . .   | 116 |
| § 26. Способы изменения внутренней энергии . . . . .                         | 118 |
| § 27. Первый закон термодинамики . . . . .                                   | 123 |
| § 28. Энтропия . . . . .   | 126 |
| § 29. Второй закон термодинамики . . . . .                                   | 129 |
| § 30. Температура . . . . .  | 134 |
| § 31. Третий закон термодинамики . . . . .                                   | 141 |



|   |            |
|---|------------|
| § 32. Тепловые двигатели . . . . .  | 145        |
| § 33. Тепловые машины и охрана окружающей среды . . . . .                     | 148        |
| <b>Глава 5. Идеальный газ . . . . .</b>                                       | <b>151</b> |
| § 34. Внутренняя энергия идеального газа . . . . .                            | 153        |
| § 35. Уравнение состояния идеального газа . . . . .                           | 156        |
| § 36. Изопроцессы в идеальном газе . . . . .                                  | 159        |
| § 37. Применение первого закона термодинамики к процессам<br>в газе . . . . . | 165        |
| § 38. Основное уравнение МКТ идеального газа . . . . .                        | 166        |
| <b>Глава 6. Физика атмосферы . . . . .</b>                                    | <b>169</b> |
| § 39. Атмосфера Земли . . . . .   | 170        |
| § 40. Влажность воздуха . . . . .   | 172        |
| § 41. Адиабатные процессы в атмосфере . . . . .                               | 175        |
| Итоги и обобщения . . . . .   | 177        |
| <b>Глава 7. Физика атома . . . . .</b>  | <b>178</b> |
| § 42. Ядерная модель строения атома . . . . .                                 | 179        |
| § 43. Постулаты Бора . . . . .  | 181        |
| § 44. Атом водорода . . . . .   | 186        |
| § 45. Вынужденное излучение . . . . .   | 190        |
| § 46. Возникновение квантовой механики . . . . .                              | 192        |
| § 47. Соотношение неопределенностей Гейзенберга . . . . .                     | 198        |
| <b>Глава 8. Атомное ядро . . . . .</b>  | <b>201</b> |
| § 48. Строение атомного ядра . . . . .  | 202        |
| § 49. Ядерные силы . . . . .  | 205        |
| § 50. Энергия связи и дефект массы ядра . . . . .                             | 207        |
| § 51. Радиоактивность . . . . .   | 210        |
| § 52. Закон радиоактивного распада . . . . .                                  | 215        |
| § 53. Ядерные реакции . . . . .   | 218        |
| § 54. Деление ядер урана . . . . .  | 221        |
| § 55. Цепная реакция деления . . . . .  | 224        |
| § 56. Ядерное оружие . . . . .  | 228        |
| § 57. Термоядерные реакции . . . . .  | 233        |
| § 58. Биологическое действие ионизирующих излучений . . . . .                 | 237        |
| <b>Глава 9. Элементарные частицы . . . . .</b>                                | <b>239</b> |
| § 59. Классификация элементарных частиц . . . . .                             | 239        |
| § 60. Античастицы . . . . .   | 243        |
| § 61. Превращения элементарных частиц . . . . .                               | 246        |
| <b>СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ . . . . .</b>   | <b>250</b> |
| § 62. Что такое астрономия . . . . .  | 250        |
| § 63. Строение Солнечной системы . . . . .                                    | 252        |
| § 64. Солнце . . . . .  | 256        |
| § 65. Планеты . . . . .   | 260        |
| § 66. Малые тела Солнечной системы . . . . .                                  | 264        |
| § 67. Звезды . . . . .  | 268        |
| § 68. Наша Галактика — Млечный Путь . . . . .                                 | 273        |

|   |     |
|---|-----|
| § 69. Наша Вселенная — Метагалактика . . . . .    | 275 |
| § 70. Большая Вселенная — Метавселенная . . . . . | 278 |
| Заключение . . . . .                              | 281 |
| Задачи и упражнения . . . . .                     | 283 |
| Лабораторные работы . . . . .                     | 315 |
| Ответы . . . . .                                  | 326 |
| Приложение . . . . .                              | 328 |
| Предметный указатель . . . . .                    | 331 |

Учебное издание

**Громов Сергей Васильевич**  
**Шаронова Наталия Викторовна**  
**Левитан Ефрем Павлович**

**ФИЗИКА**

*Оптика*

*Тепловые явления*

*Строение и свойства вещества*

*Строение Вселенной*

Учебник для 11 класса  
 общеобразовательных учреждений

Зав. редакцией *В. И. Егудин*

Редактор *Т. П. Каткова*

Младший редактор *Т. И. Данилова*

Художники *А. В. Щетинцева, В. В. Воробьев, Э. Н. Маланья*

Художественный редактор *Т. В. Морозова*

Технические редакторы *Н. Т. Рудникова, Е. Н. Зелянина*

Корректоры *О. Н. Леонова, Н. И. Новикова, А. В. Рудакова, Н. А. Смирнова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Сдано в набор 12.10.05. Подписано в печать 03.05.06. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 22,19+0,58 вкл.+0,45 форз. Тираж 25 000 экз. Заказ № 12874.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение». 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Открытое акционерное общество «Смоленский полиграфический комбинат». 214020, г. Смоленск, ул. Смольянинова, 1.