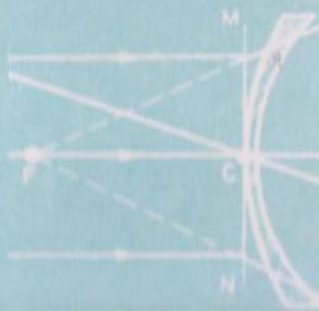
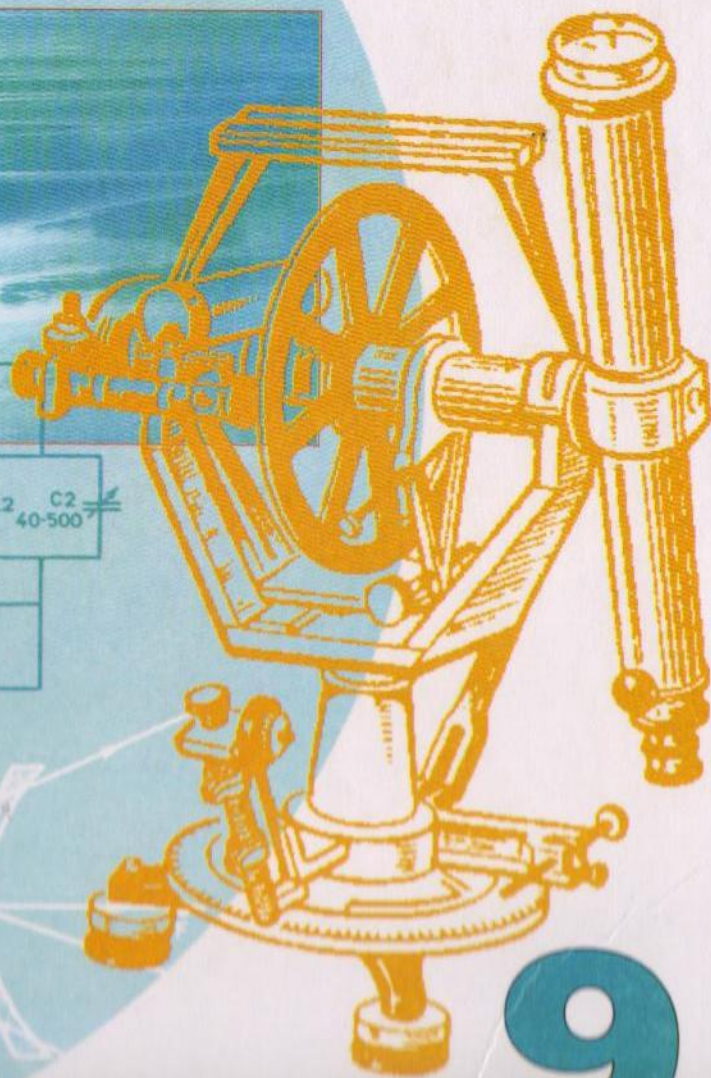
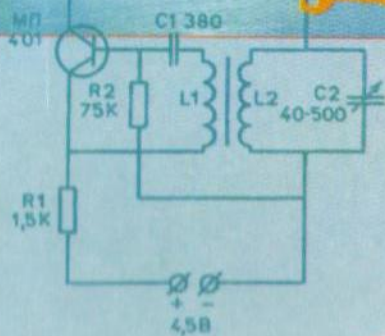


Физика



9

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Ф50

Авторы: А. А. Пинский, В. Г. Разумовский, А. И. Бугаев, Ю. И. Дик,
Г. Г. Никифоров, Е. К. Страут, С. Я. Шамаш, В. Ф. Шилов,
Э. Е. Эвенчик

Учебник разработан в Институте общего среднего
образования РАО

Физика: Учеб. для 9 кл. общеобразоват. учреждений /
Ф50 А. А. Пинский, В. Г. Разумовский, А. И. Бугаев и др.; Под ред.
А. А. Пинского, В. Г. Разумовского. — 4-е изд. — М.: Просвещение,
2003. — 303 с.: ил. — ISBN 5-09-011978-3.

Третье издание выходило под названием «Физика и астро-
номия».

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 5-09-011978-3

© Издательство «Просвещение», 2000
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2000
Все права защищены

ВВЕДЕНИЕ

В этом году вы завершите изучение курса физики девятилетней школы. Трехлетняя работа над ним даст возможность выработать достаточно ясное представление о строении и свойствах окружающего нас мира, его основных закономерностях. Вместе с тем вы ознакомитесь с научными методами изучения физики и астрономии, основными физическими теориями и их применением, узнаете роль физического эксперимента в развитии науки и техники. Конечно, на этом изучение физики и астрономии нельзя считать завершённым. Фактически вы ознакомитесь лишь с началами сложных, но тем не менее увлекательных наук. Многие из вас смогут углубить свои знания в этой области в старших классах средней школы и в высших учебных заведениях.

Данный учебник познакомит вас с механическими колебаниями и волнами, что позволит объяснить особенности звуковых явлений, а также понять, каким образом определяют местонахождение эпицентра землетрясения. Здесь же вы узнаете многое об электромагнитных колебаниях и волнах, объясняющих существование радиовещания и телевидения, и великих открытиях в астрономии. Свойства света объяснят особенности видимого и невидимого излучений, происхождение солнечных и лунных затмений, поведение света на границе раздела двух сред.

Вы поймете, почему возникает радуга, и научитесь с помощью анализа света определять химический состав вещества, в частности состав Солнца и звезд.

Интерес представит изучение оптических приборов: лупы и очков (простейшие приборы), телескопа, микроскопа, фотоаппарата (более сложные приборы), а также проекционной аппаратуры.

Кроме того, вы изучите основные законы механики (законы Ньютона) и ознакомитесь с их применением для объяснения движения тел на Земле и в космосе, в частности движения планет. Узнаете, как с помощью законов Ньютона были открыты восьмая и девятая планеты Солнечной системы — Нептун и Плутон, каким способом определяют массы небесных тел и расстояния до них.

В VIII классе вы ознакомились со строением атома и распределением электронов в атомах различных химических элементов, а теперь ознакомитесь с особенностями поведения электронов в атомах и строением атомного ядра, что объясняет принцип ядерной энергетики и появление энергии излучения Солнца и звезд.

Наконец, вы ознакомитесь со строением Вселенной, с галактиками (огромные звездные скопления), теорией возникновения и развития звезд, а также с теорией эволюции Вселенной.

Изучение всех этих явлений дает возможность понять строение окружающего нас мира не только вокруг Земли, но и во всей Солнечной системе и даже за ее пределами. Вы убедились в мощи человеческого разума, сумевшего проникнуть как в тайны микромира — мира атома, атомного ядра и элементарных частиц, так и в тайны мегамира — сначала Солнечной системы, а затем и звезд, галактик и всей Вселенной. Все это стало осуществимо благодаря методам, с помощью которых физики познают закономерности природы и используют полученные знания для решения возникающих перед человечеством проблем: технических, технологических, экологических и информационных.

СОВЕТЫ ЮНЫМ ЧИТАТЕЛЯМ

В предыдущие два года вы убедились, что изучение физики и астрономии требует серьезных усилий и систематической работы, научились экспериментировать, т. е. работать с физическими приборами. Сейчас вы приступаете к изучению завершающих разделов данного курса.

Напомним некоторые рекомендации, которые помогут вам при работе с учебником.

В учебнике не весь материал является обязательным для изучения. В нем имеется материал в виде параграфа или отдельной части от параграфа, предназначенный лишь для тех учащихся, которые хотят углубить свои знания в области физики и астрономии. Этот материал отмечен сбоку цветной чертой.

Не пытайтесь заучивать текст учебника. Это невозможно, да и не нужно. Надо постараться понять суть изучаемого материала, а затем изложить его своими словами. Также необходимо научиться применять его на практике.

При воспроизведении определений понятий и законов формулировки должны быть достаточно точными. Поэтому запишите свои формулировки и сравните их с текстом. Выясните, чем они отличаются от текста и допустимы ли изменения, которые внесли вы, не изменили ли они смысл понятия или закона.

Прочитав текст параграфа, постарайтесь ответить на вопросы для самопроверки. Если вы ответили на все вопросы, то это значит, что материал вами в основном усвоен. Если же на некоторые вопросы вы ответить не можете, то начните еще раз читать текст параграфа, отыскивая при этом ответы на вопросы, которые вызвали у вас затруднения.

Вопросы, отмеченные сбоку цветной чертой, не являются обязательными — и вы можете на них не отвечать. Они предназначены для учащихся, желающих более глубоко изучать физику и астрономию.

Учебник по физике недостаточно только читать. Над учебником надо работать с карандашом и ручкой в руках. Следует выписывать в тетрадь основные формулы, строить все графики, внимательно анализировать рисунки. На наиболее сложные вопросы желательно давать письменные ответы. Это позволит лучше усвоить материал, углубить его понимание.

Невозможно хорошо познать физику, не научившись решать задачи. Поэтому после изучения очередной порции теоретического материала следует обязательно решить несколько задач, которые предлагаются в упражнениях в конце параграфов. Ответы для проверки полученных результатов даны в конце книги.

§ 1.1. КОЛЕБАНИЯ ТЕЛА НА ПРУЖИНЕ

I. В окружающей нас жизни широко распространено движение, которое называется колебательным. Колеблются ветви деревьев во время ветра, металлическая пластинка, одним концом зажатая в тисках, качели, корпус работающей стиральной машины, маятник настенных часов, вагоны на рессорах при движении. Колебательное движение совершает и тело, подвешенное на пружине. Комбинацию тело — пружина называют пружинным маятником. Если тело толкнуть в вертикальном направлении (рис. 1.1), то можно увидеть, что оно попеременно движется вверх-вниз, т. е. совершает колебательное движение.

Колебаниями в механике называют такое движение, при котором тело поочередно отклоняется то в одну, то в другую сторону. Главная особенность колебательного движения состоит в том, что оно является периодическим.

II. На рисунке 1.2 показан опыт с пружиной и скрепленным с ней шариком с отверстием, который скользит по гладкому горизонтальному стержню. Когда пружина не деформирована, т. е. не сжата и не растянута, сила упругости на тело не действует (рис. 1.2, а). Считаем, что сила трения между телом и опорой пренебрежимо мала, сила тяжести уравновешена силой реакции опоры, поэтому тело находится в состоянии равновесия.

Рис. 1.1

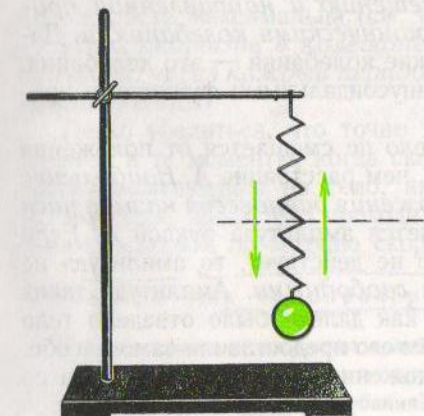
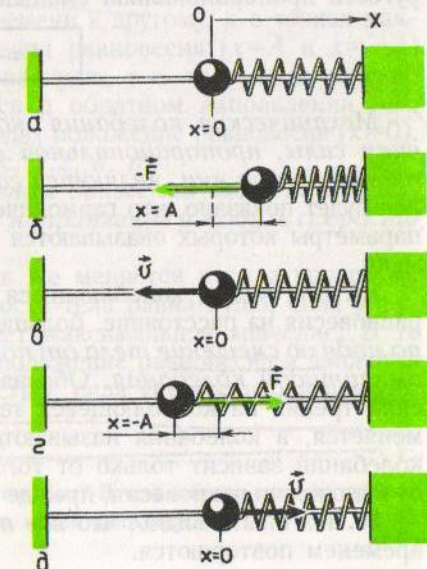


Рис. 1.2



Если вы затрудняетесь в решении той или иной задачи, то это чаще всего означает, что вы недостаточно хорошо поняли теоретический материал. Тогда прочитайте еще раз параграф, обдумывая при этом основные понятия и закономерности, — и вы наверняка найдете путь к решению задачи. Если это не поможет, то обратитесь за помощью к товарищу или учителю, но эту задачу все-таки постарайтесь решить. Со временем вы приобретете нужные навыки и решение задач окажется для вас весьма интересным занятием.

Задачи, отмеченные сбоку цветной чертой, также не являются обязательными. Это, как правило, более сложные задачи, предназначенные для учащихся, желающих изучать физику и астрономию на повышенном уровне.

В физике и астрономии большую роль играют наблюдение и опыт (эксперимент). Без самостоятельных наблюдений и опытов усвоить физику нельзя. Постарайтесь по мере обучения вести все рекомендованные в книге наблюдения, выполнять лабораторные работы и домашние опыты — и вы увидите, что начинаете лучше понимать материал и легче отвечать на вопросы учителя.

Попробуйте самостоятельно придумать и поставить новые опыты к изученному материалу. Это существенно улучшит ваши знания и умения.

В одной книге невозможно раскрыть весь путь развития научного познания. Между тем у любознательного ученика всегда будет возникать вопрос: как это все узнали? Как, например, узнали, что свет — это электромагнитные волны, а звук — упругие? Как познали законы движения планет? На основании чего утверждают, что атомные ядра всех химических элементов построены всего из двух частиц — протонов и нейтронов? Ответы на свои вопросы вы найдете, если попытаетесь не ограничиваться простым усвоением содержания учебника, что совершенно необходимо, а будете активно работать над интересующими вас вопросами, используя дополнительную литературу.

Для того чтобы докопаться до сути, нужно искать ответы в книгах и журналах, спрашивать, наблюдать, строить предположения, пытаться делать выводы и проверять их на доступных опытах. Все это будет не только углублять ваши знания, но и развивать способности.

Необходимо каждый раз спрашивать себя, с какими научными данными вы имеете дело в данный момент: с опытными фактами, предположениями (гипотезами), теоретическими выводами, законами природы, на основе которых можно делать расчет, и т. д.

Следует обратить внимание на применение достижений науки в жизни, устройство и принцип действия машин, приборов, аппаратов, а также на результаты воздействия производственной деятельности на окружающую среду.

Желаем вам больших успехов в работе!

Авторы

Координатную ось OX направляют вдоль стержня, а за начало отсчета принимают ту точку на оси, которая определяет положение центра тела, находящегося в равновесии ($x=0$).

Отводят тело вправо от положения равновесия на некоторое расстояние A — пружина сжимается (рис. 1.2, б).

При этом на тело действует сила упругости, направленная влево. Затем тело отпускают, и оно ускоренно устремляется влево, проходя положение равновесия со скоростью \bar{v} (рис. 1.2, в).

В положении равновесия сила упругости равна нулю — пружина не деформирована.

Тело продолжает свое движение влево по инерции, растягивая пружину. Сила упругости постепенно возрастает, но направлена она в этом случае вправо, поэтому скорость \bar{v} тела убывает. В конце концов тело останавливается в крайнем левом положении (рис. 1.2, г), где пружина растянута максимально, и, как показывает опыт, отклонение тела от положения равновесия вновь по модулю равно расстоянию A . В этом положении сила упругости максимальна и направлена вправо, куда после мгновенной остановки начнет двигаться тело. Оно снова пройдет через положение равновесия (рис. 1.2, д), но уже слева направо и опять отклонится от него на расстояние A , т. е. вернется в точку, откуда оно начало свое движение. Таким образом, заканчивается одно колебание и начинается следующее, во всем на него похожее. Мы приходим к выводу: в любой точке траектории колеблющегося тела сила упругости направлена к положению равновесия.

Отклонение тела от положения равновесия называют смещением. Обозначают смещение буквой x . По закону Гука сила упругости пропорциональна смещению и равна:

$$F = -kx.$$

Механические колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению и направленной противоположно ему, являются гармоническими колебаниями. Далее будет показано, что гармонические колебания — это колебания, параметры которых оказываются синусоидальными функциями времени.

III. Как видно, колеблющееся тело не смещается от положения равновесия на расстояние, большее, чем расстояние A . Наибольшее по модулю смещение тела от положения равновесия называется амплитудой колебания. Обозначается амплитуда буквой A . Если сила трения на колеблющееся тело не действует, то амплитуда не меняется, а колебания называются свободными. Амплитуда таких колебаний зависит только от того, как далеко было отведено тело от положения равновесия, прежде чем его предоставили самому себе.

IV. Из опыта видно, что все положения колеблющегося тела со временем повторяются.

Продолжительность одного полного колебания называется периодом колебания. Обозначают период колебания буквой T и выражают его в секундах (с).

Период одного полного колебания можно определить с помощью секундомера. Для того чтобы измерения были более точными, измеряют время t нескольких колебаний n (например, $n=10$ или $n=20$), а затем делят это время на число колебаний. Тогда период $T=t/n$. Такую лабораторную работу вы выполняли в VII классе.

Колебания характеризуются также и частотой.

Частота колебаний — это число колебаний в единицу времени. Обозначается частота греческой буквой ν . Если, например, период одного полного колебания равен 0,1 с, то частота равна $1/0,1 \text{ с} = 10$ колебаний в секунду. Следовательно, за единицу частоты принимают частоту такого колебания, при котором за 1 с совершается одно полное колебание. Эта единица называется герц (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Между периодом колебания T и частотой колебаний ν есть простая связь: частота — это величина, обратная периоду, период — величина, обратная частоте:

$$\nu = \frac{1}{T},$$
$$T = \frac{1}{\nu}.$$

$$T = \frac{t}{n}$$

V. Рассмотрим особенности скорости движения тела и силы упругости при колебательном движении. Как и любое другое движение, колебательное движение характеризуется скоростью. Однако при колебательном движении скорость тела меняется от точки к точке, т. е. от одного момента времени к другому, и в точках максимального отклонения от положения равновесия ($x=A$ и $x=-A$) скорость колеблющегося тела равна нулю, т. е. тело на мгновение останавливается, а затем движется в обратном направлении (см. рис. 1.2, б, г). Когда же тело проходит положение равновесия ($x=0$), его скорость максимальна (см. рис. 1.2, в, д).

Итак, скорость в колебательном движении меняется периодически: через каждый период T направление и модуль скорости повторяются.

Легко убедиться, что точно так же меняется и сила упругости. Причем в те моменты, когда скорость тела равна нулю, сила упругости, действующая на тело, имеет максимальное значение. В те же моменты, когда тело проходит положение равновесия и движется с максимальной по модулю скоростью, сила упругости равна нулю.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют колебательным? В чем состоит главное отличие колебательного движения от других видов движения?
2. Что такое амплитуда колебания?

3. Как связаны между собой период и частота колебаний?
4. В каких точках траектории колеблющегося тела скорость равна нулю; скорость максимальна?
5. Чему равно перемещение колеблющегося тела за время, равное периоду колебания? Чему равен путь тела за это же время?
6. Какие колебания называют гармоническими?

Упражнения

1. Груз колеблется на пружине, жесткость которой равна 1200 Н/м. Амплитуда колебания равна 4,8 см. Определите модуль силы, действующей на груз в те моменты, когда его скорость равна нулю.
2. По условию предыдущей задачи найдите модуль силы упругости, если смещение груза равно 2,5 см. Чему равна сила упругости, когда груз проходит положение равновесия?
3. Груз на пружине совершает 180 колебаний за 9 с. Найдите период и частоту колебаний.
4. Человеческое ухо воспринимает звуки с частотами от 20 Гц до 20 кГц. Каковы периоды этих колебаний?
5. Частота переменного тока равна 50 Гц. Чему равен период колебания переменного тока в сети?

§ 1.2. ЭНЕРГИЯ ТЕЛА В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

1. Рассматривая движение тела, прикрепленного к пружине (см. рис. 1.2), мы заключили, что если тело отвести на расстояние A от положения равновесия, например влево, и отпустить, то оно, пройдя через положение равновесия, обязательно отклонится вправо, причем также на расстояние A . Но почему отклонения вправо и влево при колебаниях должны быть непременно одинаковыми? Оказывается, объяснить это можно законом сохранения механической энергии, который мы рассмотрели в VII классе. Вспомним, что в законе сохранения механической энергии утверждается: *если в системе из двух или нескольких тел действуют только внутренние силы (силы тяжести, силы упругости или электрические силы), а действием внешних сил и трением можно пренебречь, то сумма кинетической и потенциальной энергий такой системы сохраняется.*

Кинетическая энергия, как известно, зависит от скорости тела. Она максимальна, когда тело движется с максимальной скоростью. Потенциальная энергия упруго деформированных тел, например сжатой или растянутой пружины, зависит от степени ее деформации. Она имеет наибольшее значение, когда пружина максимально сжата или максимально растянута. Так, если тело находится в крайней левой точке, смещение которой от положения равновесия равно амплитудному значению, то потенциальная энергия системы (тело — пружина)

в этой точке максимальна, скорость равна нулю, следовательно, равна нулю и ее кинетическая энергия. При движении тела вправо из крайней левой точки потенциальная энергия системы начинает убывать, скорость, а следовательно, и кинетическая энергия начинают расти. В положении равновесия потенциальная энергия системы равна нулю, скорость и кинетическая энергия максимальны. Причем кинетическая энергия системы в положении равновесия равна той потенциальной энергии, которую имела система в крайней левой точке, так как полная энергия, равная сумме потенциальной и кинетической энергий, должна быть постоянной.

При продолжении движения вправо скорость тела убывает, так как сила упругости направлена противоположно скорости. Вместе с тем убывает и кинетическая энергия системы, но увеличивается потенциальная, потому что смещение тела от положения равновесия возрастает. Тело остановится, когда кинетическая энергия системы станет равна нулю, т. е. в крайней правой точке, где потенциальная энергия равна максимальной кинетической энергии в положении равновесия и потенциальной энергии в крайней левой точке. А это и означает, что смещения тела влево и вправо одинаковы и равны амплитуде A .

II. Казалось бы, гармонические колебания, возникающие под действием одной лишь силы упругости, не должны затухать. Однако опыт показывает, что в природе так не бывает — колебания тела на пружине всегда затухают, т. е. их амплитуда со временем уменьшается, и тело в конце концов останавливается. В чем же причина затухания?

Вспомним, что выше речь шла о действии лишь одной силы — силы упругости. И если бы, кроме нее, никакие другие силы не действовали, то колебания груза происходили бы вечно с постоянной амплитудой. Но в любой реальной колебательной системе действуют еще и силы трения. А это и приводит к тому, что не вся потенциальная энергия системы превращается в кинетическую и, наоборот, не вся кинетическая энергия системы превращается в потенциальную: часть механической энергии за счет действия силы трения превращается во внутреннюю. Таким образом, кинетическая энергия системы в положении равновесия оказывается меньше потенциальной энергии в тот момент, когда тело находится в левой крайней точке, а потенциальная энергия системы в крайней правой точке оказывается меньше кинетической энергии в момент прохождения телом положения равновесия. Следовательно, происходит потеря механической энергии за счет ее превращения во внутреннюю. Это и приводит к постепенному уменьшению амплитуды колебания, т. е. к затуханию колебаний.

III. Попытаемся это показать математически. В VII классе мы показали, что потенциальная энергия деформированной пружины $E_{\text{п}} = kx^2/2$, где x — смещение (деформация пружины); k — ее жесткость. Мы также установили, что кинетическая энергия выражается формулой $E_{\text{к}} = mv^2/2$, где m — масса тела; v — его скорость.

В состоянии наибольшего смещения тела влево от положения равновесия (см. рис. 1.2, а) смещение $x=-A$, а скорость тела $v=0$. Тогда потенциальная энергия системы $E_n=kA^2/2$, а кинетическая — нулю. Полная механическая энергия системы равна:

$$W=E_n+E_k=kA^2/2.$$

Когда тело проходит положение равновесия, его скорость имеет максимальное значение $v=V$, а смещение равно нулю. Полная механическая энергия системы в этом случае равна:

$$W=E_n+E_k=mV^2/2.$$

Если в системе действует только упругая сила, а трением можно пренебречь, то механическая энергия сохраняется, следовательно,

$$kA^2/2=mV^2/2.$$

Поскольку это равенство справедливо как для отклонения тела влево (см. рис. 1.2, б), так и для отклонения тела вправо (см. рис. 1.2, в), амплитуды слева и справа одинаковы, т. е. колебания не затухают.

Иначе получается при наличии в системе трения. Пусть Q — это потеря механической энергии на трение при движении тела слева направо. Очевидно, что Q — это приращение внутренней энергии системы, что сопровождается нагреванием последней. Тогда при движении тела слева до положения равновесия мы получим $mV^2/2=kA_1^2/2-Q_1$, а при движении из положения равновесия вправо $kA_2^2/2=mV^2/2-Q_2$.

Итак, $kA_2^2/2=kA_1^2/2-Q_1-Q_2$, следовательно, амплитуда $A < A_1$, т. е. колебания затухают.

IV. Трение в системе всегда существует, и исключить его невозможно, однако уменьшить можно. Имеет ли тогда смысл пользоваться понятием *гармоническое*, т. е. *незатухающее колебание*? Оказывается, если механическая энергия системы велика, а трение в ней мало, то при небольшом числе колебаний затуханием можно пренебречь, а колебание можно считать почти гармоническим. Это существенно упрощает изучение закономерностей колебательных явлений.

Итак, понятие *гармоническое колебание* является идеализацией реальных явлений. Это такая же идеализация, как материальная точка, точечный электрический заряд, идеальная тепловая машина и т. д. Такие идеализации необходимы. Без них часто невозможно построить теорию. Но надо четко представлять себе, с какой целью вводятся идеальные объекты и где границы применения этих идеализаций.

Вопросы для самопроверки

1. В каких точках траектории колеблющееся тело обладает только кинетической энергией?
2. В каких точках траектории колеблющееся тело обладает только потенциальной энергией?
3. Чему равна полная энергия колеблющегося тела в произвольной точке траектории?
4. Какова связь между амплитудой колебания груза, скрепленного с пружиной, и его максимальной скоростью?
5. Почему в реальных системах колебания затухают?
6. Почему мы считаем, что гармоническое колебание является идеализацией? Когда этой идеализацией можно пользоваться, а когда нельзя?

Упражнения

1. Докажите, что при гармоническом колебании амплитуда не меняется.
2. Докажите, что в реальных системах амплитуда колебания уменьшается.
3. Груз массой 6,0 кг связан с пружиной, жесткость которой 1200 Н/м. Груз отклонили на 15 см от положения равновесия и отпустили. С какой скоростью он будет проходить положение равновесия? Трением можно пренебречь (см. рис. 1.2).
4. Решите предыдущую задачу для условия, что работа силы трения равна 10% механической энергии.
5. Груз при условии предыдущей задачи переходит из крайнего левого положения в крайнее правое. Какова амплитуда справа?

§ 1.3. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ

1. Гармоническое колебательное движение становится особенно наглядным, если представить его в виде графика зависимости координаты колеблющегося тела от времени. Изобразить график колебательного движения может само колеблющееся тело. Для этого к телу прикрепляют какое-нибудь пишущее устройство, например карандаш, и к нему прижимают бумажную ленту (рис. 1.3).

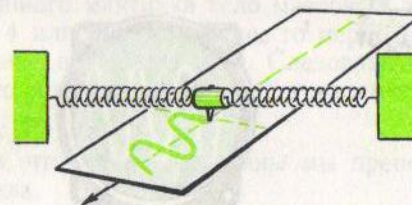


Рис. 1.3

Когда тело колеблется поперек бумажной ленты, которая неподвижна, оно выписывает на бумаге прямую линию. Каждую точку этой прямой тело проходит за один период колебания дважды: сначала при движении вправо, а затем при движении влево.

Совсем иная картина вырисовывается, если бумажную ленту двигать с некоторой постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению колебаний. На бумаге появляется кривая, каждая точка которой соответствует положению колеблющегося тела в различные моменты времени. Эта кривая называется *осциллограммой*. (Слово «осциллограмма» образовано от латинского слова *oscillum* — колебание и греческого слова *грамма* — запись, т. е. записанный график движения колеблющегося тела.)

II. На рисунке 1.4 график колебания показан отдельно. Если провести ось времени t через точки, когда тело проходит положение равновесия, то можно измерить амплитуды при перемещении тела влево и вправо. Как видно, *амплитуды все время убывают*, т. е. *колебания затухают*.

Однако если взять достаточно массивный груз на жесткой пружине и максимально уменьшить трение, то при небольшом числе колебаний можно получить осциллограмму, показанную на рисунке 1.5. Как видно, амплитуда оказывается величиной постоянной. В курсе математики вы узнаете, что такая кривая называется *синусоидой*. Мы же ее можем получить опытным путем.

III. Выше было сказано: пружинный маятник совершает гармонические колебания. Теперь можно утверждать: *графиком зависимости координаты от времени в гармонических колебаниях является синусоида*.

Вычерчивая графики колебаний, мы как бы развертываем их во времени. Равномерное движение бумаги (см. рис. 1.3) символизирует течение времени. Такие развертки очень наглядно показывают ос-

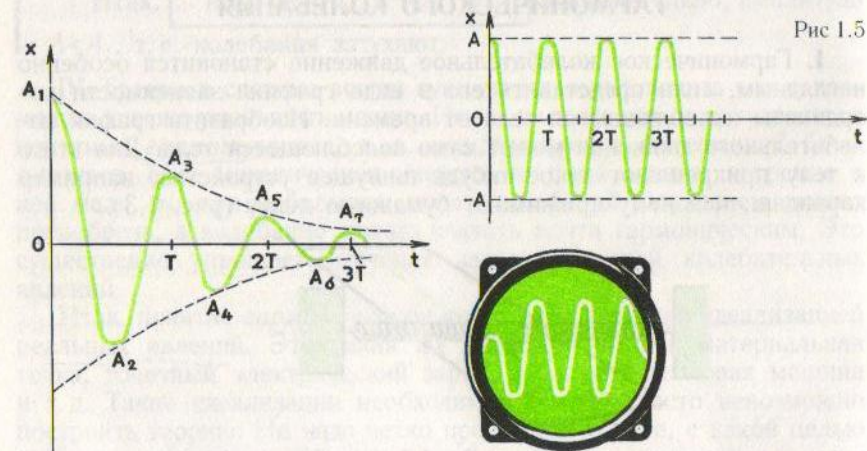


Рис. 1.4

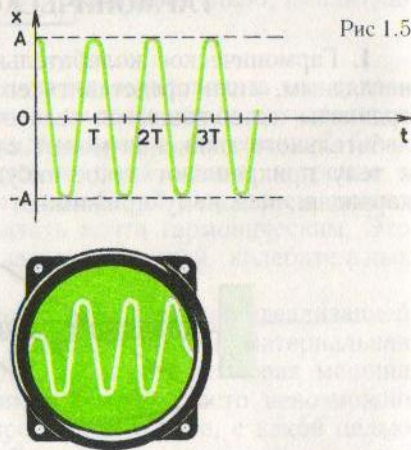


Рис. 1.6

новные характеристики колебательного движения — амплитуду, период, а значит, и частоту (см. рис. 1.5). По форме графика (осциллограммы) гармоническое колебание называют *синусоидальным*.

Вопросы для самопроверки

1. Как записать график (осциллограмму) колебаний пружинного маятника?
2. Можно ли получить осциллограмму, близкую к синусоиде? Как это сделать?
3. Можно ли по осциллограмме определить амплитуду колебания, период, частоту?

Упражнения

1. На рисунке 1.6 изображена осциллограмма переменного тока. Можно ли считать переменный ток гармоническим колебанием?
2. Частота переменного тока в сети равна 50 Гц. Определите, пользуясь рисунком 1.6, сколько времени длилась развертка осциллограммы.
3. При записи осциллограммы (см. рис. 1.5) лист бумаги двигался равномерно со скоростью 2 см/с. Определите по графику период и частоту колебания.
4. По осциллограмме смещения (см. рис. 1.5) постройте график изменения силы и скорости как функции времени.
5. Пользуясь осциллограммой (см. рис. 1.5), постройте примерный график изменения потенциальной, кинетической и полной механической энергии системы как функции времени.

§ 1.4. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

I. Одной из важных характеристик колебательного движения является *период колебания*. На основе простых опытов можно убедиться в том, что у различных пружинных маятников периоды колебаний различны. Многочисленные опыты подтверждают зависимость периода от массы тела и жесткости пружины.

Так, к пружине поочередно прикрепляют два тела с различными массами m_1 и m_2 . Получают два пружинных маятника, которые приводят в колебания с одинаковой амплитудой. Оказывается, что периоды T_1 и T_2 этих маятников различны. Следовательно, период колебания пружинного маятника зависит от массы его тела. Если же у пружинного маятника тело массой m заменить на тело, масса которого в 4 или 9 раз больше, то периоды колебаний увеличатся соответственно в 2 или 3 раза. Следовательно, *период колебания пружинного маятника пропорционален корню квадратному из массы тел*: $T \sim \sqrt{m}$.

Заметим, что массой пружины мы пренебрегаем по сравнению с массой тела.

II. Выше мы сказали, что период колебания пружинного маятника зависит не только от массы тела, но и от свойств самой пружины,

а именно от ее жесткости, что легко доказывают экспериментально. Оставляют массу тела неизменной, но меняют жесткость пружины. Измеряют периоды колебаний маятников. Убеждаются в том, что с ростом жесткости пружины в 4 или 9 раз периоды колебаний уменьшаются в 2 или 3 раза. Следовательно, *период колебания пружинного маятника обратно пропорционален корню квадратному из жесткости пружины:*

$$T \sim \sqrt{\frac{1}{k}}.$$

III. Соединив два вывода, получим следующее соотношение:

$$T = C \sqrt{\frac{m}{k}},$$

где C — коэффициент пропорциональности, который можно определить опытным путем, измеряя период T и величину $\sqrt{m/k}$. Оказывается, что $C=6,28$, а точнее, $C=2\pi$, где $\pi=3,14159...$ — отношение длины окружности к ее диаметру.

Таким образом, формула периода колебания пружинного маятника примет вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Как зависит период колебания пружинного маятника от массы его тела? Какими опытами доказывают эту зависимость?
2. Как зависит период колебания пружинного маятника от жесткости пружины? Какими опытами доказывают эту зависимость?
3. Выведите формулу для определения частоты колебаний пружинного маятника.
4. Зависит ли период колебания пружинного маятника от амплитуды колебания? Как это можно доказать?
5. Предложите метод измерения массы космонавта в состоянии невесомости, пользуясь формулой для периода колебания пружинного маятника.
6. Выразите соотношение между амплитудами смещения и скорости через частоту колебаний и через период колебания пружинного маятника.

Упражнения

1. На спиральной пружине жесткостью $k=100$ Н/м подвешено тело массой m . Если эту систему вывести из состояния равновесия, то тело будет совершать 300 колебаний в минуту. Чему равна масса тела?
2. Чему равна частота колебаний груза на пружине, если его масса равна 100 г, а жесткость пружины равна 40 Н/м?

3. Чему равна жесткость пружины, если скрепленное с ней тело массой 30 г совершает за 1 мин 300 колебаний?

4. Тело, прикрепленное к пружине, совершает колебания с некоторым периодом T . Если увеличить массу тела на 60 г, то период колебания удваивается. Какова первоначальная масса тела?

§ 1.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

I. Мы познакомились с гармоническими колебаниями, которые совершает тело под действием силы упругости. Для таких колебаний характерно то, что в любой точке траектории сила упругости направлена к положению равновесия. Она как бы стремится вернуть тело в это положение. Но можно ли утверждать, что гармонические колебания возможны только под действием силы упругости? Оказывается, нет.

Интересным и очень важным примером колебательного движения, связанного с действием не только силы упругости, но и силы тяжести, является движение маятника — тела, подвешенного к нити, один конец которой закреплен. Если у маятника тело (груз) имеет размеры много меньшие, чем длина нити, и масса нити тоже ничтожно мала по сравнению с массой тела, то такой маятник называют *математическим*.

Практически тяжелый шарик малого размера на длинной нити ведет себя как математический маятник.

Когда нить занимает строго вертикальное положение, а тело находится в покое, то говорят, что маятник находится в положении равновесия. Если тело отвести в сторону и отпустить, то маятник станет колебаться.

На первый взгляд кажется, что движение математического маятника не совсем похоже на движение пружинного маятника: первый колеблется по дуге, а второй — по прямой. Но если математический маятник отклонить на очень малый угол, то дуга, по которой движется тело на нити, будет мало отличаться от хорды. В этом можно убедиться, рассмотрев рисунок 1.7, где показаны колебания маятника, отклоненного на малый угол. Таким образом, только при малых углах отклонения математического маятника от положения равновесия можно считать, что его движение похоже на движение пружинного маятника.



Рис. 1.7

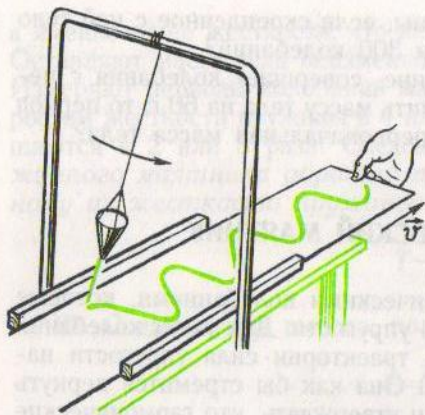


Рис. 1.8

Практически угол отклонения маятника от вертикали не должен превышать 8° .

II. Математический маятник при небольших углах отклонения совершает гармонические колебания. С помощью установки, показанной на рисунке 1.8, получают осциллограмму (запись колебания), которая и позволяет в этом убедиться.

Как видно из рисунка, в качестве тела на нити используют воронку с песком, который тонкой струей сыплется на лист бумаги, равномерно перемещаемый в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний маятника, и таким образом дает возможность сделать запись колебаний. (Возможны и другие методы записи колебаний маятника.)

Получают осциллограмму, которая имеет форму синусоидальной кривой. А это и означает, что математический маятник совершает гармонические колебания.

По осциллограмме определяют амплитуду колебания математического маятника, а если известна и скорость движения листа, то и период колебания.

III. Опыт показывает: *период колебания математического маятника не зависит от массы колеблющегося тела, а при небольших углах — от амплитуды колебания.* Так же опытным путем установили: *период колебания математического маятника прямо пропорционален корню квадратному из длины его нити.* Такое исследование вы проводили в VII классе.

В теории колебаний доказывается, что период колебания математического маятника можно вычислить по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника, а g — ускорение свободного падения, равное отношению силы тяжести к массе колеблющегося тела. В средних широтах $g \approx 9,81$ Н/кг.

Кстати, с помощью математического маятника значение g может быть найдено с большей степенью точности (см. § 7.10).

IV. Земная кора — наружная оболочка Земли — состоит в основном из каменных пород, в частности из гранита, гнейса, базальта и т. д. Ее средняя плотность равна $2,8 \cdot 10^3$ кг/м³. В коре часто встречаются металлические руды, в частности месторождения железа, меди, свинца и других тяжелых металлов. Плотность таких

рудных включений равна примерно $4,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Благодаря этому сила тяжести в областях рудных включений несколько больше, чем в соседних областях, состоящих только из каменных пород. Следовательно, возрастает и значение $g = P/m$, в результате чего период колебания математического маятника в области рудных включений несколько меньше, чем в соседних областях.

Таким образом, точные измерения периода колебания математического маятника позволяют геологам обнаружить рудные залежи. Этот метод, называемый *гравиметрической разведкой*, широко применяется на практике.

V. Маятники находят широкое применение в часах. Первые маятниковые часы сконструировал в 1656 г. Х. Гюйгенс. Он же разработал теорию колебаний маятника. Заметим, что первый, кто установил на опыте независимость периода колебания маятника от его амплитуды и предложил использовать маятник для измерения времени, т. е. в часах, был Г. Галилей (1583). Однако понадобилось более семидесяти лет, чтобы эта идея была реализована на практике.

Создание часов явилось мощным толчком для развития науки и техники. Появилась реальная возможность изучать движение небесных тел и работу всевозможных механизмов. Стала развиваться конструкторская деятельность, в том числе и в области точной механики. Были созданы хронометры — часы с точным ходом.

Сейчас созданы новые часы, в частности электронные и атомные, точность хода которых значительно выше, чем у маятниковых часов, однако маятниковые часы еще достаточно широко применяются. Применяются также и часы, в основе работы которых лежат колебания своеобразного пружинного маятника, где небольшой маховичок, скрепленный со спиральной пружиной, совершает крутильные колебания.

Вопросы для самопроверки

1. При каких условиях маятник, имеющий вид груза, который подвешен на нити, можно считать математическим?
2. При каких условиях колебания маятника будут гармоническими?
3. От каких физических величин зависит период колебания математического маятника?
4. Изменится ли период колебания математического маятника, если маятник перенести из одного места на Земле в другое (например, с экватора на полюс)?
5. Как изменится период колебания математического маятника, если груз заменить другим телом: по массе в 2 раза меньше; в 2 раза больше?
6. Какие изменения энергии происходят при колебаниях математического маятника?
7. Как доказать, что колебания маятника при малых углах отклонения являются гармоническими?

Упражнения

1. Измеряя отношение силы тяжести к массе тела с помощью маятника, ученик определил, что при длине нити, равной 1 м, маятник совершает 30 колебаний за 1 мин. Какое значение измеряемой величины получил ученик?
2. Проводя лабораторную работу в VII классе по исследованию зависимости периода колебания маятника от длины его нити, вы убедились в том, что если длину нити выразить в метрах, то период колебания можно определить по формуле $T=2\sqrt{l}$. Соответствует ли она формуле $T=2\pi\sqrt{l/g}$? Какая погрешность при этом допускается?
3. В Исаакиевском соборе в Санкт-Петербурге был установлен маятник, длина подвеса которого равна 98 м. Каков период колебания этого маятника?
4. Чему должна быть равна длина подвеса маятника, чтобы период его колебания был равен 1 с; 2 с?
5. Маятник на поверхности Земли колеблется с периодом 2 с. Каков будет период колебания этого маятника на поверхности Луны? Отношение силы тяжести к массе колеблющегося тела на поверхности Луны в 6 раз меньше, чем на Земле.
6. Задачу 5 решите для условий на Марсе, где отношение силы тяжести к массе колеблющегося тела равно 3,76 Н/кг.
7. Математический маятник отклонили на небольшой угол. При этом груз поднялся на высоту 38 мм. С какой скоростью груз будет проходить положение равновесия? Отношение силы тяжести к массе груза равно 9,81 Н/кг.

§ 1.6. КОЛЕБАНИЯ В ОДИНАКОВОЙ ФАЗЕ И В ПРОТИВОФАЗЕ

I. На стержнях подвешивают два маятника одинаковой длины. Одновременно выводят их из положения равновесия влево. На движущуюся бумажную ленту записывают колебания этих маятников (рис. 1.9). Так как период колебания и частота математического маятника зависят от длины нити, то естественно, что эти маятники начинают колебаться с одинаковой частотой. При отклонении нитей на один и тот же угол наблюдают одинаковые амплитуды колебаний. Таким образом, приходим к выводу: *два маятника, одинаковой длины и пущенные одновременно, колеблются совершенно одинаково*, т. е. они одновременно проходят положение равновесия, одновременно достигают амплитудного значения отклонения, а затем останавливаются, одновременно начинают двигаться в обратном направлении и т. д. Их осциллограммы оказываются совершенно одинаковыми при наложении и совмещении начала отсчета времени (рис. 1.10).

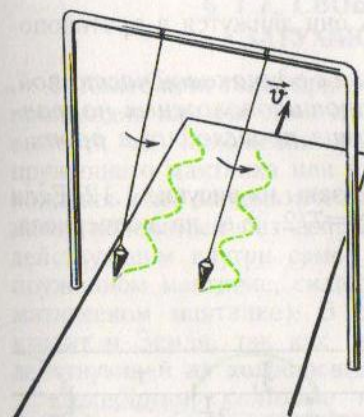


Рис. 1.9

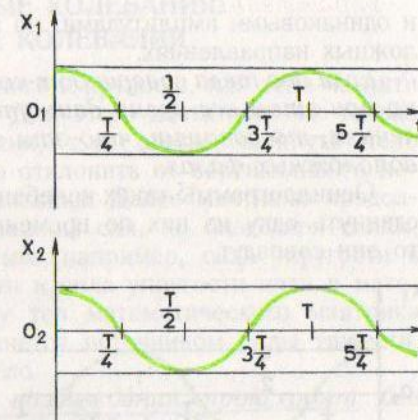


Рис. 1.10

Итак, если два тела совершают колебания с одинаковой частотой и в любой момент времени находятся в одном и том же состоянии относительно положения равновесия, то говорят, что такие колебания происходят в одинаковой фазе.

II. Два маятника одинаковой длины выпускают из рук в разные моменты времени. Видят: маятники колеблются несколько по-разному. У них одинаковые частоты колебаний и амплитуды, но один все время как бы немного отстает от другого: позже проходит положение равновесия, позже доходит до амплитудного положения и позже останавливается, позже начинает двигаться в обратном направлении и т. д. Сравнив их осциллограммы (рис. 1.11), видим, что они совершенно одинаковы, но одна сдвинута относительно другой на время Δt . Конечно, их можно совместить, но для этого нужно одну из них сдвинуть на Δt . Поэтому если два тела совершают

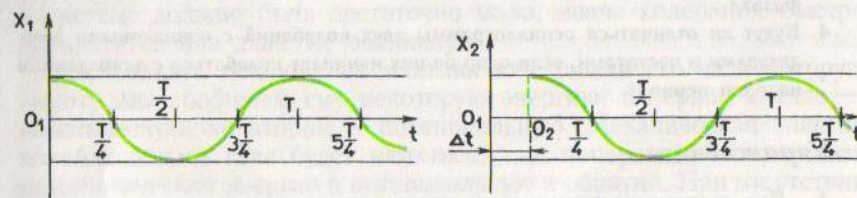


Рис. 1.11

колебания с одинаковой частотой, и одно из них повторяет все состояния другого с некоторым запаздыванием во времени, то говорят, что эти колебания происходят со сдвигом по фазе.

III. Два маятника одинаковой длины отклоняют на равные углы, но в противоположные стороны. Затем их одновременно отпускают. Видят: оба маятника совершают колебания с одинаковой частотой

и одинаковыми амплитудами, но теперь они движутся в противоположных направлениях.

Если два тела совершают колебания с одинаковой частотой, но при этом все время движутся в противоположных направлениях, то говорят, что эти колебания происходят в противоположных фазах.

Осциллограммы таких колебаний показаны на рисунке 1.12. Если сдвинуть одну из них по времени на $\Delta t = T/2$, т.е. на полпериода, то они совпадут.

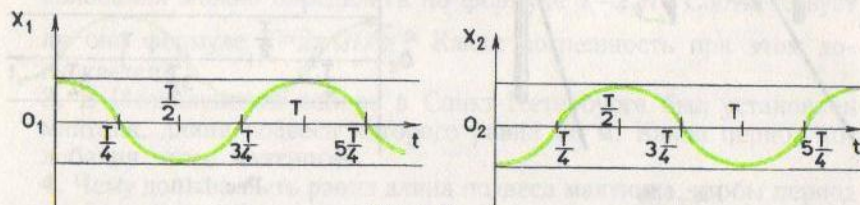


Рис. 1.12

IV. Очевидно, что описанные фазовые соотношения двух колебаний одинаковой частоты справедливы не только для математических маятников, но и для любых колеблющихся тел. Опыты, аналогичные описанным выше, можно поставить и с пружинными маятниками, и с колеблющимися струнами, стержнями, а также с любыми другими колеблющимися телами. Все эти колебания можно сравнить по амплитуде, частоте (или периоду) и сдвигу фаз.

Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях мы говорим, что два тела колеблются в одинаковой фазе?
2. В каких случаях мы говорим, что тела колеблются в противоположных фазах?
3. На какое время сдвинуты колебания, происходящие в противоположных фазах?
4. Будут ли отличаться осциллограммы двух колебаний с одинаковыми амплитудами и частотами, если одно из них начинает колебаться с запозданием на один период?

Упражнения

1. Два маятника одинаковой длины отклонили на один и тот же угол. Один из них начал колебаться на четверть периода позже, чем другой. В каком положении будет находиться второй маятник, когда первый максимально отклонится от положения равновесия?
2. Начертите осциллограммы колебаний по условию предыдущей задачи.
3. Два маятника одинаковой длины колеблются в противофазе. Один из них проходит через положение равновесия и движется слева направо. В каком состоянии находится другой маятник?

§ 1.7. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

I. Колебания тела, прикрепленного к пружине, или тела на нити происходят как бы сами по себе. Для этого достаточно их только вывести из положения равновесия, т.е. слегка оттянуть тело пружинного маятника или немного отклонить от вертикального положения тело математического маятника. Далее маятники продолжают колебаться без действия внешних сил, но благодаря силам, действующим внутри самой системы (например, сила упругости в пружинном маятнике, сила тяжести и сила упругости нити в математическом маятнике). В систему тел математического маятника входит и Земля, так как она является источником силы тяжести, действующей на колеблющееся тело.

Колебания, которые после возбуждения происходят без внешних воздействий, называются свободными.

Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называются колебательными системами.

Частоту свободных колебаний называют также частотой собственных колебаний системы или собственной частотой.

Формулы для периодов колебаний, которые были получены выше, относятся именно к свободным колебаниям. Как видно, собственная частота колебаний определяется свойствами самой колебательной системы: у пружинного маятника — массой тела и жесткостью пружины, у математического маятника в данном месте Земли — его длиной.

II. Итак, пружинный и математический маятники совершают свободные колебания. И не только они. Такие колебания широко распространены в природе.

Познакомившись с колебаниями маятников, необходимо установить условия, при которых возможны свободные колебания тел. Во-первых, в колебательной системе должна действовать сила, которая всегда направлена к положению равновесия. Во-вторых, трение в системе должно быть достаточно мало, иначе колебания быстро прекратятся или даже не возникнут.

III. Толкнув покоящийся маятник или подняв его на некоторую высоту, мы сообщаем ему некоторую энергию: в первом случае — кинетическую, во втором — потенциальную. Механическая энергия колеблющегося тела будет меняться, т.е. попеременно переходить из кинетической энергии в потенциальную и обратно. При отсутствии трения полная механическая энергия маятника должна оставаться все время равной той энергии, которая была ему сообщена вначале.

Полная энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды колебания. Следовательно, при отсутствии трения, когда полная механическая энергия маятника сохраняется, остается постоянной и амплитуда его колебания. Таким образом, в системе без трения свободные колебания должны были бы длиться вечно. И действительно, иногда можно наблюдать колебания, длящиеся поразительно долго.

тельно долго. Например, длинный массивный маятник, отклоненный на малый угол, может в течение десятков минут и даже часов совершать свободные колебания.

IV. И все же свободные колебания не вечны. Как бы долго ни продолжались свободные колебания, их амплитуда, как показывает опыт, постепенно уменьшается, колебания затухают и в конце концов прекращаются.

Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается, называются затухающими. С каждым новым периодом амплитуда колебания становится все меньше, и, чем больше сила трения, тем быстрее уменьшается амплитуда. График такого затухающего колебания показан ранее на рисунке 1.4. Затухающие колебания гармоническими считать нельзя, так как для гармонических колебаний характерно постоянство амплитуды. Лишь при слабом затухании свободные колебания можно считать приблизительно гармоническими.

Вопросы для самопроверки

1. Какие колебания называются свободными?
2. В чем состоит явление затухания колебаний?
3. Почему сила трения приводит к уменьшению амплитуды колебаний?
4. Можно ли считать затухающие колебания гармоническими?
5. Чем определяется собственная частота колебательной системы?

§ 1.8. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

I. Для того чтобы колебания были незатухающими, необходимо восполнять потери энергии колебательной системы на трение за каждый период колебания. Делать это можно, действуя на систему внешней, периодически изменяющейся силой. За счет работы внешней силы энергия системы пополняется. Колебания тел в таком случае не являются свободными. Их называют *вынужденными*, а сила, периодически изменяющаяся и вызывающая эти колебания, называется *вынуждающей силой*.

Таким образом, *вынужденными колебаниями называются колебания, совершаемые телом под действием внешней, периодически изменяющейся силы.* За вынужденными колебаниями можно проследить с помощью установки, показанной на рисунке 1.13. Груз

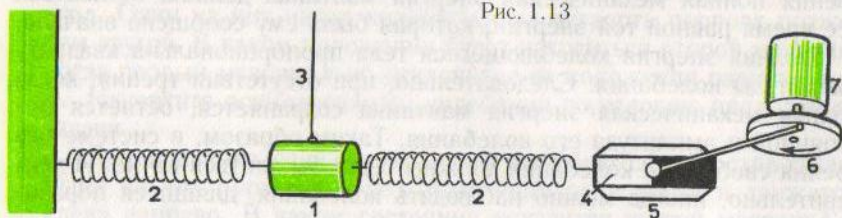


Рис. 1.13

1 — закреплен с пружинами 2. На свободный конец одной из пружин действует периодически изменяющаяся сила. Для того чтобы груз не провисал, его подвешивают на длинную нить 3. Свободный конец пружины прикреплен к кулисе 4, которая совершает возвратно-поступательное движение по направляющим 5 при вращении маховика 6. Вся система приводится в движение электрическим двигателем 7, частоту вращения которого можно менять.

При вращении диска кулиса действует на конец пружины с некоторой силой, меняющейся с частотой вращения диска. Тело колеблется именно с этой частотой, т. е. с частотой вынуждающей силы, а не с собственной частотой. Вынуждающая сила как бы навязывает свою частоту колеблющемуся телу. *Вынужденные колебания всегда происходят с частотой вынуждающей силы.*

II. Выясним, от чего зависит амплитуда вынужденных колебаний. Прежде всего от амплитуды вынуждающей силы. В самом деле, чем больше сила, тем большую работу она совершит по увеличению энергии колебательной системы, а следовательно, и по увеличению амплитуды вынужденных колебаний.

Этот вывод подтверждается экспериментально. Так, если увеличивать диаметр маховика 6, то увеличивается амплитуда колебаний кулисы 4 (см. рис. 1.13). Это приведет к большему растяжению пружины, а значит, и к увеличению вынуждающей силы. Опыт показывает, что в таком случае возрастает и амплитуда вынужденных колебаний груза 1 при той же самой частоте колебаний.

Таким образом, *амплитуда вынужденных колебаний возрастает при увеличении амплитуды вынуждающей силы.*

III. Опыт также показывает: амплитуда вынужденных колебаний очень сильно зависит от соотношения между частотой ν вынуждающей силы и собственной частотой ν_0 колебательной системы. Если эти частоты сильно отличаются друг от друга ($\nu \gg \nu_0$ или $\nu \ll \nu_0$), то амплитуда вынужденных колебаний оказывается незначительной.

При сближении частот ν и ν_0 амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Особенно сильно этот эффект проявляется в колебательной системе с малым затуханием, т. е. при силе трения, которая значительно меньше силы упругости пружины. В этом случае амплитуда колебаний груза может стать настолько большой, что возможно разрушение системы (например, обрыв пружины).

Итак, амплитуда вынужденных колебаний очень сильно зависит от соотношения между собственной частотой ν_0 колебательной системы и частотой вынуждающей силы ν . Эта зависимость показана на рисунке 1.14, где изображены два графика: кривая 1 — для системы с малым трением, кривая 2 — для системы с большим трением.

IV. Особый интерес представляет тот случай, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы или близка к ней. Рассмотрим опыт, в котором меняют частоту вынуждающей силы, действующей на колебательную систему.

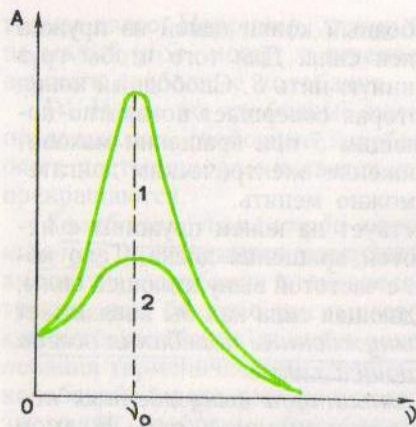


Рис. 1.14

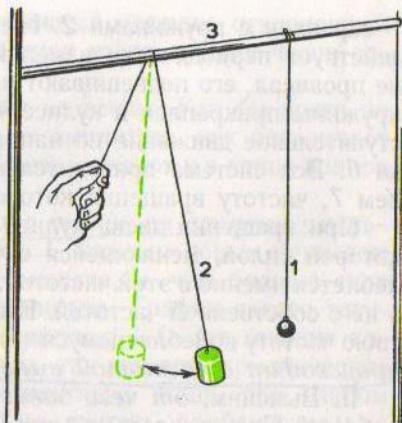


Рис. 1.15

На рисунке 1.15 изображена установка, состоящая из маятника 1 и маятника 2 большой массы. Длина нити маятника 1 постоянна, длину нити маятника 2 можно менять, подтягивая рукой ее свободный конец. Оба маятника прикреплены к одной и той же перекладине 3. Если привести в колебания маятник 2, то он через перекладину будет действовать на маятник 1 с некоторой периодической силой. В результате маятник 1 начнет совершать вынужденные колебания.

Уменьшают длину нити маятника 2 и тем самым меняют частоту его колебаний, а следовательно, и частоту вынуждающей силы, действующей на маятник 1. Причем, когда длины маятников становятся равными, т. е. когда частота вынуждающей силы приближается к собственной частоте колебаний маятника 1, его амплитуда колебаний резко возрастает. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигнет при резонансе, т. е. при совпадении частоты колебаний вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы ($\nu = \nu_0$).

Таким образом, можно сказать, что совпадение частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы является условием резонанса. При резонансе (т. е. при условии $\nu = \nu_0$) амплитуда вынужденных колебаний оказывается максимальной.

Сила трения, однако, здесь играет большую роль, и именно она мешает амплитуде колебаний маятника 1 достигать слишком больших значений. Но все же при равенстве частоты колебаний вынуждающей силы и собственной частоты колебаний системы амплитуда может оказаться весьма значительной.

V. Как можно объяснить явление резонанса?

Хорошо известно, что, например, при раскачивании качелей необходимо подталкивать их, действуя хотя и небольшой внешней силой, но в такт с собственными колебаниями качелей. В такт —

это значит, что направление действующей силы (толчка) совпадает с направлением движения качелей. Поэтому внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая с каждым новым толчком энергию качелей. Амплитуда их колебаний будет возрастать до тех пор, пока работа силы трения не сравняется по модулю с работой вынуждающей силы. Та же самая картина наблюдается в опыте с маятниками на рисунке 1.15, когда маятник 2 через растяжку действует на маятник 1 в такт с его собственной частотой.

Когда же частота колебаний вынуждающей силы и собственная частота системы совпадают, происходит передача максимальной энергии колебательной системе. Поэтому амплитуда резко возрастает.

VI. Резонанс может быть полезным, поскольку он позволяет увеличивать, если это нужно, амплитуду колебаний. С другой стороны, резонанс может быть вредным и даже опасным явлением. Если, например, на фундаменте установлена машина, в которой во время ее работы какие-нибудь части совершают периодическое движение, то это движение будет передаваться фундаменту, который начнет совершать вынужденные колебания. Причем фундамент имеет тоже определенную собственную частоту, и если она совпадет с частотой колебаний машины, то амплитуда колебаний фундамента может стать настолько большой, что приведет к его разрушению. Известны случаи, когда мосты разрушались при прохождении по ним строевым шагом военных отрядов, потому что собственная частота колебаний моста становилась равна частоте солдатского шага.

Борьба с опасными последствиями резонанса сводится к тому, что резонанс стараются не допускать. Для этого заранее рассчитывают частоты колебаний машин, фундаментов, средств транспорта и др.

С явлением резонанса мы часто встречаемся в повседневной жизни. Так, например, если в комнате задребезжали стекла при прохождении тяжелого грузовика по улице, то это значит, что собственные частоты колебаний стекол равны частотам колебаний машины. Вообще всякое дребезжание обычно связано с резонансом.

С явлением резонанса мы снова встретимся при изучении звуковых явлений и элементов радиотехники.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое вынужденные колебания?
2. С какой частотой происходят вынужденные колебания?
3. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний?
4. В чем состоит явление резонанса?
5. Какова роль силы трения при вынужденных колебаниях?

Упражнения

1. На конец пружины маятника (см. рис. 1.13), груз которого имеет массу 0,1 кг, действует переменная сила, частота которой

равна 16 Гц. Будет ли при этом наблюдаться резонанс, если жесткость пружины равна 400 Н/м?

2. При работе станка сильно раскачался стоявший вблизи маятник длиной 11 см. Какова частота колебаний станины станка?

3. Если частота вращения ротора сверлильного станка равна 100 Гц, то возникает сильная вибрация. Как от нее избавиться? Одни предлагают уменьшить частоту вращения, другие — увеличить. Будет ли это эффективно?

4. Что бы вы предложили сделать для уменьшения вибрации, если частоту вращения ротора изменить нельзя?

§ 1.9. АВТОКОЛЕБАНИЯ

1. Существует еще один способ получения незатухающих колебаний. Такое возможно, когда колебательная система черпает энергию порциями от внешнего источника, в котором колебания не совершаются. Такие колебания называются *автоколебаниями*. (Слово «автоколебание» образовано от греческого слова autos — сам, т. е. самоподдерживающиеся незатухающие колебания.)

Системы, в которых возбуждаются автоколебания, называются автоколебательными системами.

Примером автоколебательной системы может служить установка, показанная на рисунке 1.16. Она представляет собой известный пружинный маятник 1, к которому присоединены последовательно источник постоянного тока 2 (аккумулятор) и электромагнит 3. При колебаниях груз маятника то прижимается к контакту 4, замыкая электрическую цепь, то отходит от контакта, размыкая цепь.

Установка работает следующим образом. Груз выводят из положения равновесия — цепь замыкается. При этом электромагнит, притягивая груз, рывком сообщает ему энергию. Груз отходит от контакта 4. В системе возникают свободные колебания. При движении вверх груз опять замыкает цепь, и электромагнит вновь рывком сообщает ему определенную порцию энергии, т. е. электромагнит компенсирует потери энергии на трение. В системе устанавливаются незатухающие колебания.

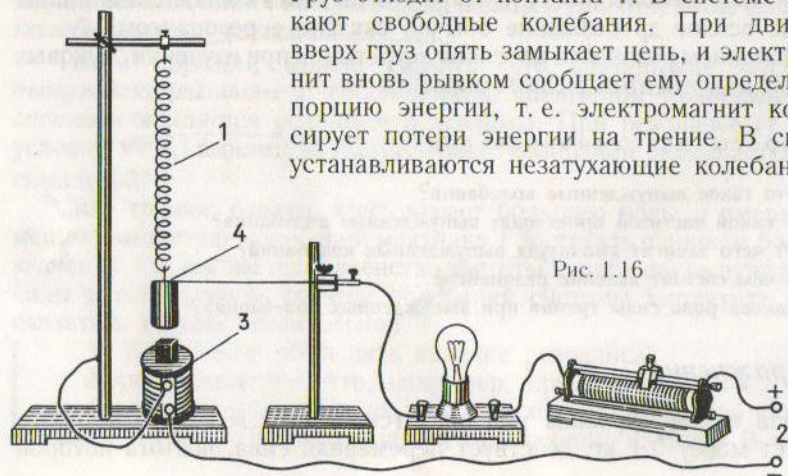


Рис. 1.16

II. Автоколебательная система сама отбирает необходимую ей энергию от источника, в котором нет колебаний. Система получает энергию периодически нужными порциями с частотой, равной собственной частоте колебательной системы. Этим автоколебания принципиально отличаются от вынужденных колебаний.

Итак, частота автоколебаний (как и свободных колебаний) определяется свойствами самой колебательной системы. Амплитуда автоколебаний определяется балансом между энергией, поступающей в систему толчком в течение периода, и потерями энергии на затухание за это же время.

III. Автоколебания чрезвычайно широко распространены в природе и технике. Завывание ветра, гудение горячего воздуха в печке и дымоходе (тяга), звуки, издаваемые животными (вой, свист, лай и др.), — все это примеры автоколебаний. Когда мы говорим или поем, то за счет энергии струи воздуха, вытекающего из легких, мы возбуждаем автоколебания в полости рта.

В смычковых музыкальных инструментах (скрипка, виолончель, контрабас и др.) автоколебания струн возбуждаются при движении по ним смычка. В духовых музыкальных инструментах (труба, флейта, кларнет) автоколебания возбуждаются в столбах воздуха, вдуваемого музыкантом в инструмент. В гармошке, баяне, аккордеоне автоколебания металлических язычков возбуждаются за счет энергии потока воздуха, вдуваемого мехами. Двигатель внутреннего сгорания, который вы изучали в VIII классе, — это тоже автоколебательная система.

Типичными примерами автоколебательных систем являются часы. В часах с маятником (рис. 1.17) источником энергии служит гиря, поднятая на определенную высоту. Через анкер она толчками с помощью ходового колеса передает маятнику энергию, поддерживая незатухающими его колебания. В наручных часах источником энергии служит заводная пружина, передающая через анкерный механизм толчками энергию балансиру, совершающему крутильные колебания.

IV. Несмотря на многообразие автоколебательных систем, все они состоят из четырех основных блоков, указанных на рисунке 1.18. Колеба-



Рис. 1.17



Рис. 1.18

тельная система — это любое устройство, способное совершать свободные колебания с некоторой собственной частотой. **Источник энергии** — устройство, не обладающее колебательными свойствами, но способное передавать энергию колебательной системе. **Клапан** — устройство, передающее энергию порциями от источника в колебательную систему. **Обратная связь** — устройство, с помощью которого колебательная система управляет работой клапана.

Заметим, что в некоторых автоколебательных системах все эти четыре элемента можно легко выделить (см. рис. 1.16). В других случаях эти элементы выделить труднее. Но на самом деле невозможно ни одна автоколебательная система, где бы отсутствовал хотя бы один из этих четырех элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие системы мы называем автоколебательными?
2. Чем автоколебания отличаются от свободных колебаний; от вынужденных?
3. От чего зависит частота автоколебаний?
4. От чего зависит амплитуда автоколебаний?
5. Приведите примеры автоколебательных систем.
6. Назовите основные элементы автоколебательной системы.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1.1. Изготовьте математический маятник, используя нить с грузом, закрепленную в дверном проеме. Определите период и частоту колебания маятника, а также их зависимость от длины маятника. Изучите, зависит ли период колебания маятника от амплитуды при малых отклонениях от положения равновесия.

1.2. В качестве груза для математического маятника возьмите небольшой полиэтиленовый (полистироловый) флакон из-под шампуня. Дно этого флакона проткните иголкой. Заполните флакон водой (лучше, если это будут марганцовка или чернила). Маятник подвесьте в дверном проеме и подложите под него белый лист бумаги. Затем приведите маятник в колебательное движение, а бумагу начните медленно перемещать по полу. Вы получите график, по которому определите период колебания, амплитуду и зависимость амплитуды от времени колебания.

1.3. В дверном проеме закрепите два маятника одинаковой длины (флаконы из-под шампуня, наполненные подкрашенной водой, и нить). Затем произведите запись колебаний маятников (синфазные колебания и колебания в противофазе). По графикам установите, что у них общего, в чем различие.

1.4. В дверном проеме закрепите на крючке резиновую нить, на свободный конец которой подвесьте небольшой груз. Сначала поддержите груз рукой так, чтобы нить не растянулась, а затем уберите руку. Понаблюдайте за движением груза и опишите это движение.

1.5. Определите коэффициент жесткости имеющейся у вас ре-

зиновой нити. Рассчитайте по известной формуле период колебания подвешенного на резиновой нити груза, если известна его масса. Затем проведите опыт по определению периода колебания этого маятника и сравните полученные результаты с расчетными.

1.6. С помощью часов с секундной стрелкой определите период колебания качелей на детской площадке. Определите периоды колебаний одних и тех же качелей, когда на них в одном случае качается маленький ребенок, а в другом — подросток. Сравните значения полученных периодов.

1.7. В дверном проеме закрепите маятник, используя резиновую нить. Приведите маятник в колебательное движение и проследите за изменением длины резиновой нити. Запишите, какие физические величины изменяются при этом. Можно ли этот маятник принять за математический?

1.8. Зажмите в тисках стальную пластинку, например полотно от ножовки, и закоптите кусок стекла. Приведите пластинку в колебание и проведите по ее краю закопченным стеклом. На что похожа полученная осциллограмма? Являются ли колебания стальной пластинки гармоническими?

1.9. Выполните задание 1.8, но свободный конец стальной пластинки сделайте короче. Как изменится форма осциллограммы? Сравните частоты колебаний длинной и короткой пластинок.

Глава 2. ВОЛНЫ

§ 2.1. ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛН

I. Многим, наверное, приходилось видеть явление на поверхности воды, когда бросили в воду камень и от него пошли круги. Такой процесс распространения возмущения представляет собой *волну*.

Чтобы лучше понять это явление, надо проделать следующий опыт.

На поверхность воды в сосуде поместите легкий поплавок. Осторожно положите еще один. Взаимодействия между поплавками нет, поэтому появление второго поплавок никак не отразится на первом.

Теперь легким движением заставьте один из поплавков совершать колебания. Вы увидите, что от поплавка, который привели в колебательное движение, по воде идут круги — *волны*. Через некоторое время начнет колебаться и второй поплавок, перемещаясь вверх и вниз, благодаря энергии, полученной от волны.

Продолжим опыт. На поверхность воды между поплавками положите какой-нибудь легкий предмет, например спичку. Вы увидите, что спичка не увлекается волной вперед. Она совершает колебания вверх и вниз, проходя *положение равновесия, которое остается на одном месте*. Значит, частицы воды не переносятся волной в направлении ее распространения.

Проделайте еще один опыт.

Один конец длинного шнура закрепите в опоре, а другой конец приведите в колебательное движение. Вы увидите, что вдоль шнура что-то бежит, в то время как оба конца остаются на месте. Вот то, что бежит вдоль шнура, также называется *волной*. Это явление так и называют — *бегущая волна*.

II. Почему же возникают волны?

Во всех наших примерах источником волн являются колебания. Колеблются частицы на поверхности воды, деформированной поплавком, колеблется конец деформированного шнура. За частицей, начавшей колебаться первой, в колебательное движение по очереди приходят и другие частицы (ее «соседи»), которые связаны между собой силами упругости. Они повторяют те же колебания, что и первая частица, но с некоторым запаздыванием по фазе.

Колебания, распространяющиеся от точки к точке, называются *волной*. При этом процессе происходит передача энергии так же от точки к точке, но переноса какого-либо вещества нет.

III. Хорошей моделью для образования волны в шнуре может служить цепочка маленьких шариков-точек, между которыми действует сила упругости. Масса каждого шарика равна m . Можно представить себе, что между шариками расположены маленькие упругие пружинки, деформация которых наглядно показана на рисунке 2.1.

Пусть точка 1 получает толчок вверх и равновесие ее нарушается. Она начинает двигаться с некоторой скоростью вверх (рис. 2.1, а). Пружинка, связывающая ее с точкой 2, растягивается, возникает сила упругости, которая действует не только на точку 1, но и на точку 2. Следовательно, начинает колебаться и точка 2. Это приводит к растяжению следующей пружинки и т. д. Так как у всех шариков одинаковые массы, а у пружинок одинаковые коэффициенты жесткости, все точки (каждая около своего положения равновесия) будут колебаться с одинаковыми периодами и одинаковыми амплитудами, но начнутся эти колебания неодновременно: точка 2 начнет колебаться позже точки 1, точка 3 — позже точки 2 и т. д.

Через четверть периода точка 1 достигнет амплитудного отклонения и остановится, но вслед за ней уже начали движение точки 2 и 3, а точка 4 только получила толчок (рис. 2.1, б). Затем точка 1 вернется в положение равновесия, которое и пройдет с максимальной скоростью вниз, а точка 4 отклонится на полную амплитуду вверх. Теперь точка 7 получит толчок; на это потребуются еще одна четверть периода (рис. 2.1, в).

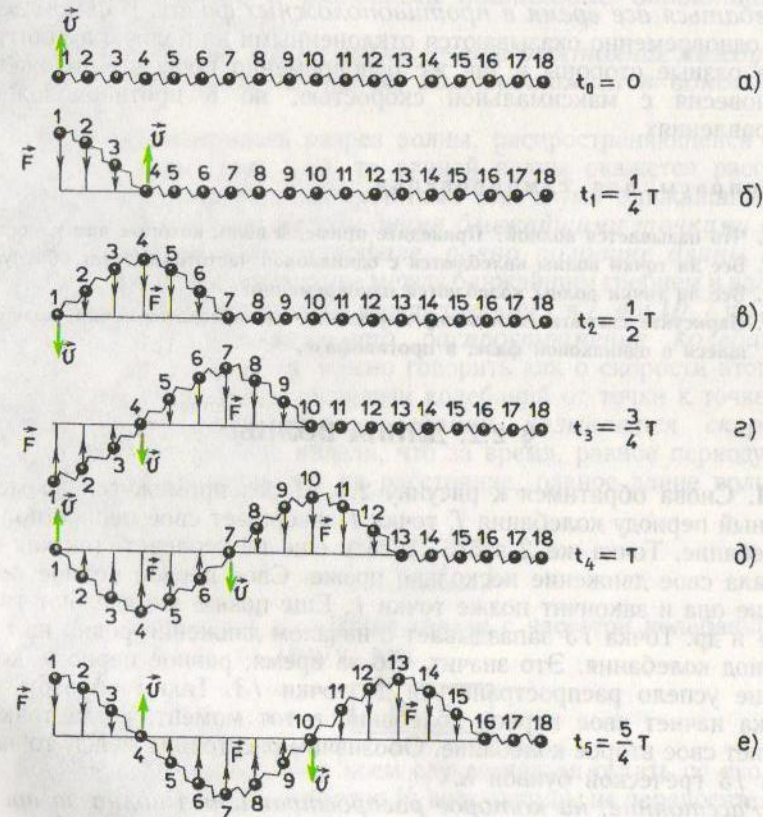


Рис. 2.1

К концу третьей четверти периода точка 1 отклонится на полную амплитуду вниз (рис. 2.1, *з*), точка 4 будет проходить положение равновесия с максимальной скоростью тоже вниз, точка 7 отклонится на полную амплитуду вверх, а точка 10 получит толчок. Наконец, к концу периода точка 1 завершит полное колебание и снова придет в положение равновесия, которое пройдет с максимальной скоростью вверх (рис. 2.1, *д*). Точка 4 в это же время отклонится на полную амплитуду вниз, точка 7 пройдет положение равновесия с максимальной скоростью вниз, точка 10 отклонится на полную амплитуду вверх, потянет за собой точки 11 и 12 и сообщит точке 13 толчок (см. рис. 2.1, *д*).

IV. Таким образом, видно, что точки 1 и 13 все время колеблются одинаково. Так, еще через четверть периода они обе окажутся отклоненными на полную амплитуду вверх (рис. 2.1, *е*), а через следующую четверть периода они одновременно будут проходить положение равновесия с максимальной скоростью, направленной вниз. Поэтому можно сказать, что эти колеблющиеся точки находятся все время в *одинаковой фазе*. А точки 1 и 7 или 4 и 9 *будут колебаться все время в противоположных фазах*. В самом деле, они одновременно оказываются отклоненными на полную амплитуду, но в разные стороны и так же одновременно проходят положение равновесия с максимальной скоростью, но в противоположных направлениях.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется волной? Приведите примеры волн, которые вам известны.
2. Все ли точки волны колеблются с одинаковой частотой? Ответ обоснуйте.
3. Все ли точки волны колеблются одновременно?
4. Нарисуйте схематически волну и укажите, где находятся точки, колеблющиеся в одинаковой фазе; в противофазе.

§ 2.2. ДЛИНА ВОЛНЫ

I. Снова обратимся к рисунку 2.1. Через промежуток времени, равный периоду колебания T , точка 1 завершает свое первое полное колебание. Точка же 2 этого сделать еще не успевает, так как она начала свое движение несколько позже. Свое первое полное колебание она и закончит позже точки 1. Еще позже это сделают точки 3, 4 и др. Точка 13 запаздывает с началом движения ровно на один период колебания. Это значит, что за время, равное периоду, колебание успело распространиться до точки 13. Таким образом, эта точка начнет свое первое колебание в тот момент, когда точка 1 начнет свое второе колебание. Обозначим расстояние между точками 1 и 13 греческой буквой λ .

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебания, называется *длиной волны* λ .

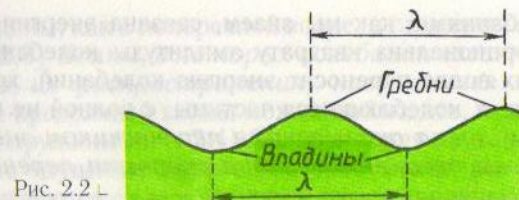


Рис. 2.2

Таким образом, точка, расположенная на расстоянии 2λ от точки 1, начнет свое первое колебание в тот момент, когда точка 1 будет начинать свое третье колебание, а точка 13 — второе и т.д. Следовательно, эти точки движутся одинаково, т.е. они одновременно движутся вверх, вместе проходят через положение равновесия, одновременно движутся вниз и одновременно заканчивают очередное колебание. И не только эти точки, но и любые другие, которые находятся друг от друга на расстоянии, кратном длине волны λ (2λ и т.д.). Поэтому можно сказать, что *длина волны — это расстояние между двумя ближайшими точками в волне, движущимися одинаково и имеющими одинаковые отклонения от положения равновесия*.

Иными словами, *длина волны — это расстояние между двумя ближайшими точками волны, колеблющимися в одной и той же фазе*.

Если рассматривать разрез волны, распространяющейся на поверхности воды (рис. 2.2), то длиной волны окажется расстояние между двумя ближайшими гребнями или двумя ближайшими впадинами. Расстояние между двумя ближайшими точками волны, колеблющимися в противофазе, равно половине длины волны. На рисунке 2.2 это расстояние между ближайшим гребнем и впадиной, на рисунке 2.1 — расстояние между точками 1 и 7, 4 и 10, 7 и 13 и т.д.

II. Упругая волна — это распространение колебаний в упругой среде. Поэтому можно говорить как о скорости этого процесса, так и о скорости передачи колебаний от точки к точке. Скорость распространения колебаний называется *скоростью волны*. Мы только что видели, что за время, равное периоду T , колебание распространяется на расстояние, равное длине волны λ .

Значит,

$$\lambda = vT.$$

Так как период T колебания связан с частотой колебаний соотношением $T = 1/\nu$, то $\lambda = v/\nu$, или

$$v = \lambda \nu.$$

Скорость волны v ни в коем случае нельзя путать со скоростью движения колеблющихся частиц V : ведь частицы не переносятся вместе с волной.

III. С колебаниями, как мы знаем, связана энергия. Напомним, что она пропорциональна квадрату амплитуды колебания. Поэтому при колебаниях волна переносит энергию колебаний, хотя носители этой энергии, т. е. колеблющиеся частицы, с волной не переносятся. Таким образом, *волна оказывается переносчиком энергии*. А это означает, что *скорость волны равна скорости переноса энергии волной*.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется длиной волны?
2. Что мы понимаем под скоростью волны?
3. Каково соотношение между скоростью волны, длиной волны, периодом или частотой колебаний частиц?
4. Как доказать, что волна переносит энергию?

Упражнения

1. Расстояние между соседними гребнями волны на поверхности моря равно 8 м. Период колебания лодки, качающейся на волне, равен 2,5 с. Чему равна скорость волны?
2. Волна с частотой колебаний 165 Гц распространяется со скоростью 330 м/с. Какова длина волны?

§ 2.3. ПОПЕРЕЧНЫЕ И ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

I. По рисунку 2.1 мы рассмотрели возникновение волны на модели, представляющей цепочку шариков-точек, связанных между собой силами упругости пружинок. На этой модели видно, как распространяются колебания, которые вызваны тем, что точка *1* получила толчок вверх, т. е. она стала колебаться вдоль вертикальной прямой. Сами же колебания распространяются по горизонтальной линии (см. рис. 2.1, 2.2). *Волны, в которых колебания частиц происходят перпендикулярно направлению распространения самой волны, называются поперечными.*

Чтобы возникла поперечная волна, необходима деформация пружинки, т. е. между частицами должна действовать сила упругости. При распространении поперечной волны цепочка меняет свою форму, что хорошо видно в опыте с волной, распространяющейся вдоль шнура. На шнуре появляются гребни и впадины. Длина волны соответствует расстоянию между двумя ближайшими гребнями или впадинами.

II. Но волну вдоль цепочки (см. рис. 2.1) можно вызвать и иначе. Мы могли бы отвести точку *1* не вверх или вниз, а влево или вправо. Это тоже заставило бы ее колебаться, и эти колебания также распространялись бы вдоль всей цепочки. Однако в этом случае прямая, вдоль которой происходят колебания точек, совпадает с прямой, вдоль которой эти колебания распространяются. При этом образуются не

гребни и впадины, как в поперечной волне, а *сгущения и разрежения точек* (рис. 2.3). *Волны, в которых колебания частиц происходят вдоль линии их распространения, называются продольными.* Образование продольной волны можно наблюдать, вызвав колебания одного конца пружины (рис. 2.4). Толкнув конец пружины, мы создаем в этом месте сгущение витков, которое бежит по пружине. Эти сгущения чередуются с разрежениями, тоже перемещающимися вдоль пружины.

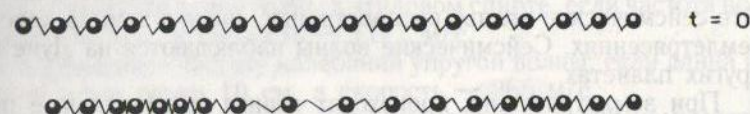


Рис. 2.3

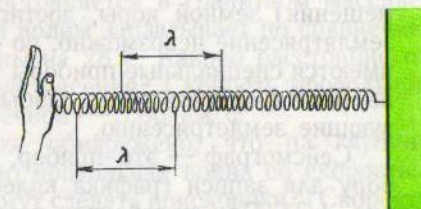


Рис. 2.4

Формулы для поперечной волны, связывающие длину, скорость, частоту и периоды колебания, справедливы и для продольной волны. *Длина продольной волны соответствует расстоянию между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями.*

III. В жидкостях и газах могут возникать только продольные волны. В самом деле, в жидкой или газообразной среде при сжатии или разрежении возникают упругие силы, действующие между соседними слоями. Этого достаточно для того, чтобы в веществе возникли продольные упругие волны. Очевидно, что в твердых телах также возможны продольные волны, поскольку и в твердых телах при их сжатии или растяжении возникают упругие силы.

Иначе обстоит дело с поперечными волнами. Для их возникновения необходимо, чтобы в веществе возникали упругие силы при сдвиге одного слоя относительно другого (см. рис. 2.1). Но таким свойством обладают только твердые тела. В жидкостях и газах вследствие их текучести силы упругости при сдвиге слоев не возникают. Поэтому *поперечные упругие волны возникают только в твердых телах*. Скорость упругих волн зависит от упругих свойств вещества и его плотности.

IV. Заметим, что на поверхности жидкости могут возникать и поперечные волны (см. рис. 2.2). Однако они вызваны не упругими силами, а действием *силы тяжести*.

V. Волны, наблюдаемые в природе, нередко переносят огромную энергию. Например, морские волны обладают большой мощностью. Они нередко бывают причиной гибели кораблей в море, размывания берегов, разрушения причалов и т. д.

Особенно страшные разрушения производят гигантские морские волны — цунами.

Энергию морских волн можно использовать и на благо человека, если создать устройство, позволяющее преобразовывать ее в электрическую энергию. Подобные преобразователи позволили бы более экономно использовать невозобновляемые источники энергии: нефть, газ, каменный уголь. Кроме того, они не загрязняли бы окружающую среду.

Есть волны, которые человеку приносят большие бедствия. Это сейсмические волны, распространяющиеся в земной коре при землетрясениях. Сейсмические волны наблюдаются на Луне и на других планетах.

При землетрясениях происходят сдвиги (вертикальные перемещения) земной коры, достигающие 10–15 м. Предотвратить землетрясение невозможно, но его можно предсказать. Для этого имеются специальные приборы — *сейсмографы*, которые способны регистрировать очень слабые сейсмические волны, предшествующие землетрясению.

Сейсмограф — это прибор, действие которого подобно прибору для записи графика колебаний пружинного маятника (см. рис. 1.3). При колебаниях почвы возникают колебания корпуса прибора, на котором укреплен груз, висящий на пружине. Скрепленное с маятником пишущее устройство фиксирует колебания почвы на вращающемся барабане.

По записи колебаний почвы можно судить о начинающемся землетрясении, его силе и расстоянии до очага землетрясения (эпицентра). Для определения расстояния учитывается тот факт, что скорость продольных волн в земной коре (около 3 км/с) больше скорости поперечных волн (около 2 км/с). По времени запаздывания и разности скоростей продольной и поперечной волн можно вычислить расстояние до эпицентра.

VI. Этим же методом пользуются и для исследования земной коры. Он называется *сейсмической разведкой*. На определенной глубине производится взрыв, и сигнал регистрируется сейсмографами. Зная расстояние между местом взрыва и сейсмографом и зная, насколько поперечная волна запаздывает по сравнению с продольной, можно определить, из каких минералов состоит исследуемый участок земной коры.

Если же окажется, что сейсмограф регистрирует только продольную волну, то это означает, что взрывная волна прошла через какую-то жидкую среду. Так с помощью сейсмической разведки находят нефтеносные слои или подземные скопления воды.

Вопросы для самопроверки

1. Какие волны называются поперечными, а какие продольными?
2. Какие волны возможны в жидкостях и газах? Ответ обоснуйте.
3. Какие волны возможны в твердых телах? Ответ обоснуйте.

4. На поверхности жидкости образуются поперечные волны. Не противоречит ли это тому положению, что в жидкостях возможны лишь продольные упругие волны?
5. Как определить расстояние от эпицентра землетрясения до сейсмографической станции?
6. Как производится сейсмическая разведка?

Упражнения

1. Определите длину волны в этиловом спирте, если частота волны равна 20 кГц, а скорость — 1177 м/с.
2. Определите частоту колебаний упругой волны, если длина волны в гелии равна 10 см, а скорость — 965 м/с.
3. Сейсмическая волна распространяется в гранитном массиве. При этом сигнал от поперечной волны запаздывает по сравнению с сигналом от продольной волны на 28 с. Каково расстояние от сейсмографа до эпицентра землетрясения? Скорость продольной волны равна 5,40 км/с, поперечной — 3,85 км/с.
4. При сейсмической разведке обнаружено, что на глубине 1,5 км распространяется только продольная волна со скоростью около 1300 м/с. Какой вывод могут сделать поисковики? (Скорость звука в нефти равна 1,33 км/с.)
5. При сейсмической разведке в слое песчаника оказалось, что скорость продольной волны на некотором участке возросла с 2900 м/с до 4000 м/с. Какой вывод могут сделать поисковики? (Скорость звука в каменной соли равна 4,4 км/с.)

§ 2.4. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

I. Человек живет в мире звуков. Звуки — это то, что слышит ухо. Мы слышим голоса людей, пение птиц, звуки музыкальных инструментов, шум леса в ветреную погоду, шум прибоя морских волн, гром во время грозы. Звучат работающие машины, движущийся транспорт. *Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется акустикой.* (Слово «акустика» образовано от греческого слова *akustikos* — звуковой.)

Источники звука — это колеблющиеся тела, что видно хотя бы из наблюдения за звучащей струной музыкального инструмента. Кажется, что она как бы утолщается, особенно в середине. Вид струны меняется именно вследствие ее колебаний.

При изучении звуковых явлений применяют в качестве источника звука специальный прибор — камертон. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке (рис. 2.5). Ножка камертона обычно закрепляется на деревянном ящике (назначение ящика мы выясним в дальнейшем).

Ударив по камертону молоточком, мы услышим чистый музыкальный звук. Поднеся маленький шарик к звучащему камертону,

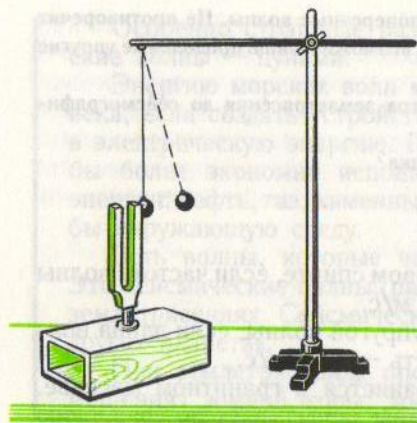


Рис. 2.5

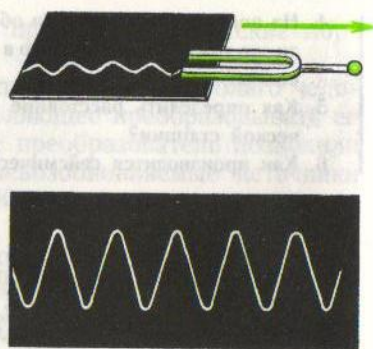


Рис. 2.6

заметим, что шарик отскакивает от него. Это доказывает, что ножки звучащего камертона колеблются.

Здесь, как и в случае колебаний маятника, камертон сам может записать свои колебания. Для этого к ножке камертона крепят острие и быстро проводят им по закопченной пластинке (рис. 2.6). Выписывается знакомая синусоидальная линия. Следовательно, ножки камертона совершают гармонические колебания.

II. Человек воспринимает в качестве слышимого звука волны с частотами от 16 Гц до 20 кГц. Упругие волны с частотами более 20 000 Гц называются *ультразвуками*, с частотами менее 16 Гц — *инфразвуками*.

Скорость ультразвуков и инфразвуков такая же, как и у слышимого звука. А из формулы $\lambda = v/\nu$ следует, что длина ультразвуковой волны намного меньше, чем у обычного звука, а у инфразвука — больше. Главная особенность ультразвуковых волн состоит в том, что их можно сделать остронаправленными, т. е. распространяющимися по определенному направлению от источника. Эта их особенность находит широкое применение в технике.

III. Между источником звука и ухом, воспринимающим звук, находится какая-то среда, обладающая упругостью, чаще всего воздух. Именно в этой среде распространяются звуковые волны, действующие на барабанную перепонку уха, колебания которой и воспринимаются как звук.

Наличие какой-либо упругой среды для передачи звука обязательно. Если откачать воздух из-под колокола воздушного насоса, то мы не услышим звучания находящегося там электрического звонка.

Рассмотрим вопрос: как образуются звуковые волны? Колеблющиеся стенки колокольчика (рис. 2.7) толкают частицы среды в направлении своего отклонения и таким образом создают в этом месте сгущение воздуха. Затем это сгущение сменяется разрежением. Распространяются такие сгущения и разрежения по линии колебаний стенок колокольчика. Следовательно, *звуковая волна в воздухе*



Рис. 2.7

представляет собой продольную упругую волну, в которой колебания частиц происходят вдоль ее распространения.

IV. Звук может распространяться в жидкой и твердой среде. Тот, кто нырял в реку или море, знает, что под водой хорошо слышны звуки гребных винтов теплоходов, удары камней и др. Звук движущегося поезда хорошо слышен, если приложить ухо к рельсу. По земле хорошо передается звук от удара копыт бегущей лошади.

V. Гром мы всегда слышим с некоторым запаздыванием, достигающим иногда десятков секунд после блеска молнии. Но ведь гром и молния возникают одновременно. Почему же мы слышим гром позднее, чем видим молнию? Это связано с тем, что скорости звука и света различны. Свет распространяется почти мгновенно: его скорость огромна — 300 000 км/с. Скорость же звука значительно меньше: она равна скорости упругих волн.

Для измерения скорости звука нужно иметь источник, издающий одновременно звук и излучающий свет, например артиллерийское орудие.

На определенном, точно измеренном от орудия расстоянии находится наблюдатель. С помощью секундомера по вспышке от выстрела фиксируют момент начала распространения звука и момент восприятия звука. Затем, разделив расстояние от источника звука до наблюдателя на время распространения звука, определяют скорость звука. Эта скорость зависит от температуры: при 0 °C в воздухе она равна 331 м/с. Измерения скорости звука в различных средах показали, что в твердых телах и жидкостях она значительно больше, чем в воздухе.

Вопросы для самопроверки

1. Что мы называем звуком?
2. Каков диапазон частот, воспринимаемых человеком?
3. Что такое ультразвук; инфразвук?
4. Может ли звук распространяться в вакууме?
5. Почему мы гром слышим значительно позже вспышки молнии?

Упражнения

1. Определите диапазон длин волн, воспринимаемых человеком. Звук распространяется в воздухе при температуре 20°C . Скорость звука в воздухе около 340 м/с .
2. Решите эту же задачу при условии, что звук распространяется в воде при той же температуре. Скорость звука в воде около 1500 м/с .
3. Раскат грома прозвучал через 15 с после вспышки молнии. На каком расстоянии от наблюдателя произошел грозовой разряд?
4. Наблюдатель находится на расстоянии 250 м от человека, ударившего по колоколу. Через сколько времени после удара наблюдатель услышит звук?

§ 2.5. РЕЗОНАНС В АКУСТИКЕ

I. Резонанс, который мы рассмотрели по рисунку 1.15 (два маятника, висющие на общей перекладине), имеет место и в звуковых колебаниях. Для доказательства этого явления можно взять два камертона с одинаковой собственной частотой колебаний. Удар молоточка заставит звучать один из этих камертонов, например левый. Зажав его рукой, а следовательно, прекратив его звучание, мы услышим звучание второго камертона. Почему он звучит: ведь его колебания не возбуждались ударом молоточка? Видимо, второй камертон пришел в колебательное движение под действием дошедших до него звуковых волн, созданных колебаниями первого камертона.

Изменим частоту собственных колебаний второго камертона, изменив его массу (например, прилепив к одной из его ножек кусочек пластилина). В этом случае он не будет отзываться на колебания первого камертона, т. е., заглушив звук первого камертона, мы уже не услышим звучания второго. В первом случае частоты собственных колебаний камертонов совпадали, поэтому возник резонанс: амплитуда колебаний второго камертона была достаточно велика, чтобы звучание было слышно. Во втором же случае, когда частоты колебаний не совпадали, резонанс отсутствовал и звука второго камертона слышно не было. Рассмотренное явление имеет название *акустический резонанс*.

II. Резонируют не только камертоны. На колебания камертона отзываются и воздушные столбы в трубках. Так, звучащий камертон подносят к стеклянной трубке, опущенной в сосуд с водой (рис. 2.8). Поднимая или опуская трубку, изменяют длину столба воздуха в ней. При некоторой длине воздушного столба слышно довольно сильное его звучание. Увеличивая или уменьшая длину столба воздуха в трубке, меняют его звучание. Очевидно, что наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой колебаний камертона. Это и есть условие резонанса. Такая закрытая с одного конца трубка, создающая условие резонанса, называется *резонатором*.

III. Теперь легко понять, почему камертоны укрепляют на ящиках, открытых с одного конца. Такие ящики определенного размера для каждого камертона служат резонаторами, усиливающими его звучание (см. рис. 2.5). Резонаторами служат также трубы духовых инструментов, трубы органа. Корпуса скрипок и других струнных инструментов имеют довольно сложную форму. В результате отдельные участки имеют разные размеры и резонируют на различные частоты, что обогащает тембр инструмента (см. § 2.8).

Человек также имеет собственный резонатор — это полость рта, усиливающая издаваемые звуки.

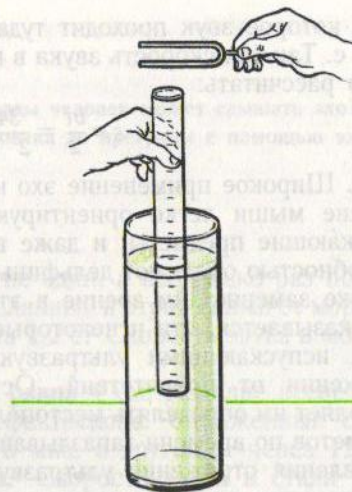


Рис. 2.8

Вопросы для самопроверки

1. Что такое акустический резонатор?
2. Для чего камертон укрепляют на деревянном ящике?
3. Как можно обнаружить явление акустического резонанса?

Упражнения

1. Если ударом молоточка возбудить камертон без резонатора, то его колебания продолжают очень долго. Если же его установить на резонаторе, то звук усиливается, но колебания затухают быстрее. Объясните это явление.
2. Собственная частота диффузора электродинамического громкоговорителя (динамика) существенно меньше диапазона звуковых частот, которые он возбуждает в воздухе. Объясните, почему это целесообразно.

§ 2.6. ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЭХО

I. С некоторыми звуковыми явлениями мы знакомы с детства. К ним относится прежде всего эхо. Эхо мы слышим как звук, отраженный от преград — гор, леса, стен больших зданий. Но эхо возникает только в том случае, когда отраженный звук воспринимается отдельно от первоначально произнесенного звука. Человеческое ухо воспринимает отдельно следующие один за другим звуки, если промежуток между ними составляет не менее $1/15\text{ с}$. Значит, эхо мы можем слышать, если расстояние s до преграды не меньше

того, которое звук проходит туда и обратно, т. е. не меньше $2s$ за $1/15$ с. Так как скорость звука в воздухе известна, то это расстояние легко рассчитать:

$$s \geq \frac{vt}{2} = \frac{340}{2 \cdot 15} \text{ м} \approx 11 \text{ м.}$$

II. Широкое применение эхо нашло в эхолокации. Известно, что летучие мыши легко ориентируются в темноте, не натываясь на окружающие предметы, и даже в темноте ловят добычу. Такой же способностью обладают дельфины, ориентирующиеся в мутной воде. Что же заменяет им зрение в этих случаях?

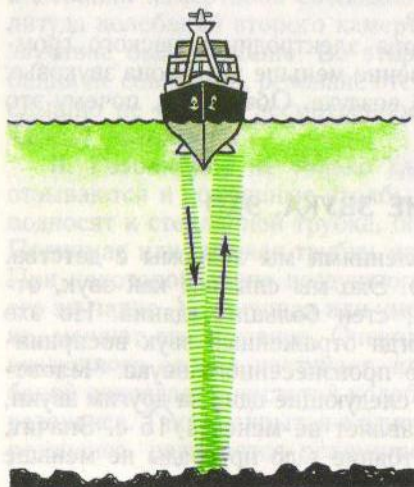
Оказывается, эти и некоторые другие животные обладают органами, испускающими ультразвук и воспринимающими их после отражения от препятствий. Острая направленность ультразвука позволяет им определять местоположения и расстояния до встречающихся предметов по времени запаздывания отраженного звукового сигнала.

Явления отражения ультразвука от препятствий используются в судоходстве для определения глубины моря, местоположения айсбергов, встречающихся судов в тумане или ночью, косяков рыб и др.

Способ определения местоположения тел по отраженным от них ультразвуковым сигналам имеет название «эхолокация». (Слово «эхолокация» образовано от латинского слова *localis* — местный, т. е. определение места с помощью эха.) С помощью специальных приборов — *эхолокаторов* — определяют местонахождение подводной лодки, а с подводной лодки — местонахождение надводного корабля.

Эхолокатор состоит из источника, излучающего ультразвуковые сигналы, и приемника. Все это укреплено на дне судна (рис. 2.9). Кроме того, эхолокатор содержит устройство, по которому определяют время запаздывания отраженного сигнала.

Рис. 2.9



III. Ультразвук используется также для обнаружения и определения различных повреждений в деталях машин (пустоты, трещины, посторонние включения). Прибор, используемый для этой цели, называется ультразвуковым *дефектоскопом*. (Слово «дефектоскоп» образовано от латинского слова *defectus* — изъян, недостаток и греческого *skopeō* — смотрю.) Его устройство будет рассмотрено в § 2.7.

В медицине ультразвук используют для обнаружения различных аномалий в теле больного и установления характера заболевания, а также непосредственно для лечения.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое эхо?
2. На любом ли расстоянии от преграды человек может слышать эхо?
3. Как определить расстояние от человека до преграды с помощью эха?
4. Где применяется явление эха?

Упражнения

1. Почему в горах эхо слышно не один, а несколько раз подряд?
2. Какова глубина моря, если посланный и отраженный от морского дна ультразвук возвратился через 1,2 с? Скорость звука в морской воде равна 1490 м/с.
3. Толщина стальной пластины равна 4 см. Изделие исследуется с помощью ультразвукового дефектоскопа. Отраженный сигнал пришел в одном месте через 16 мкс, в другом — через 12 мкс. Имеется ли в пластине дефект? Скорость звука в стали равна 5,6 км/с.
4. Эхолокатор посылает в воду сигналы импульсами. Длительность импульса равна 0,05 с, пауза между импульсами длится 1,45 с. Какие глубины можно исследовать с помощью этого прибора?

§ 2.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВ

I. Звуки, издаваемые камертоном или другими гармонически колеблющимися телами, называются *музыкальными*. Воспринимаемая музыкальные звуки, мы легко улавливаем различия между ними. Так, меняя силу удара по камертону молоточком, мы будем слышать звуки, отличающиеся по громкости. Но мы знаем, что, чем сильнее мы ударяем, тем больше амплитуда колебаний ножек камертона. При увеличении амплитуды колебаний звучащего тела увеличивается и амплитуда колебаний в звуковой волне. Значит, *громкость звука зависит от амплитуды колебаний звучащего тела*, а точнее, *от энергии колебания*.

Однако между громкостью звука и энергией колебания нет пропорциональной зависимости. Эта зависимость гораздо сложнее, что связано с особенностями нашего органа слуха. Оказывается, что если энергия звуковых колебаний увеличивается в геометрической прогрессии, то громкость растет лишь в арифметической прогрессии. Так, если энергия колебания возрастает в 10 раз, то громкость возрастает в 2 раза; если же энергия колебания возрастает в 100 раз, то громкость возрастает лишь в 3 раза.

Это позволяет человеку воспринимать звуки от шепота или шороха листьев до звуков симфонического оркестра и рева мотора самолета. Энергия звука от мотора самолета по сравнению с шепотом больше примерно в 10^{12} (т. е. в миллион миллионов!) раз, а их громкости отличаются лишь в 12 раз.

Кроме того, восприятие громкости звука нашим ухом зависит от частоты колебаний в звуковой волне. При равной амплитуде колебания мы лучше воспринимаем те звуки, частота которых лежит в пределах от 1000 до 5000 Гц.

II. По мере приближения к частотным границам, т. е. 16 Гц и 20 кГц, падает чувствительность уха и к громкости. И даже при значительной энергии колебаний на границе очень низких или очень высоких частот мы звука не услышим.

Заметим, что многие животные (собаки, летучие мыши, дельфины) прекрасно слышат ультразвуки до частот 30 кГц и выше. Летучие мыши и дельфины по ультразвукам хорошо ориентируются в темноте, а дельфины — в мутной воде. Они же с помощью ультразвуков подают сигналы друг другу.

III. Музыкальные звуки отличаются не только громкостью. Мы легко различаем низкий голос (бас) и высокий (сопрано), т. е. *тон*. Камертоны различного размера издают также звуки разного тона. *От чего же зависит высота тона?*

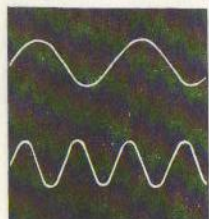


Рис. 2.10

Берут два камертона, издающие звуки разного тона, и записывают графики их колебаний (рис. 2.10). Сопоставляя эти графики со звучаниями камертонов, видят, что более высокому тону соответствует большая частота колебаний (нижняя синусоида). Следовательно, *высота тона определяется частотой колебаний*. Звуки человеческого голоса могут быть как низкого тона — басы (80—350 Гц), так и самого высокого тона — колоратурное сопрано (330—1400 Гц).

Различные шумы отличаются от музыкальных звуков тем, что им не соответствует определенная частота колебаний. Это смесь беспорядочно чередующихся звуков с самыми разными частотами.

IV. В настоящее время в музыке применяется шкала частот, составленная следующим образом. Каждая октава делится на двенадцать интервалов. На рояле им соответствуют семь белых клавишей и пять черных. Последние в нотной грамоте обозначаются знаком «диез». В пределах октавы частота возрастает в 2 раза, в пределах одного интервала — в $\sqrt[12]{2} \approx 1,06$ раза.

Ниже в таблице показаны частоты, соответствующие первой октаве.

Тон	Частота, Гц	Тон	Частота, Гц	Тон	Частота, Гц
До	261,63	Фа	349,23	Ля-диез	466,16
До-диез	277,18	Фа-диез	369,99	Си	493,88
Ре	293,67	Соль	392,00	До второй октавы	523,25
Ре-диез	311,13	Соль-диез	415,31		
Ми	329,63	Ля	440 (точно)		

Заметим, что тон ре-диез иначе называется ми-бемоль, соль-диез — ля-бемоль и т. д.

V. Особое качество звука — это характерная для каждого голоса или музыкального инструмента окраска звука, которая называется *тембром*. Именно по тембру мы узнаем голос человека или различаем инструменты, которые используют одну и ту же мелодию в одной тональности и с одинаковой громкостью.

VI. От чего же зависит тембр звука?

Оказывается, что любой источник звука (за небольшими исключениями, например камертон) совершает сложные несинусоидальные колебания. Их можно наблюдать при помощи известного прибора осциллографа. Если к нему подключить микрофон и пропеть какую-нибудь мелодию, то на экране осциллографа появится не синусоида, а более сложная кривая (рис. 2.11).

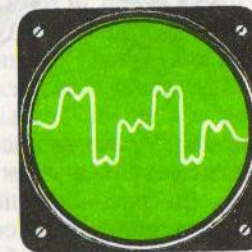


Рис. 2.11

Несинусоидальное колебание может быть представлено в виде суммы гармонических колебаний с разными частотами. Колебание с наименьшей частотой называется *основным тоном*, колебание с более высокой частотой называется *обертоном* или *гармоникой*.

Тембр звука при одном и том же основном тоне определяется наличием тех или иных гармоник. Этим же определяется и форма осциллограммы.

Вопросы для самопроверки

1. Чем определяется громкость звука?
2. Пропорциональна ли громкость звука энергии колебания?
3. Воспримем ли мы в качестве звука упругую волну в воздухе с большой энергией, если ее частота меньше 16 Гц; больше 20 кГц?
4. Воспринимают ли животные ультразвуки? Приведите примеры.
5. От чего зависит высота тона?
6. Что мы понимаем под тембром звука?
7. Чем определяется тембр звука?
8. Что такое основной тон; обертоны (гармоники)?

Упражнения

1. Как определить частоты музыкальных тонов второй октавы, используя рассмотренную выше таблицу?
2. Определите частоты тона ля второй и третьей октав.
3. Пусть энергия колебания возросла в 10 000 раз. Во сколько раз возрастет громкость звука?
4. Сколько примерно октав укладывается в диапазоне звуков, воспринимаемых человеком?

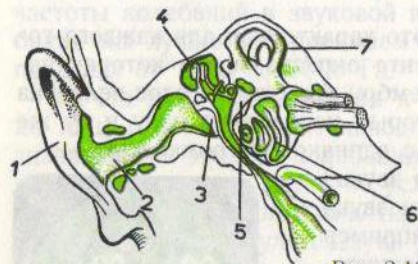


Рис. 2.12

I. Орган слуха — ухо человека (рис. 2.12) — имеет довольно сложное строение. Наружное ухо образуют ушная раковина 1 и наружный слуховой проход 2. Барабанная перепонка 3 отделяет наружное ухо от среднего уха. Это небольшая камера, содержащая три крошечные косточки 4: молоточек, наковальню и стремечко. Молоточек соприкасается с барабанной перепонкой, стремечко — с овальным окном 5, которое служит входом во внутреннее ухо, где расположены нервные окончания.

Внутреннее ухо состоит из ряда сообщающихся каналов, образуя так называемый лабиринт. Из этого лабиринта лишь улитка 6, соединенная со слуховым нервом, имеет отношение к слуху. Три полукружных канала 7 образуют орган равновесия, позволяющий человеку ориентироваться в пространстве. Внутри улитки 6 находятся каналы, наполненные жидкостью (лимфой). В среднем канале находится кортиев орган — система окончаний нервных клеток, воспринимающих звуки и передающих их в мозг.

II. Кортиев орган состоит из пяти рядов клеток с выступающими над ним волосками, которые тянутся вдоль всей длины спирали улитки. Всего они образуют около 4800 волокон, содержащих по пять клеток на каждом волокне. Эти клетки образуют основную мембрану, причем волокна мембраны имеют разную длину: они короче у основания улитки и длиннее в ее вершине.

III. Восприятие звука происходит следующим образом. Звуковая волна, пройдя по наружному слуховому проходу, доходит до барабанной перепонки 3 и вызывает ее вынужденные колебания. Эти колебания проходят через косточки среднего уха 4, которые служат своеобразным усилителем, и поступают в овальное окно 5. Овальное окно вызывает колебания лимфы и через нее — колебания волокон улитки. Сильнее всего раздражаются волокна, собственная частота которых совпадает с частотой звука (явление резонанса). Именно благодаря этому мы различаем тона и ощущаем разницу в тембре.

По существу, кортиев орган осуществляет анализ поступающей в ухо звуковой волны и передает соответствующую информацию в мозг, где она анализируется по тону, громкости и тембру.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите устройство органа слуха человека и укажите функции основных частей (ушной раковины, барабанной перепонки и др.).
2. Что представляет собой кортиев орган?
3. Каким образом нам удается различать звуки по высоте тона? Какое физическое явление способствует этому?

2.1. Понаблюдайте за картиной распространения поперечных волн. Для этого в воду водоема (пруд, озеро, бассейн) бросьте камень, а в воду в ванне — монету. Оцените скорость распространения волны.

2.2. Плоскую тарелку наполните водой почти до самого верха, а в качестве генератора волн используйте капельницу (пипетку). Набегая на стенку тарелки, волны быстро затухают и почти не отражаются. Наблюдайте волны лучше по тени на дне тарелки при прямом солнечном свете или при свете яркой лампы. Однако волны, бегущие со скоростью около 10 см/с, сливаются для взгляда, фиксированного неподвижно на тарелке; они видны только вблизи источника, где амплитуда колебания велика. Чтобы увидеть их на всей поверхности воды, нужно быстро поворачивать голову. В результате проведенных опытов оцените длину поперечной волны.

2.3. Положите на поверхность воды кусочки пробки или дерева. Возбудив поперечную волну на поверхности воды, наблюдайте, как ведут себя эти предметы: перемещаются с волной или колеблются на месте.

2.4. Определив длину волны и частоту колебаний кусочка пробки или дерева на поверхности воды, найдите скорость поверхностной волны.

2.5. Струны музыкальных инструментов испускают звуки. На примере гитары или другого струнного инструмента проверьте, в чем отличие звуков, испускаемых толстыми струнами, от звуков, испускаемых тонкими струнами, если их длины и натяжения одинаковы.

2.6. Перемещая палец по грифу, исследуйте, как зависит высота тона от длины свободной части струны.

2.7. Зафиксируйте высоту тона звука электропилы, работающей на холостом ходу и под нагрузкой. Объясните, почему изменяется высота тона.

2.8. Подуйте вблизи отверстия пустой бутылки, а затем вблизи отверстия бутылки, заполненной наполовину водой. Объясните, почему высота тона разная, если даже вы дуете с одинаковой силой.

2.9. Поставьте на диск электрофона грампластинку и установите регулятор скорости электропроигрывающего устройства последовательно на 33,3; 45; 76 об/мин. Установите, как изменяется высота тона при воспроизведении одной и той же грамзаписи.

2.10. Определите по высоте тона звука, порождаемого крыльями летящей пчелы, куда летит пчела: из улья за медом или, наоборот, в улей с медом.

2.11. Нажмите на правую педаль рояля или пианино, поднимающую глушитель, и крикните. Проанализируйте, какие звуки слышны при этом.

2.12. Перемещая палец по грифу, добейтесь, чтобы вторая струна гитары испускала звук того же тона, что и первая струна. Не трогая первую струну, возбудите вторую и тут же ее приглушите. Что вы слышите? Объясните это явление.

Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§ 3.1. КОНДЕНСАТОР

I. Одним из основных элементов электрических цепей, где возбуждаются электромагнитные колебания, является конденсатор. (Слово «конденсатор» образовано от латинского слова condensatio — накопление, т. е. накопитель электрических зарядов.) Рассмотрим несколько видов конденсаторов, использующихся в технике.

Плоский конденсатор представляет собой систему из двух металлических электродов — пластин (обкладок), расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между пластинами находится воздух или какой-либо другой изолятор (рис. 3.1): слюда, парафинированная бумага и т. д. В технике часто используют конденсаторы с большой площадью пластин. Для того чтобы уменьшить их внешние габариты, пластины изготавливают из станиоля и между ними прокладывают парафинированную бумагу. Все это свертывают в рулон, который помещают в специальный корпус (рис. 3.2). Такой конденсатор называется бумажным.

Широко используется электролитический конденсатор (рис. 3.3). В нем одним электродом служит алюминиевая фольга, на поверхности которой при специальной обработке создается очень тонкий слой оксида алюминия, который является изолятором. Другим электродом является электролит, контактирующий с алюминиевым корпусом.

Любой конденсатор с твердым изолятором, в том числе и бумажный, включают под напряжение произвольно, ибо оба его электрода (обе пластины) совершенно одинаковы. Электролитический конденсатор включают под напряжение, строго соблюдая полярность: центральный электрод, отмеченный знаком «плюс», соединяют с положительным полюсом источника тока (анодом), а другой электрод (корпус конденсатора) соединяют с отрицательным полюсом (катодом). При неправильном включении слой оксида алюминия разрушается и конденсатор выходит из строя.

Рис. 3.1

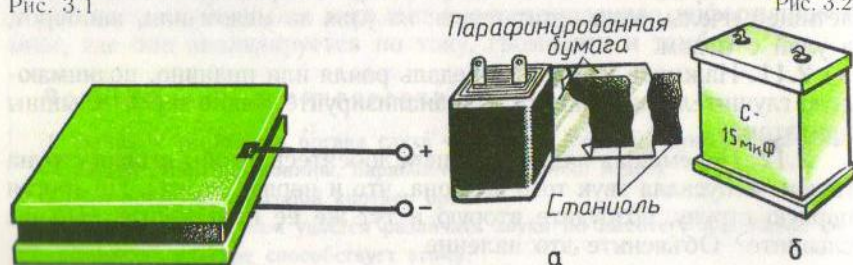
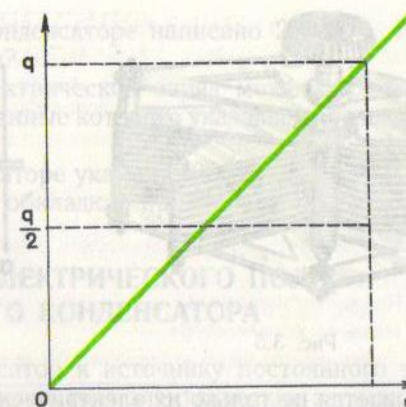


Рис. 3.3



Рис. 3.4



II. Характерная особенность конденсатора — его способность накапливать электрический заряд. Если конденсатор присоединить к источнику постоянного тока, то на его пластинах появятся равные по модулю и противоположные по знаку электрические заряды q и $-q$. При этом опыт показывает, что заряд на пластинах пропорционален напряжению (рис. 3.4):

$$q = CU.$$

Величина C называется электрической емкостью конденсатора или в краткой форме емкостью. Она равна отношению заряда на пластинах конденсатора к напряжению между пластинами: $C = q/U$.

III. Единицей электрической емкости в СИ является фарад (Ф) — в честь ученого М. Фарадея. Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает между обкладками конденсатора напряжение 1 В:

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/1 В.}$$

Фарад — это очень крупная единица. На практике же применяются дольные единицы: 1 мкФ (микрофард) = 10^{-6} Ф, 1 нФ (нанофард) = 10^{-9} Ф, 1 пФ (пикофард) = 10^{-12} Ф.

IV. Опыт и теоретические расчеты показывают, что емкость конденсатора пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Поэтому для увеличения электроемкости в бумажном конденсаторе используют длинные ленты фольги, а между ними прокладывают тонкую парафинированную бумагу (см. рис. 3.2). Из этих же соображений в электролитических конденсаторах в качестве изолирующей прокладки используют очень тонкий слой оксида алюминия.

Однако следует учесть, что, чем тоньше слой изолятора, тем меньшее напряжение выдерживает изоляция. Поэтому на конденсаторах

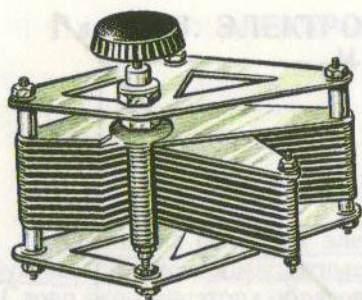


Рис. 3.5

указывается не только их электрическая емкость, но и максимальное напряжение, на которое они рассчитаны.

V. В радиотехнике необходимы конденсаторы, емкость которых можно плавно менять в определенных пределах. Проще всего это сделать, меняя активную площадь пластин. На рисунке 3.5 показан конденсатор переменной емкости.

Он состоит из *статора* — системы неподвижных пластин и *ротора* — системы пластин, поворачивающихся на оси при повороте ручки. Вдвигая подвижные пластины в промежутки между неподвижными, увеличивают активную площадь и тем самым емкость конденсатора. Поворачивая ручку в обратном направлении, емкость уменьшают. Обычно емкость меняется в пределах десятков и сотен пикофард.

Обозначения конденсаторов на электрических и радиосхемах показаны на рисунке 3.6, а, переменной емкости — на рисунке 3.6, б и электролитического — на рисунке 3.6, в.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой бумажный конденсатор?
2. Как устроен электролитический конденсатор?
3. Почему при включении электролитического конденсатора под напряжением следует следить за полярностью, а у бумажного это безразлично?
4. Как зависит заряд на пластинах конденсатора от напряжения между ними?
5. Что называется электрической емкостью конденсатора?
6. Назовите единицы электрической емкости в СИ. Дайте определения этих единиц.
7. Как устроен конденсатор переменной емкости?
8. Начертите условные обозначения разных видов конденсаторов на электрической схеме.

Упражнения

1. Найдите электрический заряд конденсатора, если его емкость 5 мкФ и он включен в цепь с напряжением 600 В.

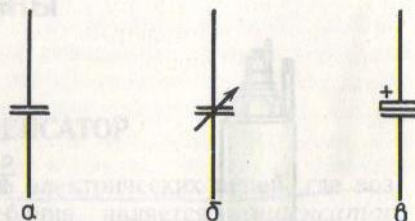


Рис. 3.6

2. На электролитическом конденсаторе написано 20 мкФ, 12 В. О чем говорят эти значения?
3. Какой максимальный электрический заряд может находиться на обкладках конденсатора, данные которого указаны в предыдущей задаче?
4. На керамическом конденсаторе указано 400 пФ, 1200 В. Каков электрический заряд на его обкладках при пробое изоляции?

§ 3.2. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

I. Если подключить конденсатор к источнику постоянного тока, то на его обкладках будут накапливаться электрические заряды противоположных знаков. Следовательно, между обкладками существует электрическое поле, которое обладает энергией.

Чтобы это доказать, используют экспериментальную установку, схема которой изображена на рисунке 3.7. Конденсатор *C* с помощью переключателя *K* может присоединяться либо к источнику постоянного тока, либо к лампе накаливания. Если переключатель *K* поставить в положение 1, то конденсатор отключается от лампы и замыкается на источник тока. Лампа при этом, естественно, не горит, но конденсатор заряжается, накапливая на своих обкладках электрический заряд. Если переключатель перевести в положение 2, то конденсатор отключается от источника тока и замыкается на лампу накаливания. При этом лампа ярко вспыхивает.

Откуда же взялась энергия для разогревания нити накала лампы? Видимо, единственным источником энергии здесь является энергия электрического поля заряженного конденсатора.

Итак, мы пришли к выводу: *электрическое поле обладает энергией, которая может превращаться в другие виды энергии.* В данном эксперименте она превращается во внутреннюю энергию раскаленной нити, которая затем выделяется в виде излучения.

II. Можно показать, что энергия электрического поля заряженного конденсатора пропорциональна квадрату заряда на его обкладках и может быть вычислена по формуле

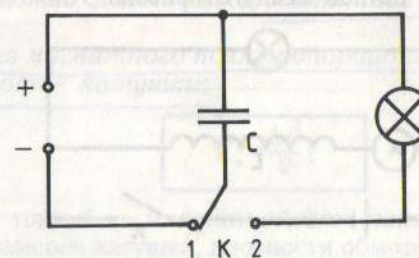


Рис. 3.7

$$E_s = \frac{q^2}{2C},$$

где q — заряд на обкладке конденсатора; C — его электрическая емкость.

Вопросы для самопроверки

1. Как доказать, что электрическое поле заряженного конденсатора обладает энергией?
2. Напишите выражение для вычисления энергии электрического поля заряженного конденсатора.
3. Дайте определение электрической емкости конденсатора в СИ.

Упражнения

1. Докажите, что из выражения $E_s = \frac{qU}{2}$ следует

$$E_s = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

2. Конденсатор емкостью 15 мкФ заряжен от источника постоянного тока напряжением 1200 В. Найдите энергию электрического поля.
3. Каков заряд на пластинах конденсатора емкостью 25 мкФ, если энергия его электрического поля равна 4 Дж?
4. Найдите емкость конденсатора, если при напряжении 1200 В энергия его электрического поля равна 2,5 Дж.

§ 3.3. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С ТОКОМ

1. Убедиться в том, что магнитное поле также обладает энергией, позволяет следующий эксперимент. Собирают электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 3.8, где к источнику постоянного тока подключают параллельно лампу накаливания и так называемую катушку индуктивности — картонный цилиндр, на который навито вплотную много витков медного провода.

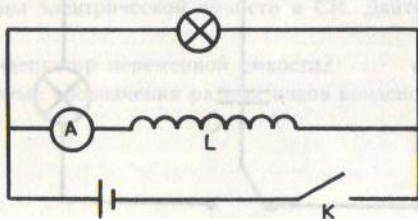


Рис. 3.8

Если замкнуть ключ K , то через катушку потечет ток, что будет видно по показаниям амперметра, и через лампу, которая начнет светиться. Размыкают ключ. Казалось бы, лампа должна мгновенно гаснуть, ибо выключают источник напряжения. Однако в момент размыкания ключа лампа ярко вспыхивает. В чем же причина данного явления?

II. В VIII классе с помощью ряда опытов вы узнали, что при протекании электрического тока по обмотке катушки вокруг нее возникает магнитное поле, особенно сильное внутри катушки. Узнали также, что при изменении магнитного поля в замкнутом проводнике, находящемся в этом поле, возникает индукционный ток (явление электромагнитной индукции).

Это позволяет нам сейчас выдвинуть гипотезу о причине, по которой лампа вспыхивает. При замыкании ключа по обмотке катушки начинает течь электрический ток, следовательно, вокруг катушки возникает магнитное поле. При размыкании ключа ток в катушке исчезает и вместе с ним должно исчезать магнитное поле. Но мы знаем, что убывающее магнитное поле по закону электромагнитной индукции возбуждает индукционный ток в замкнутой цепи, состоящей из катушки и лампы. За счет этого индукционного тока лампа и вспыхивает в момент размыкания ключа.

III. Чтобы убедиться в справедливости нашей гипотезы, рассмотрим несколько другие условия эксперимента. Внутри катушки вводят стальной сердечник, который, как и все ферромагнитные материалы, усиливает магнитное поле. Поэтому, когда это сильное поле начинает изменяться (уменьшаться), оно вызывает более сильный индукционный ток — лампа вспыхивает ярче.

Таким образом, этот опыт подтверждает нашу гипотезу: причиной вспышки лампы является исчезновение магнитного поля при размыкании ключа.

IV. Рассмотрим данное явление с энергетической точки зрения. Вспышка нити накала лампы означает, что ее температура резко возросла, следовательно, возросла внутренняя энергия нити накала. Откуда же взялась эта энергия?

Поскольку при размыкании ключа источник тока отключается от лампы, то он не может быть источником энергии, вызывающим вспышку. Остается только один источник энергии — магнитное поле.

Поэтому можно сделать вывод: магнитное поле обладает энергией.

V. Энергия магнитного поля пропорциональна квадрату силы тока в обмотке катушки:

$$E_m = \frac{Li^2}{2},$$

где i — сила тока; L — индуктивность катушки. Индуктивность зависит от размеров катушки, плотности обмотки, а также от наличия или отсутствия ферромагнитного сердечника.

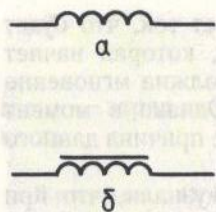


Рис. 3.9

Схематическое обозначение катушки индуктивности показано на рисунке 3.9, а, б: катушка без ферромагнитного сердечника — на рисунке 3.9, а, с ферромагнитным сердечником — на рисунке 3.9, б.

Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн). Индуктивность катушки равна 1 Гн, если при силе тока, равной 1 А, энергия магнитного поля равна 0,5 Дж.

Вопросы для самопроверки

1. Какой опыт показывает, что магнитное поле обладает энергией?
2. Как влияет на энергию магнитного поля катушки наличие в ней стального сердечника?
3. Дайте определение единицы индуктивности в СИ.

Упражнения

1. По обмотке катушки индуктивностью 0,2 Гн протекает электрический ток, равный 50 А. Определите энергию магнитного поля катушки.
2. Определите индуктивность катушки, если при силе тока, равной 5 А, энергия магнитного поля равна 1,5 Дж.
3. Определите силу тока в обмотке катушки, индуктивность которой равна 0,3 Гн, если энергия магнитного поля равна 6 Дж.

§ 3.4. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

I. В электрической цепи, состоящей из батареи конденсаторов и катушки индуктивности, возникают свободные электромагнитные колебания. Доказывают это опытом, изображенным на рисунке 3.10. Принципиальная схема установки дана на рисунке 3.11.

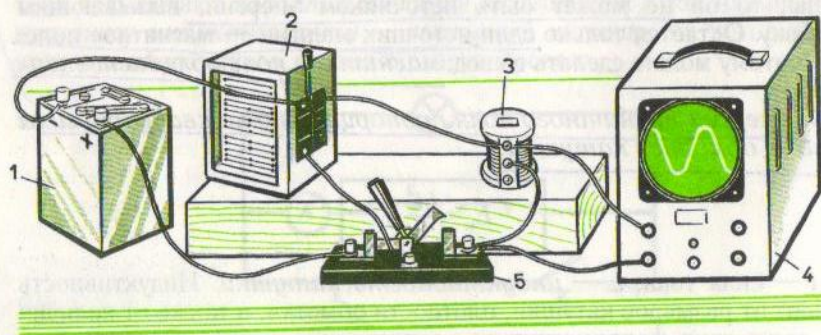


Рис. 3.10

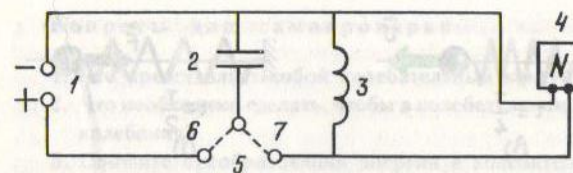


Рис. 3.11

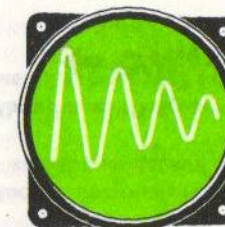


Рис. 3.12

Установка состоит из источника постоянного тока 1, батареи конденсаторов 2, катушки индуктивности 3, электронного осциллографа 4 и переключателя 5. Емкость батареи можно менять, перемещая рукоятку и включая разные конденсаторы. Можно менять и индуктивность катушки, включая большее или меньшее число витков обмотки или внося в катушку стальной сердечник.

II. Ручку переключателя поворачивают влево. (На рисунке 3.11 этому соответствует положение 6.) При этом конденсатор подключается к источнику тока и на его обкладках начинает накапливаться электрический заряд, т. е. конденсатор начинает заряжаться. Далее перебрасывают ручку переключателя вправо. (На рисунке 3.11 это положение 7.) Источник тока отключается, а к зажимам конденсатора присоединяется обмотка катушки. Конденсатор начинает разряжаться через катушку, и по обмотке начинает течь электрический ток.

На экране осциллографа появляется осциллограмма затухающего колебания (рис. 3.12). Таким образом, можно сделать вывод: *в цепи, состоящей из конденсатора и катушки индуктивности, при разрядке конденсатора возникают свободные электромагнитные колебания.* Такая цепь имеет название *колебательный контур*.

III. Явления в колебательном контуре аналогичны явлениям в пружинном маятнике. Действительно, для того чтобы возникли колебания в пружинном маятнике, пружину надо деформировать (сжать), сообщив ей потенциальную энергию (рис. 3.13, а). Аналогично, чтобы в колебательном контуре возникли колебания, следует зарядить конденсатор и таким образом сосредоточить в нем энергию электрического поля (рис. 3.13, б).

Через четверть периода деформация пружины исчезает, а груз с максимальной скоростью проходит положение равновесия. При этом потенциальная энергия пружины превратилась в кинетическую энергию груза (рис. 3.13, в). Совершенно аналогично через четверть периода конденсатор разряжается, и через обмотку катушки течет электрический ток максимальной силы. Энергия электрического поля конденсатора превратилась в энергию магнитного поля катушки (рис. 3.13, г).

Далее груз, продолжая свое движение, растягивает пружину, и к концу полупериода кинетическая энергия груза вновь превращается в потенциальную энергию пружины (рис. 3.13, д). Аналогично электрические заряды за счет энергии магнитного поля начинают

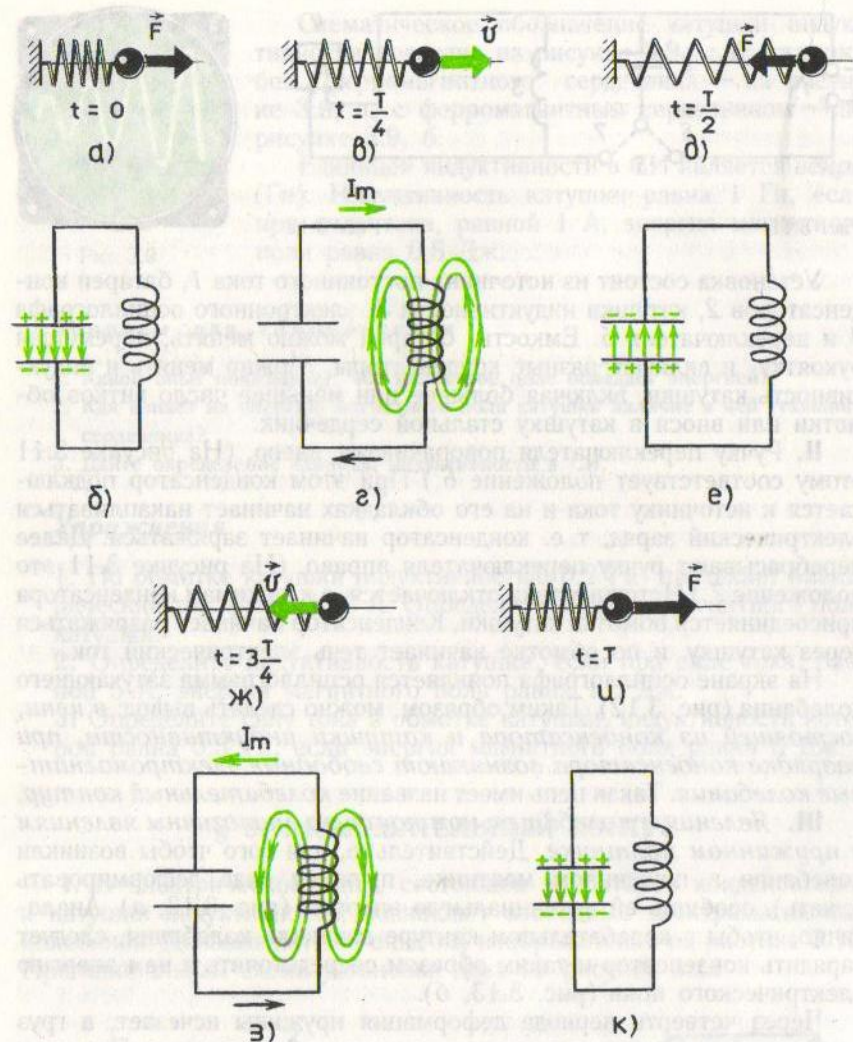


Рис. 3.13

накапливаться на обкладках конденсатора, и к концу полупериода энергия магнитного поля катушки превращается в энергию электрического поля конденсатора (рис. 3.13, е).

Процесс этот вновь повторяется, и к концу периода система возвращается в первоначальное состояние (рис. 3.13, ж, з, и, к).

IV. Вам известно, что из-за неизбежного трения свободные механические колебания затухают. Точно так же затухают и свободные электромагнитные колебания за счет сопротивления проводов. Это видно на осциллограмме (см. рис. 3.12).

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой колебательный контур? Начертите его схему.
2. Что необходимо сделать, чтобы в колебательном контуре возникли свободные колебания?
3. Опишите преобразования энергии в колебательном контуре за период.
4. В чем состоит аналогия между колебательным контуром и пружинным маятником?
5. Почему свободные электромагнитные колебания затухают? Какие преобразования энергии здесь происходят?

§ 3.5. ПЕРИОД СВОБОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОЛЕБАНИЯ

I. В установке, изображенной на рисунке 3.11, увеличивают электрическую емкость конденсатора. Видят: осциллограмма растягивается в горизонтальном направлении, следовательно, с увеличением емкости колебательного контура период электромагнитного колебания увеличивается (частота соответственно уменьшается). Когда емкость уменьшается, период колебания тоже уменьшается, а частота, естественно, возрастает.

Такой же результат получается при изменении индуктивности контура. При увеличении индуктивности период колебания возрастает, при уменьшении индуктивности период уменьшается.

Этот результат аналогичен изменению периода колебания пружинного маятника при изменении массы груза и жесткости пружины.

II. Период свободного электромагнитного колебания в колебательном контуре вычисляется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Эта формула была впервые получена в 1853 г. У. Томсоном, который за свои научные труды заслужил титул лорда Кельвина. В честь У. Томсона это выражение называется *формулой Томсона*.

Для того чтобы получить период в *секундах*, индуктивность должна быть выражена в *генри*, а емкость — в *фарадах*.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияет изменение емкости конденсатора на период свободного колебания в контуре?
2. Как влияет изменение индуктивности катушки на период свободного колебания в контуре?
3. Учитывая вопрос 2, ответьте, как при этом меняется частота свободных колебаний в контуре.
4. Как вычислить период свободного колебания в колебательном контуре?
5. В каких единицах выражаются величины, входящие в формулу Томсона?

6. Напишите выражение для вычисления частоты свободных колебаний в контуре.

Упражнения

1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 500 пФ и катушки индуктивностью 20 мГн. Определите период и частоту свободных колебаний.
2. Необходимо собрать колебательный контур частотой 2,5 МГц, используя катушку индуктивностью 1,3 мГн. Какова должна быть емкость конденсатора?
3. Для демонстрации медленных электромагнитных колебаний собирается колебательный контур с конденсатором, емкость которого равна 2,5 мкФ. Какова должна быть индуктивность катушки при периоде колебания 0,2 с?

§ 3.6. ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТРАНЗИСТОРЕ

I. Для ряда практических целей в области электротехники и радиотехники необходимы незатухающие электромагнитные колебания. Мы уже знаем, что незатухающие механические колебания бывают двух видов: *вынужденные колебания* и *автоколебания*. Точно так же и незатухающие электромагнитные колебания могут быть либо *вынужденными*, либо *автоколебаниями*.

В электротехнике используют электромагнитные колебания небольшой частоты: в России и странах Западной Европы частота равна 50 Гц, в США — 60 Гц. Незатухающие электромагнитные колебания такой частоты — это переменный ток, с которым вы познакомились в VIII классе. Вспомним, что напряжение, меняющееся по синусоидальному закону, вырабатывается с помощью специальных электрических машин — синхронных генераторов переменного тока. Если к зажимам этого генератора присоединить какую-либо электрическую цепь, то в ней возникнут вынужденные синусоидальные электромагнитные колебания — переменный ток.

II. В радиотехнике используют незатухающие электромагнитные колебания гораздо более высокой частоты: от 10^5 до 10^8 Гц, т. е. от сотен килогерц до сотен мегагерц. С помощью электрических машин получить такие частоты невозможно, поэтому в радиотехнике незатухающие электромагнитные колебания получают с помощью автоколебательных систем — *автогенераторов*.

Вспомним, что любая автоколебательная система состоит из четырех основных частей: колебательной системы 1, в которой возможны свободные колебания, источника энергии 2, не обладающего колебательными свойствами, клапана 3 и обратной связи 4 (см. рис. 1.18). Попробуем выяснить, из каких же частей должен состоять генератор электромагнитных автоколебаний.

Две из них очевидны — это колебательный контур и источник постоянного тока (гальванический элемент, аккумулятор, выпрямитель и др.). Чтобы выяснить, что в данном случае может служить клапаном, вспомним его функции. Клапан должен в течение периода свободного колебания один раз передать в колебательную систему от источника тока порцию энергии, которая компенсирует потери на затухание.

Таким устройством может служить *полевой транзистор*, свойства которого были рассмотрены в VIII классе.

III. Напомним вкратце устройство и принцип действия полевого транзистора с электронным каналом, изученного в VIII классе (рис. 3.14).

Основой транзистора является стержень из полупроводника с электронной проводимостью (*n*-типа), на поверхности которого за счет внедрения примесей создана область с дырочной проводимостью (*p*-типа). Один конец стержня присоединяется к отрицательному полюсу источника тока — этот электрод называется истоком *I*. Другой конец стержня присоединен к положительному полюсу — это сток *C*. Область с дырочной проводимостью называется затвором *З*. Область между истоком и стоком называется каналом.

IV. Меняя полярность затвора по отношению к истоку, можно менять силу тока через транзистор и тем самым поступление энергии от источника тока. Таким образом, полевой транзистор может служить клапаном в электрической автоколебательной системе. Остается только продумать механизм обратной связи — механизм воздействия колебаний в контуре на затвор транзистора.

Здесь можно использовать явление электромагнитной индукции, а более точно — принцип действия трансформатора. Вам известно, что если в первичной обмотке трансформатора протекает переменный ток, т. е. происходят колебания силы тока, то во вторичной обмотке индуцируется переменное напряжение.

Значит, рядом с катушкой колебательного контура следует поместить другую катушку. Один конец ее надо присоединить к истоку транзистора, а другой — к затвору. Колебания силы тока в катушке контура будут вызывать колебания напряжения в области затвор — исток. Ток через транзистор будет то возрастать, то исчезать. Тем

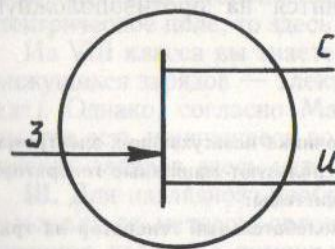


Рис. 3.14

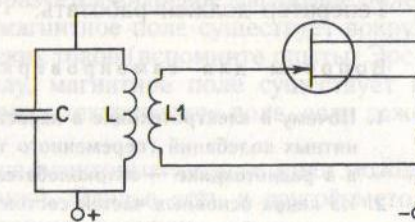
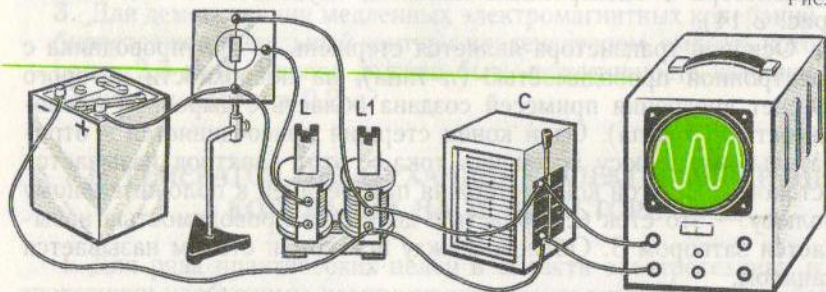


Рис. 3.15

самым будет обеспечена обратная связь между колебательной системой (колебательным контуром) и клапаном (транзистором).

V. Составные части электрической автоколебательной системы показаны на рисунке 3.15 (принципиальная схема): колебательный контур состоит из конденсатора C , катушки индуктивности L , источника постоянного тока, полевого транзистора с электронным каналом и катушки обратной связи $L1$. На рисунке 3.16 показана опытная установка, собранная по этой схеме. Как видно, на панели укреплен полевой транзистор. Источником тока служит аккумулятор или батарея гальванических элементов.

Рис. 3.16



Катушка L и батарея конденсаторов C образуют колебательный контур. Катушка $L1$ выполняет функцию катушки обратной связи.

Замкнув цепь, видят на экране осциллографа синусоидальную осциллограмму. Следовательно, данная установка, являющаяся генератором на транзисторе, служит источником незатухающих электромагнитных колебаний. Изменением емкости конденсатора или индуктивности катушки меняют частоту генерируемых колебаний. Этим подтверждается известное свойство автоколебаний: *их частота определяется собственной частотой колебательной системы.*

VI. Может случиться, что при замыкании цепи генератор не заработает. Это означает: неправильно выбрана фаза колебаний в катушке обратной связи. Надо поменять провода на этой катушке — и фаза колебаний изменится на противоположную. Генератор должен работать.

Вопросы для самопроверки

1. Почему в электротехнике в качестве источника незатухающих электромагнитных колебаний (переменного тока) используют машинные генераторы, а в радиотехнике — автоколебательные системы?
2. Из каких основных частей состоит автоколебательный генератор на транзисторе? Покажите их на принципиальной схеме.
3. Каковы функции отдельных частей генератора на транзисторе?

4. За счет какого явления возникают колебания напряжения в катушке обратной связи?
5. Начертите схему генератора на полевом транзисторе, изготовленном из полупроводника с дырочной проводимостью. Обратите внимание на полярность истока и стока.
6. Пусть генератор, собранный по схеме рисунка 3.16, работает нормально. Если снять катушку обратной связи с сердечника, то что произойдет? Ответ обоснуйте.
7. Пусть генератор, собранный по схеме рисунка 3.16, работает нормально. Если катушку обратной связи снять с сердечника, перевернуть и снова надеть на сердечник, то заработает ли генератор? Ответ обоснуйте.

§ 3.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

I. В 1860—1865 гг. один из величайших физиков XIX века Дж. Максвелл создал теорию электромагнитного поля. Математический аппарат этой теории из-за его сложности невозможно изложить в школьном учебнике. Поэтому ограничимся качественным рассмотрением некоторых важнейших следствий этой теории.

Максвелл показал, что фактически существует единый объект, называемый *электромагнитным полем*. Электрическое и магнитное поля являются лишь частными проявлениями этого поля для случая, когда они не меняются во времени. Если же поля меняются во времени, то существует единое электромагнитное поле. В каждой точке пространства одновременно меняются обе его составляющие — электрическая и магнитная.

II. С одним таким явлением мы уже встречались — это явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем в 1831 г. Согласно Максвеллу, это явление описывается так. Если в некоторой области пространства меняется во времени магнитное поле, то здесь образуется вихревое электрическое поле, т. е. электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. Если же в поле находится замкнутый проводник, то вихревое электрическое поле вызывает в нем циркуляцию свободных электрических зарядов, т. е. индукционный ток.

Из теории Максвелла вытекало, что возможен и обратный процесс: если в некоторой области пространства меняется во времени электрическое поле, то здесь же образуется вихревое магнитное поле.

Из VIII класса вы знаете, что магнитное поле существует вокруг движущихся зарядов — электрических токов (вспомните опыты Эрстеда). Однако, согласно Максвеллу, магнитное поле существует и там, где есть меняющееся во времени электрическое поле, если даже никаких зарядов здесь нет.

III. Для наглядного изображения электромагнитного поля можно пользоваться методом силовых линий. Однако есть и другой метод описания поля — с помощью векторных величин.

С двумя векторными величинами вы уже знакомы — это скорость

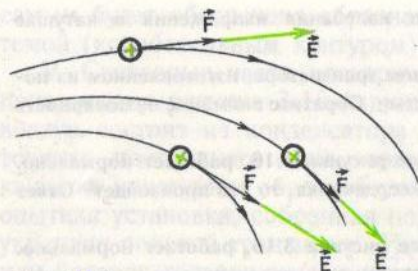


Рис. 3.17

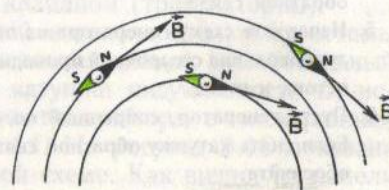


Рис. 3.18

и сила. В самом деле, эти величины имеют не только численное значение, но и определенное направление в пространстве, что указывается вектором. Как правило, направление стрелки (вектора) совпадает с направлением физической величины, а длина стрелки пропорциональна модулю этой величины. В дальнейшем векторные величины будем отмечать стрелкой над ее соответствующим символическим обозначением. Так, например, вектор скорости обозначают символом \vec{v} , вектор силы — символом \vec{F} . Символы без стрелки, например v или F , обозначают модули этих величин, т. е. их абсолютные значения.

IV. Электромагнитное поле в каждой точке пространства характеризуется двумя физическими векторными величинами — напряженностью \vec{E} и индукцией \vec{B} .

Вектор напряженности \vec{E} направлен по касательной к силовой линии электрического поля. Его направление совпадает с направлением силы, действующей на пробный положительный электрический заряд, находящийся в данной точке поля (рис. 3.17).

Вектор индукции \vec{B} направлен по касательной к силовой линии магнитного поля (рис. 3.18). Его направление совпадает с направлением, которое указывает северный полюс пробной магнитной стрелки, находящейся в исследуемой точке поля.

Вопросы для самопроверки

1. Согласно идеям Максвелла, существует единое электромагнитное поле. В каких случаях возможно существование одного только электрического поля или одного только магнитного поля? Приведите примеры.
2. Какие величины мы называем векторными?
3. Приведите примеры известных вам векторных величин.
4. Как изображаются векторы на рисунке?
5. Как направлен вектор напряженности в каждой точке поля?
6. Как направлен вектор индукции в каждой точке поля?
7. Как, согласно Максвеллу, связаны изменения электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля?

§ 3.8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

I. Важнейшим результатом, который вытекал из сформулированных Максвеллом свойств электромагнитного поля, явилось предсказание возможности существования электромагнитных волн. Этот вывод Дж. Максвелл сделал в 1865 г., анализируя разработанные им уравнения электромагнитного поля. Интересно, что этот результат он получил чисто теоретически. Никаких экспериментальных данных у него не было.

К сожалению, преждевременная смерть в 1879 г. не позволила Максвеллу дожить до экспериментального подтверждения своего гениального предсказания. В 1887—1888 гг. Г. Герц поставил ряд опытов, подтвердивших существование электромагнитных волн, а также позволивших обнаружить все свойства этих волн, которые были теоретически предсказаны Дж. Максвеллом.

II. Механизм возникновения электромагнитной волны можно себе представить следующим образом. Пусть в некоторой области пространства возникают колебания электрического заряда. Это повлечет за собой колебания вектора напряженности \vec{E} ; его модуль и направление станут периодически меняться. Согласно Максвеллу, в этой же области будут происходить также колебания вектора индукции \vec{B} . Поэтому и в соседних точках поля возникнут колебания векторов напряженности и индукции, но с некоторым запаздыванием.

Эти колебания вызовут, в свою очередь, колебания поля в более далеких точках, естественно, с еще большим запаздыванием. Такой процесс весьма напоминает аналогичный процесс передачи колебаний из одной точки упругой среды в другую. Принципиальная разница заключается лишь в том, что если идет упругая волна, то колеблются частицы вещества в твердом теле, жидкости или газе; если же идет электромагнитная волна, то колебания совершают векторы поля. Электромагнитные волны возможны и в вакууме, где отсутствуют частицы вещества.

III. Отметим некоторые свойства электромагнитных волн, которые теоретически предсказал Дж. Максвелл, а опыты полностью их подтвердили.

1. Электромагнитные волны — это волны поперечные. Векторы индукции \vec{B} и напряженности \vec{E} колеблются перпендикулярно

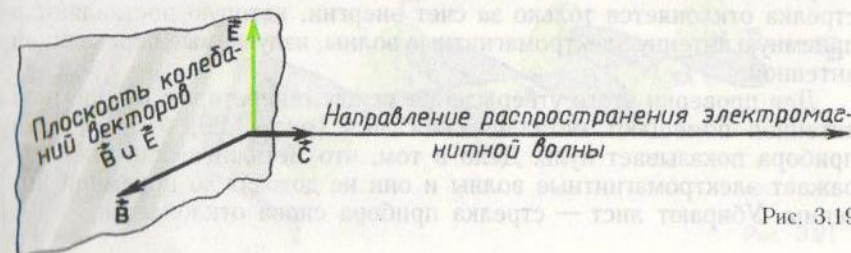


Рис. 3.19

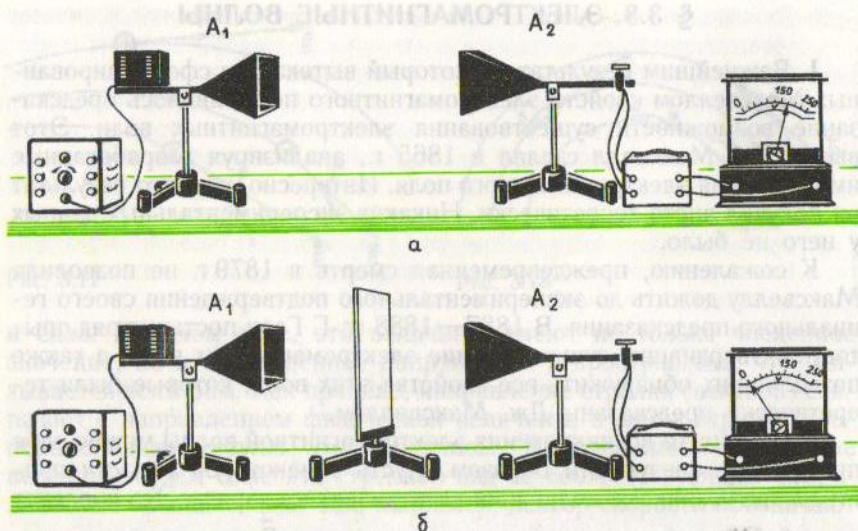


Рис. 3.20

друг другу в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волн (рис. 3.19).

2. *Скорость электромагнитных волн в вакууме равна $2,99792458 \cdot 10^8$ м/с.* Как показал в 1905 г. А. Эйнштейн, эта скорость является *предельной*: ни частицы вещества, ни какие-либо сигналы не могут двигаться со скоростью, большей скорости электромагнитных волн в вакууме.

3. *В веществе скорость электромагнитных волн меньше, чем в вакууме: $v=c/n$, где n — показатель преломления.* Причину такого названия мы выясним позже.

4. *Электромагнитная волна переносит энергию*, в чем убеждаются с помощью следующего опыта: на демонстрационном столе располагают генератор электромагнитных волн с передающей антенной A_1 , а также приемную антенну A_2 с усилителем и вольтметром (рис. 3.20, а).

При работе генератора стрелка прибора отклоняется. Поскольку в приемной антенне никакого источника тока нет, то очевидно, что стрелка отклоняется только за счет энергии, которую поставляют в приемную антенну электромагнитные волны, излучаемые передающей антенной.

Для проверки этого утверждения между генератором и приемной антенной помещают металлический лист (рис. 3.20, б) — стрелка прибора показывает нуль. Дело в том, что металлический лист отражает электромагнитные волны и они не доходят до приемной антенны. Убирают лист — стрелка прибора снова отклоняется.

IV. Чтобы лучше представить себе механизм распространения электромагнитной волны, обратимся к рисунку 3.21, где изображены векторы поля в электромагнитной волне в разные моменты времени в соответствии с теорией Максвелла.

Пусть в некоторый момент времени векторы поля в точках 0, 4, 8, 12 имеют амплитудные значения и направлены вдоль осей координат OY и OZ (рис. 3.21, верхний). В точках 2, 6, 10, 14 векторы поля тоже имеют амплитудные значения, но направлены в противоположную сторону — по направлению отрицательных значений оси OY (вектор напряженности \vec{E}) и оси OZ (вектор индукции \vec{B}). В точках 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 значения векторов поля равны нулю.

Через четверть периода амплитудные значения векторы поля примут в точках 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 (раньше они были равны нулю). В точках же 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 векторы поля окажутся равными нулю (рис. 3.21, нижний). Раньше они имели амплитудные значения. Как видно, волна сместилась вдоль

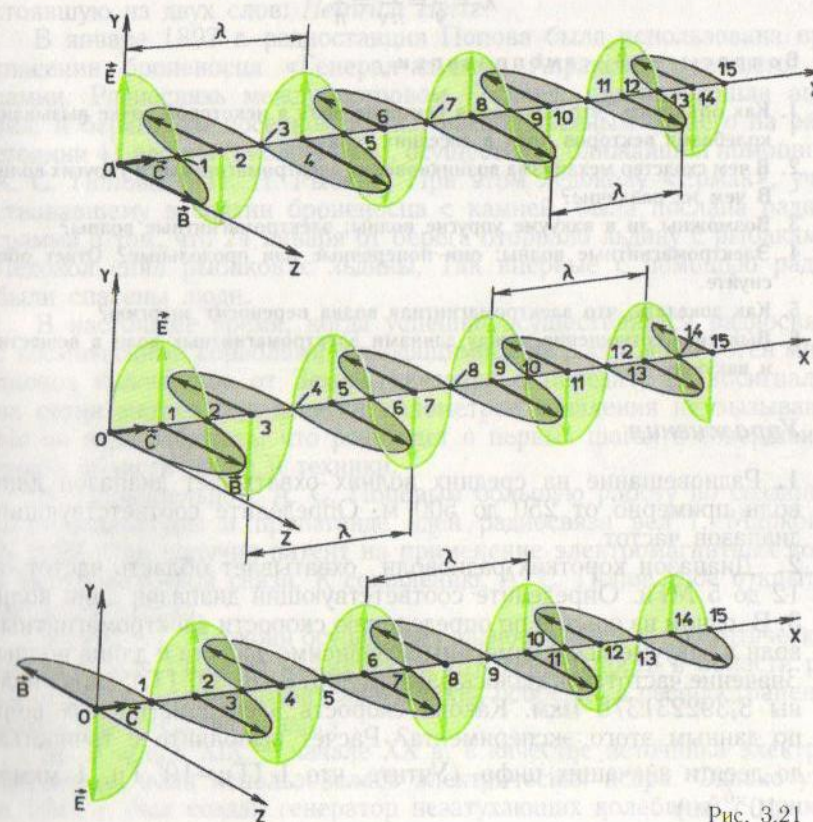


Рис. 3.21

оси OX вправо на четверть своей длины. Это означает, что волна движется в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой колеблются векторы поля. Следовательно, *электромагнитная волна является поперечной волной*.

V. Соотношения между длиной волны, ее скоростью, периодом и частотой колебаний, полученные в § 2.2, сохраняют свое значение и для электромагнитных волн.

В вакууме, где скорость электромагнитной волны $c=3,00 \cdot 10^8$ м/с, искомое соотношение запишется так:

$$\lambda = cT = c/v.$$

VI. При переходе электромагнитной волны из вакуума в вещество ее частота не меняется. Здесь мы имеем дело со следствием того свойства вынужденных колебаний, что их частота равна частоте вынуждающей силы. А так как скорость волны в веществе меняется, то меняется и длина волны.

Обозначив длину волны в вакууме λ , а в веществе λ' , получим

$$\lambda' = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda}{n}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Как объяснить, что колебания векторов поля в некоторой точке вызывают колебания векторов поля в соседних точках?
2. В чем сходство механизма возникновения электромагнитных и упругих волн? В чем их различие?
3. Возможны ли в вакууме упругие волны; электромагнитные волны?
4. Электромагнитные волны: они поперечные или продольные? Ответ обоснуйте.
5. Как доказать, что электромагнитная волна переносит энергию?
6. Выведите соотношение между длинами электромагнитных волн в веществе и вакууме.

Упражнения

1. Радиовещание на средних волнах охватывает диапазон длин волн примерно от 250 до 500 м. Определите соответствующий диапазон частот.
2. Диапазон коротких радиоволн охватывает область частот от 12 до 5 МГц. Определите соответствующий диапазон длин волн.
3. В одном из опытов по определению скорости электромагнитных волн в вакууме были измерены независимо частота и длина волны. Значение частоты оказалось равным 88376,181627 ГГц, длина волны 3,392231376 мкм. Какова скорость электромагнитных волн по данным этого эксперимента? Расчет выполните с точностью до десяти значащих цифр. (Учтите, что $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$, $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$.)

4. Определите скорость электромагнитных волн в оксиде углерода (IV), если показатель преломления равен 1,000450. Расчет произведите с точностью до семи значащих цифр.

5. Частота электромагнитной волны равна $6,0 \cdot 10^8$ Гц. Определите длину волны в вакууме, воздухе и воде. Для данной частоты показатель преломления для воздуха равен 1,0003, для воды 9,0.

§ 3.9. РАДИОСВЯЗЬ

I. В 1888 г. А. С. Попов повторил опыты Г. Герца и выдвинул проблему использования электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние. В 1894 г. он собрал радиоприемник, реагирующий на электромагнитные волны, получаемые при грозовых разрядах (так называемый грозоотметчик). На заседании Российского физико-химического общества 24 марта 1896 г. при помощи созданных генератора и приемника А. С. Попов передал на расстояние 250 м первую в мире телеграмму без проводов (радиограмму), состоявшую из двух слов: *Heinrich Hertz*.

В январе 1897 г. радиостанция Попова была использована при спасении броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни. Радиосвязь между островом Гогланд, где произошла авария, и береговым поселком Котка, расположенным от него на расстоянии 41 версты (около 44 км), осуществлял ближайший помощник А. С. Попова — П. Н. Рыбкин. При этом ледоколу «Ермак», участвовавшему в снятии броненосца с камней, была послана радиограмма о том, что 24 января от берега оторвало льдину с рыбаками. Ледокол снял рыбаков с льдины. Так впервые с помощью радио были спасены люди.

В настоящее время, когда успешно осуществляется радиосвязь с космическими кораблями, находящимися на расстоянии сотен миллионов километров от Земли, сведения о передаче радиосигналов на сотни метров или десятки километров удивления не вызывают. Но не надо забывать, что речь идет о первых шагах в совершенно новой области науки и техники.

II. Параллельно с А. С. Поповым большую работу по созданию радиоаппаратуры и пропаганде идей радиосвязи вел Г. Маркони. В 1897 г. он получил патент на применение электромагнитных волн в беспроводной связи. К сожалению, А. С. Попов свое открытие не запатентовал.

В 1901 г. Г. Маркони осуществил радиосвязь через Атлантический океан между Европой и Америкой. Его деятельность в области радиотехники сыграла значительную роль, особенно в распространении радио как средства связи.

III. В конце XIX — начале XX в. в качестве источника электромагнитных волн использовалась электрическая искра. Однако уже в 1913 г. был создан генератор незатухающих колебаний с приме-

нением трехэлектродной радиолампы, а начиная с пятидесятых годов для этой цели широко используются транзисторы.

Оказалось, что только на основе незатухающих синусоидальных электромагнитных колебаний наиболее удобно осуществлять радиосвязь, т. е. передавать с помощью электромагнитных волн информацию: речь, музыку, изображение. Важно при этом подчеркнуть, что *мощность излучаемой волны* (при прочих равных условиях) *пропорциональна четвертой степени частоты*: $P \sim \nu^4$. Именно поэтому в радиовещании используются электромагнитные волны с частотами от 0,2 (длинные волны), включая 1 МГц (средние волны), до 12 МГц (короткие волны). В телевидении используются еще более высокие частоты, порядка гигагерц — миллиардов герц (дециметровые волны).

IV. Опыт показывает, что генератор, рассмотренный в § 3.6, практически не излучает электромагнитные волны. Причина заключается в том, что здесь электромагнитное поле сосредоточено внутри конденсатора и катушки. Еще в 1894 г. А. С. Попов заметил, что если к генератору и приемнику присоединить длинные провода, то наблюдается значительное улучшение радиосвязи.

Так была изобретена *антенна* — важная часть любого радиопередатчика и радиоприемника. В отличие от закрытого колебательного контура (см. рис. 3.10, 3.13) антенна представляет собой открытый колебательный контур, электромагнитное поле которого охватывает значительную область пространства. Поэтому антенна хорошо излучает и хорошо принимает электромагнитные волны.

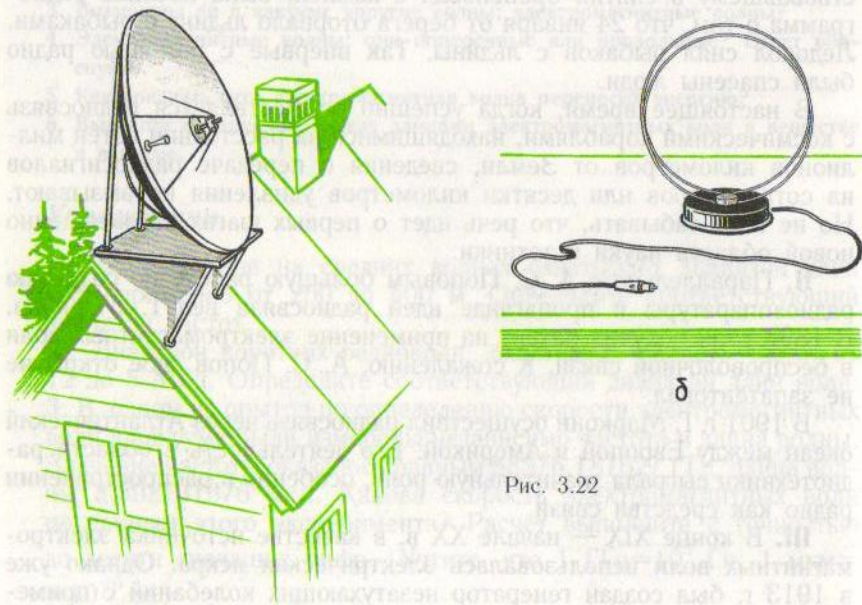


Рис. 3.22

В зависимости от диапазона частот, в которых работают радиопередатчик и радиоприемник, антенны имеют разные размеры и форму. На рисунке 3.22, а показана телевизионная антенна коллективного пользования, устанавливаемая на крышах домов, на рисунке 3.22, б — комнатная телевизионная антенна.

Вопросы для самопроверки

1. Когда впервые появилась радиосвязь? Кто является основоположниками этой области техники?
2. Какие виды радиосвязи вам известны?
3. Какие колебания более удобны для радиосвязи — затухающие или незатухающие?
4. Какие частоты более выгодны для осуществления радиосвязи?
5. Для чего нужны антенны? Можно ли на опыте подтвердить ваше заключение?

§ 3.10. РАДИОПЕРЕДАЧА И РАДИОПРИЕМ

I. Казалось бы, в радиотелефонии достаточно с помощью микрофона преобразовать звуковые колебания в электромагнитные и подать их на антенну, которая начнет их излучать, а в радиоприемнике эти сигналы подать на репродуктор — и можно услышать передаваемую речь или музыку. Однако так сделать нельзя по двум причинам.

Во-первых, *звуковые колебания осуществляются на сравнительно низких частотах, при которых электромагнитные волны практически не излучаются*. Следовательно, *необходимы более высокие частоты* (в миллионы раз больше звуковых) *для осуществления радиосвязи, т. е. частоты, на которых может излучаться электромагнитная волна*.

Во-вторых, если бы даже удалось создать очень мощные радиопередатчики, работающие на звуковых частотах, то радиоприемник воспринимал бы одновременно передачу от многих радиостанций и выделить нужный нам сигнал из этого хаоса было бы невозможно. Это аналогично тому, как невозможно разговаривать в толпе, где все люди одновременно перебивают друг друга. Поэтому, чтобы одна радиостанция не мешала другой, каждой из них выделяется узкий диапазон радиоволн (полоса частот), в котором она имеет право работать. А в радиоприемнике имеется устройство, позволяющее перестроиться с высокой частоты на низкую. Таким образом, для радиосвязи необходимы генератор незатухающих электромагнитных колебаний высокой частоты, антенна, связанная с этим генератором и излучающая электромагнитные волны с этой же частотой, и приемник. Однако если какой-либо приемник будет принимать эти волны, то никакой информации мы не получим. Единственное, что можем узнать, — это то, что генератор работает.

II. Для того чтобы радиопередатчик смог передать какую-либо

информацию, например речь или музыку, необходимо низкочастотные колебания наложить на высокочастотные колебания.

Таким образом, оказывается, что электромагнитная волна как бы несет на себе звуковую волну. Процесс наложения волн, т. е. процесс преобразования электромагнитной волны из синусоидальной в более сложную, осуществляет специальное устройство, находящееся в передатчике, — *модулятор*. Именно он производит *модулирование высокочастотных электромагнитных колебаний*.

Звуковые колебания в цепи микрофона возбуждают колебания электрического тока, а они, в свою очередь, поступая в модулятор, изменяют амплитуду высокочастотного колебания контура. Причем частоты и амплитуды электрических колебаний в микрофоне соответствуют громкости, тембру и тону звуковых колебаний, действующих на мембрану.

На рисунке 3.23, *а* изображен график высокочастотных электромагнитных колебаний, т. е. график несущей высокочастотной волны, на рисунке 3.23, *б* — график звуковых колебаний и на рисунке 3.23, *в* — график высокочастотных колебаний, амплитуда которых меняется по закону звуковых колебаний. Такие высокочастотные колебания с медленно меняющейся амплитудой называются *амплитудно-модулированными*.

III. На рисунке 3.24, *а* показана простейшая схема радиопередатчика, с помощью которого может быть реализовано радиовещание — передача звуковых волн (речи или музыки) с помощью электромагнитных волн. Здесь генератор 1 и микрофон 2 подают колебания в модулятор 3, который преобразует высокочастотные электромагнитные колебания, т. е. модулирует, а затем эти модулированные колебания (см. рис. 3.23, *в*) поступают на антенну 4, которая начинает излучать модулированные электромагнитные волны.

Естественно, в настоящем радиопередатчике имеется еще много узлов, в том числе усилителей, необходимых для излучения достаточно мощных сигналов, и системы блоков электропитания. Однако это не меняет существа принципиальной схемы.

IV. На рисунке 3.24, *б* показана схема простейшего радиоприемника. Электромагнитные волны принимаются *антенной 5* и поступают в *резонирующий контур*. Меняя емкость конденсатора 6, настраиваются на ту или иную радиостанцию, т. е. с помощью явления резонанса выделяют сигналы данной радиостанции из множества других.

Дело в том, что каждой радиостанции отводится определенная частота, на которой работает ее генератор. Если собственная частота колебаний приемного контура совпадает с частотой волны данной радиостанции, то наступает резонанс, когда амплитуда вынужденного колебания тока в контуре оказывается максимальной. Амплитуды колебаний на других частотах, вызванные волнами других радиопередатчиков, будут малы и будут мало влиять на основные колебания.

V. Для того чтобы из модулированного колебания выделить нужный нам сигнал (например, речь или музыку), эти колебания про-

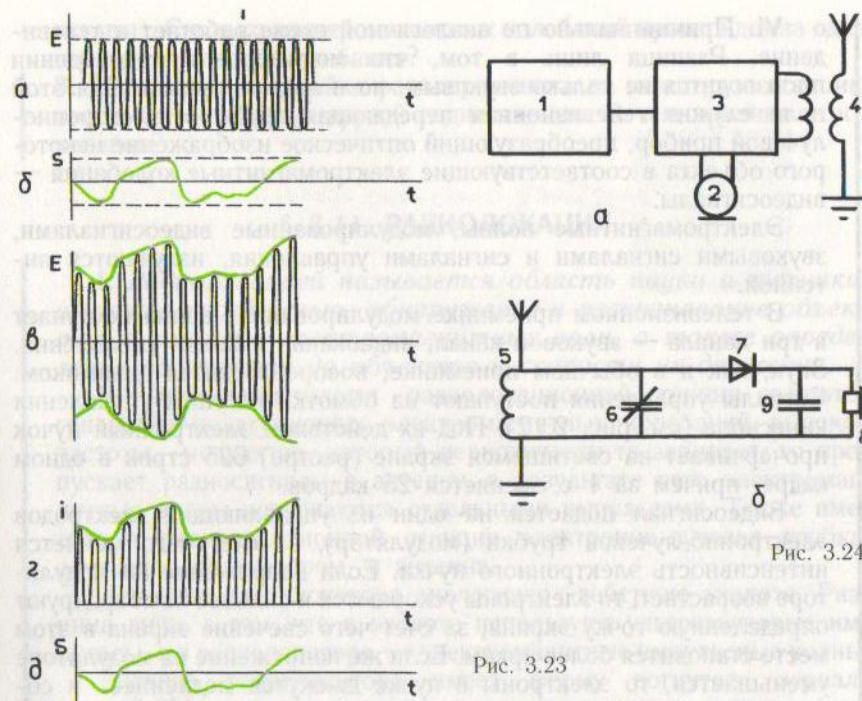


Рис. 3.24

пускают через *детектор 7*, где ток проходит только в одном направлении и, таким образом, выпрямляется. Детектором может служить полупроводниковый диод, с принципом действия и устройством которого вы ознакомились в VIII классе. Детектор превращает высокочастотные модулированные колебания в высокочастотные импульсы, что показано на рисунке 3.23, *г*.

Детектированные колебания поступают на телефон 8, устройство которого очень похоже на устройство микрофона (см. рис. 2.13). Разница лишь в том, что мембрана телефона сама является источником звука. Когда импульсы тока после детектора поступают в обмотку, находящуюся между полюсами сильного магнита, то магнитное поле действует на эту обмотку с переменной силой, вызывая колебания мембраны. Однако благодаря относительно большой массе мембрана колеблется не в соответствии с каждым импульсом, а в соответствии с огибающей этих импульсов, показанной на рисунке 3.23, *г* зеленым цветом. В результате за счет колебаний мембраны в воздухе возникает звуковая волна, совпадающая по своему звучанию со звуковой волной, которая приводила в движение мембрану микрофона радиопередатчика (рис. 3.23, *д*).

Конечно, современный радиоприемник устроен значительно сложнее. Но в принципе детекторный приемник, собранный по схеме, показанной на рисунке 3.24, *б*, может принимать сигналы мощной радиостанции на длинных и средних волнах.

VI. Принципиально по аналогичной схеме работает и телевидение. Разница лишь в том, что модуляция в телевидении производится не только звуковым, но и видеосигналом. Для этой цели служит телевизионная передающая трубка — электронно-лучевой прибор, преобразующий оптическое изображение некоторого объекта в соответствующие электромагнитные колебания — видеосигналы.

Электромагнитные волны, модулированные видеосигналами, звуковыми сигналами и сигналами управления, излучаются антенной.

В телевизионном приемнике модулированная волна поступает в три канала — звуковой канал, видеоканал и канал управления. Звук, как и в обычном приемнике, воспроизводится динамиком. Сигналы управления поступают на обмотки катушек управления кинескопа (см. рис. 2.12). Под их действием электронный пучок прочерчивает на светящемся экране (растре) 625 строк в одном кадре, причем за 1 с сменяется 25 кадров.

Видеосигнал подается на один из управляющих электродов электронно-лучевой трубки (модулятор), за счет чего меняется интенсивность электронного пучка. Если напряжение на модуляторе возрастает, то электроны ускоряются и сильнее бомбардируют определенную точку экрана, за счет чего свечение экрана в этом месте становится более ярким. Если же напряжение на модуляторе уменьшается, то электроны в пучке движутся медленнее и соответствующее место экрана светится слабее.

За счет совместного действия сигналов управления и видеосигнала электронный пучок рисует на экране кинескопа изображение объекта, который размещался перед экраном передающей трубки.

Вопросы для самопроверки

1. Начертите блок-схему радиопередатчика и укажите назначение его основных узлов.
2. Какие колебания называются амплитудно-модулированными? Начертите их график.
3. Начертите схему простейшего радиоприемника и укажите назначение его основных узлов.
4. Каково назначение передающей телевизионной трубки?
5. Какова функция модулятора в кинескопе?
6. Как на экране кинескопа возникает изображение?

Упражнения

1. Сравните частоту радиоволны в диапазоне средних волн (например, 250 м) с частотой звука (например, тоном ля первой октавы). Каково отношение частот?
2. Радиостанция работает в коротковолновом диапазоне (длина волны 25 м). Радиосигнал модулируется звуком (тон до первой

октавы). Сколько электромагнитных колебаний произойдет за один период звукового колебания?

3. Иногда при настройке радиоприемника на некоторую станцию прослушивается звук другой радиостанции. В чем причина этого явления?

§ 3.11. РАДИОЛОКАЦИЯ

I. Радиолокацией называется область науки и техники, имеющая своей целью обнаружение и распознавание объектов с помощью электромагнитных волн, а также определение расстояний до объектов и скорости их движения.

II. Основными узлами радиолокационной станции являются генератор незатухающих электромагнитных колебаний высокой частоты, модулятор, который периодически то запирает, то пропускает радиосигналы в антенну, в результате чего электромагнитные волны испускаются отдельными импульсами. Также имеется в радиолокационной станции электронно-лучевая трубка, служащая индикатором, и антенна.

Действие радиолокатора аналогично действию эхолота. Разница лишь в том, что в эхолоте используют ультразвуковые импульсы, а в радиолокаторе — электромагнитные импульсные волны.

Антенна радиолокатора имеет форму вогнутого зеркала (рис. 3.25), поэтому, учитывая еще и короткую волну (от 1 дм до 3 см), радиолокатор испускает электромагнитные волны направленным пучком, подобно прожектору. Это позволяет обнаружить нахождение объекта, от которого радиопульс отразился.

III. Расстояние до объекта и скорость его движения определяют с помощью электронно-лучевой трубки. На ее электроды, отклоняющие электронный пучок в горизонтальном направлении, подается пилообразное напряжение (см. рис. 2.10, 2.11), вследствие чего электронный пучок относительно медленно прочерчивает на светящемся экране прямую линию и скачком возвращается обратно.

В момент отправления радиопульса сигнал подается на электроды вертикального отклонения (см. рис. 2.10) и на экране

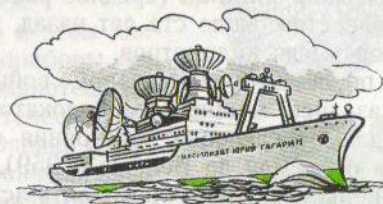


Рис. 3.25

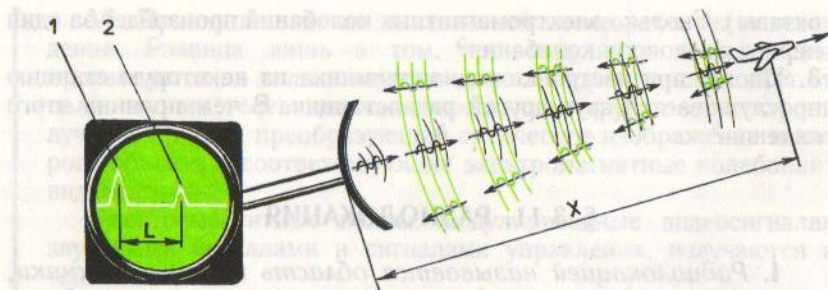


Рис. 3.26

появляется зубец 1 (рис. 3.26). Далее модулятор запирает канал излучения, и локатор переходит на режим приема. Волна, дойдя до предмета и отразившись от него, принимается антенной, сигнал усиливается и вновь подается на вертикально отклоняющие электроды. На экране появляется зубец 2 от отраженного сигнала.

IV. Существуют радиолокаторы с круговой разверткой, когда электронный пучок рисует на экране карту исследуемой местности. Характер отражения электромагнитных волн от разных веществ различен. Так, например, от металлов и воды радиоволны отражаются сильнее, чем от почвы, поэтому на экране радиолокатора с круговой разверткой удастся получить картину местности, над которой пролетает самолет или ракета с радиолокатором.

Важным достоинством радиолокационных методов является то, что изображение местности или обнаружение цели возможно через непрозрачную атмосферу, сквозь туманы и облака. Дело в том, что в отличие от света радиоволны сантиметрового и дециметрового диапазонов свободно проходят сквозь туманы и облака и при этом очень слабо поглощаются.

V. Радиолокационные методы нашли широкое применение в астрономии. Прежде всего это радиолокационные измерения расстояний от Земли до небесных тел Солнечной системы.

Расстояние от Луны до Земли было определено. Однако точность измерения была выше 0,5 %, что составляло примерно тысячи километров.

Астрономическая единица (среднее расстояние от Земли до Солнца) была известна около ста лет назад, но с ошибкой в несколько десятков тысяч километров.

Сразу же после второй мировой войны на вооружении астрономов оказались мощные радиолокаторы, которые были использованы для определения расстояния от Земли до Луны (1946), а затем от Земли до Венеры (1959). Радиолокационные наблюдения Венеры позволили определить астрономическую единицу с потрясающей точностью (до 700 м!):

$$1 \text{ а. е.} = 149597868 \pm 0,7 \text{ км.}$$

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается принцип радиолокации?
2. Что общего у радиолокатора и эхолота и чем они отличаются?
3. Как с помощью радиолокатора определить расстояние от радиолокатора до объекта?
4. Какое применение нашла радиолокация в астрономии?
5. Мешает ли туман или облачность радиолокации?

§ 3.12. РАДИОАСТРОНОМИЯ

I. В древнем мире и в средние века все астрономические наблюдения проводились невооруженным глазом. В 1609 г. Г. Галилей собрал свою первую оптическую трубу — телескоп — и с ее помощью начал астрономические наблюдения. Он изучил поверхность Луны, открыл там горы и темные впадины, которые назвал *морями*. Он открыл также четыре спутника Юпитера и описал их движение, обнаружил, что Млечный Путь — это огромное скопление звезд.

В 1611 г. И. Кеплер описал конструкцию своего телескопа, а И. Ньютон в 1668—1671 гг. сконструировал телескоп-рефлектор, где вместо линзы использовал вогнутое зеркало (см. § 5.7). В 1781 г. У. Гершель с помощью построенного им телескопа-гиганта (для того времени) открыл планету Уран.

В настоящее время крупнейшими в мире рефлекторами являются телескопы с диаметром зеркала 6 м (Россия) и 5 м (США).

II. Однако все эти телескопы регистрируют только видимый свет от небесных тел. Между тем оказалось: небесные тела излучают очень широкий диапазон длин волн, в том числе и радиоволн.

Раздел астрономии, занимающийся исследованием радиоизлучения небесных тел, называется радиоастрономией.

Радиоастрономы исследуют излучение, где длина волны находится в пределах от нескольких миллиметров до 20 м.

Для наблюдений в этом диапазоне используют приборы, которые называются радиотелескопами. Первый радиотелескоп был построен в 1936 г. Однако по-настоящему радиоастрономия начала интенсивно развиваться лишь в 50-е гг. нашего столетия, после второй мировой войны.

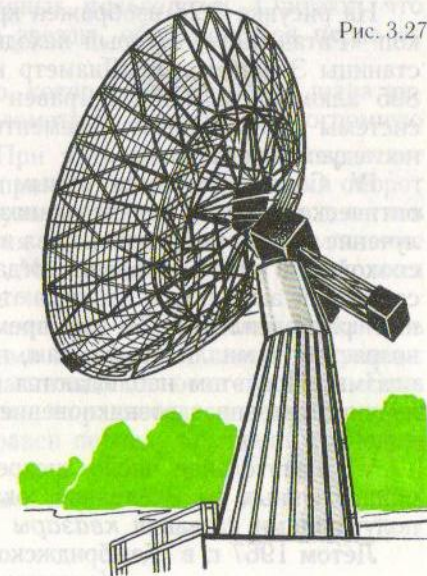


Рис. 3.27

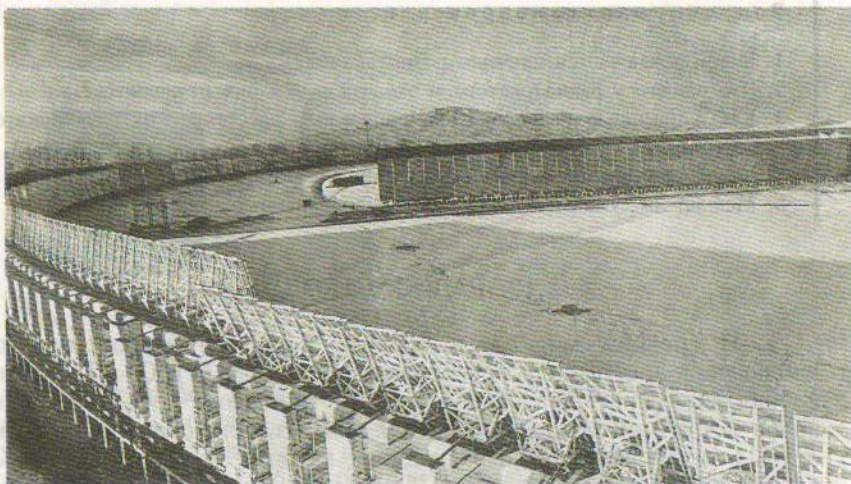


Рис. 3.28

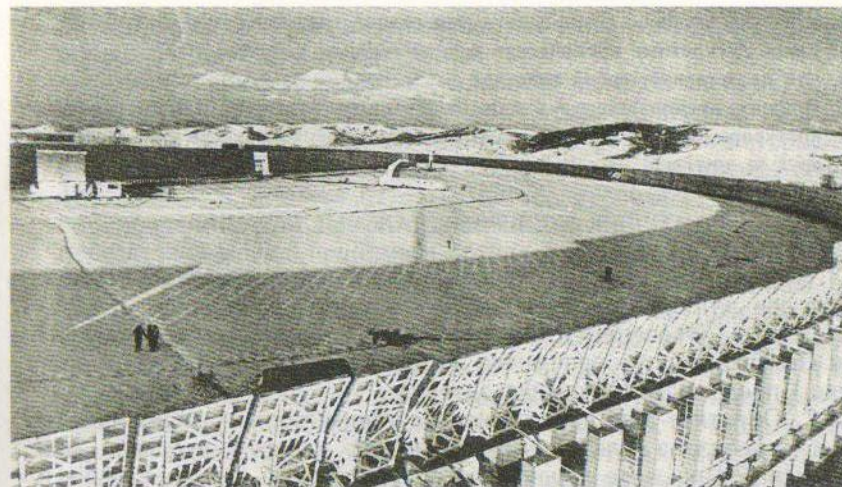
III. Наиболее распространены радиотелескопы, у которых антенны представляют собой большие металлические зеркала параболической формы. Эти антенны можно поворачивать и направлять в любую точку небосвода. На рисунке 3.27 изображен радиотелескоп, имеющий антенну диаметром 20 м (США). Для повышения чувствительности и качества изображения объектов в радиотелескопах используют антенны еще большего размера, составленные из отдельных элементов.

На рисунке 3.28 изображен крупный отечественный радиотелескоп «Ратан-600», который находится на Северном Кавказе вблизи станции Зеленчукская. Диаметр кольца его антенны, состоящей из 895 алюминиевых щитов, равен 600 м. С помощью специальной системы автоматики эти элементы (высота 7 м) ориентируются на исследуемый объект.

IV. Солнце является самым ярким объектом на небе как в оптическом, так и в радиодиапазоне. Оказалось, что его радиоизлучение можно разделить на два вида: радиоизлучение, когда Солнце спокойно, и радиоизлучение, когда Солнце активно. При повышении солнечной активности наблюдаются многочисленные кратковременные радиовсплески. В это время интенсивность радиоизлучения возрастает в миллионы раз там, где на Солнце происходят выбросы плазмы. При этом наблюдаются вспышки и протуберанцы. Их появление связано с возникновением мощных переменных магнитных полей.

V. Значительное число дискретных источников радиоизлучения, обнаруженных во Вселенной, оказалось неизвестными объектами, получившими названия *квазары* и *пульсары*.

Летом 1967 г. в Кембриджском университете обнаружили с по-



мощью радиотелескопа объект, который излучал странные импульсные радиосигналы. Длительность импульса составляла 10–20 мс, импульсы следовали друг за другом точно через 1,33730113 с.

Изумленные исследователи сначала предположили, что эти сигналы посылают на Землю какие-то разумные существа, обладающие сверхмощными радиолокаторами. Однако после открытия ряда таких источников в разных участках небосвода стало ясно, что это фантастическое предположение следует отбросить и искать естественное объяснение этих объектов, названных *пульсарами*. Считают, что пульсар — это остаток массивной звезды, образующийся после ее взрыва.

После взрыва звезды вещество, которое сжимается до шара радиусом в несколько десятков километров, приобретает огромную плотность (порядка 10^{16} кг/м³). При этом значительно возрастает и его скорость вращения. Если, например, звезда делала один оборот за несколько десятков суток, то пульсар делает несколько десятков оборотов за 1 с. Вследствие сжатия вещества происходит усиление связанного с ним магнитного поля. Магнитная индукция такого поля возрастает в сотни миллионов раз.

Наиболее легкие заряженные частицы — электроны, двигаясь в этом поле со скоростями, близкими к скорости света, выпускают узкие пучки радиоволн в районе магнитных полюсов пульсара. Если Земля оказывается на пути радиоволн, то радиотелескоп регистрирует импульс. Период его повторения равен периоду вращения пульсара.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое радиоастрономия?
2. Какие виды радиотелескопов вам известны?

3. Что дало изучение Солнца методами радиоастрономии?
4. Какие дискретные космические радиоисточники вам известны?
5. Что представляет собой пульсар?
6. Опишите предполагаемый механизм излучения пульсаром. Чем объясняется кратковременность радиоимпульсов и строгая периодичность их следования друг за другом?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

3.1. Переносные транзисторные приемники высокого класса имеют две антенны: внутреннюю — магнитную, наружную — телескопическую. Экспериментально убедитесь, для какого диапазона волн (по шкале радиоприемника и положению переключателя диапазона) предназначена каждая антенна.

3.2. Обратите внимание на корпус транзисторного приемника, а также телевизора или электрофона. Из какого материала они выполнены? Включите переносной транзисторный радиоприемник и настройте его на определенную радиостанцию, а затем накройте его металлическим ведром или кастрюлей. Объясните, почему прекратился радиоприем.

3.3. Настройтесь на какую-либо станцию и добейтесь максимально хорошей слышимости. Медленно поворачивая ручку настройки радиоприемника, наблюдайте, как меняется громкость звука. То же самое проделайте, поворачивая ручку настройки в другую сторону. Какое явление вы учитываете при настройке радиоприемника?

3.4. Обратите внимание на антенну автомобиля. Объясните, почему автомобильный радиоприемник обязательно оснащается наружной телескопической антенной. Почему не годится магнитная антенна?

3.5. В городских зданиях телевизоры подключают, как правило, к наружной антенне, установленной на крыше. Прием на комнатную

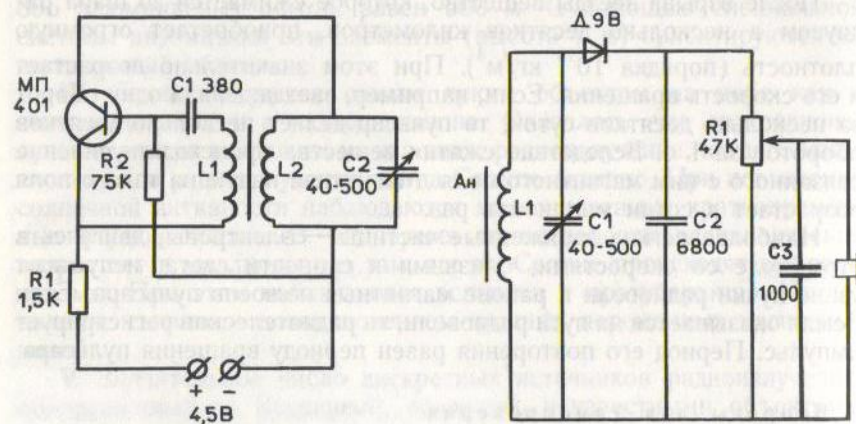


Рис. 3.29

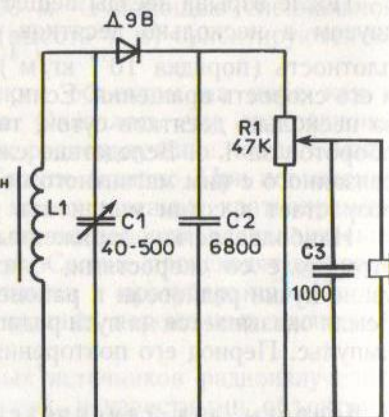


Рис. 3.30

антенну дает двойное изображение на экране. Объясните причину появления двойного изображения.

3.6. Соберите передатчик (генератор высокой частоты) по схеме (рис. 3.29) с индуктивной обратной связью. Контурная катушка $L2$ и катушка обратной связи $L1$ намотаны на ферритовом стержне типа 400 НН. Диаметр стержня 8 мм, длина 140 мм. Катушка $L2$ содержит 180 витков, а катушка $L1$ — 15 витков провода ПЭЛ 0,14.

Рабочая частота генератора от 150 до 400 кГц. Сигналы такого передатчика может принимать обычный радиовещательный (ламповый и транзисторный) приемник. Особенность передатчика в том, что помехи на расстоянии 3 м от генератора не прослушиваются. Схема самодельного радиоприемника показана на рисунке 3.30.

Названная аппаратура позволяет осуществить передачу и прием радиосигналов, а при наличии осциллографа увидеть на его экране незатухающие колебания, определить зависимость частоты генератора от параметров его контура, зависимость амплитуды колебания генератора ВЧ от напряжения источника питания, понаблюдать за излучением, распространением и приемом электромагнитных волн.

3.7. По шкале вашего радиоприемника определите, в каком диапазоне длин волн и частот он работает.

Глава 4. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 4.1. ЧТО ТАКОЕ ОПТИКА?

I. В жизни человека свет играет исключительно важную роль. Более 80% информации от окружающего нас мира мы получаем с помощью зрения, воспринимая глазами свет, который излучают или отражают окружающие нас предметы. Неудивительно, что человечество уже в глубокой древности проявило интерес к изучению всевозможных световых явлений.

Оптика сначала рассматривалась как наука о зрении. (Слово «оптика» образовано от греческого слова *optike* — наука о зрительных восприятиях.) В настоящее время *оптика* представляет собой раздел физики, где изучаются природа света, различные световые явления и соответствующие закономерности.

II. Для того чтобы выяснить природу света и создать теорию световых явлений, надо было собрать соответствующий экспериментальный материал и установить ряд эмпирических (слово «эмпирический» образовано от греческого слова *empeiria* — опыт) законов, т. е. законов, полученных опытным путем. На этой основе были выдвинуты гипотезы о природе света. Проверка следствий из них позволила опровергнуть одни гипотезы и подтвердить другие. Только в конце XIX — начале XX в. была создана современная теория световых явлений.

В данной главе мы рассмотрим в общих чертах историю развития представлений о природе света и о том влиянии, которое оказало изучение световых явлений на развитие современной физики.

Вопросы для самопроверки

1. Какую роль играет свет в жизни человека?
2. Что такое оптика?
3. Какие законы мы называем эмпирическими?

§ 4.2. ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. СОЛНЕЧНОЕ И ЛУННОЕ ЗАТМЕНИЯ

I. Еще в глубокой древности люди установили, что в воздухе свет распространяется по прямой линии. В этом легко убедиться, наблюдая за узким пучком света в запыленной комнате (рис. 4.1).

Точно так же прямолинейно свет распространяется в прозрачных твердых телах и жидкостях (рис. 4.2). На основе опытных данных был сформулирован **закон прямолинейного распространения**

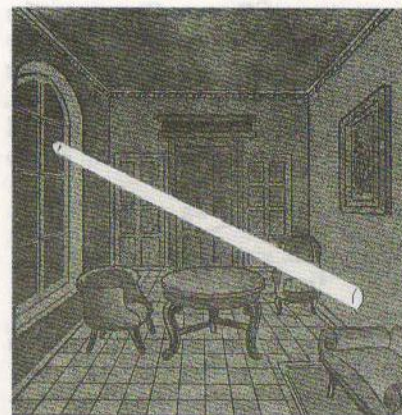


Рис. 4.1

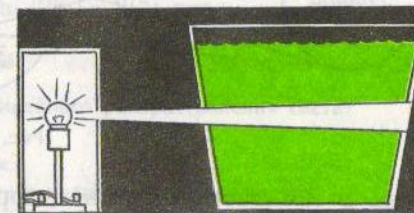


Рис. 4.2

света: в прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям.

Собственно, само понятие «прямой» возникло, по-видимому, из оптических наблюдений. Так, желая проверить, является ли предмет прямым, мы пользуемся этим законом.

II. В связи с законом прямолинейного распространения света появилось понятие *световой луч*, которое имеет геометрический смысл как линия, вдоль которой распространяется свет.

Реальный физический смысл имеют световые пучки конечной ширины (см. рис. 4.1). Световой луч можно рассматривать как ось светового пучка. Поскольку свет, как и всякое излучение, переносит энергию, то можно говорить, что световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком.

III. Закон прямолинейного распространения света позволяет объяснить, как возникают солнечные и лунные затмения.

Представим себе, что Солнце, Луна и Земля оказались на одной прямой. Луна намного меньше Солнца, но ее видимый диаметр почти равен видимому диаметру Солнца, поскольку Луна гораздо ближе к Земле, чем Солнце (380 000 км по сравнению со 150 000 000 км). Пусть Луна находится между Солнцем и Землей (рис. 4.3). В этом случае произойдет солнечное затмение.

Как видно, за Луной образуется конус, куда свет ни от одного участка Солнца не попадает, т. е. в этом конусе образуется полная

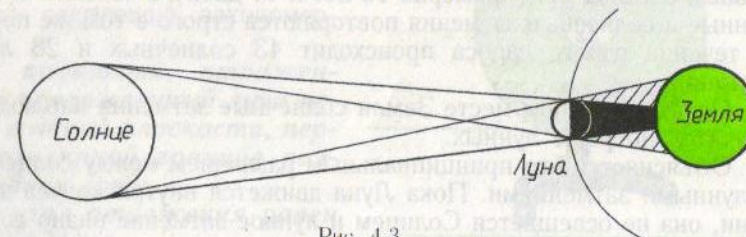


Рис. 4.3

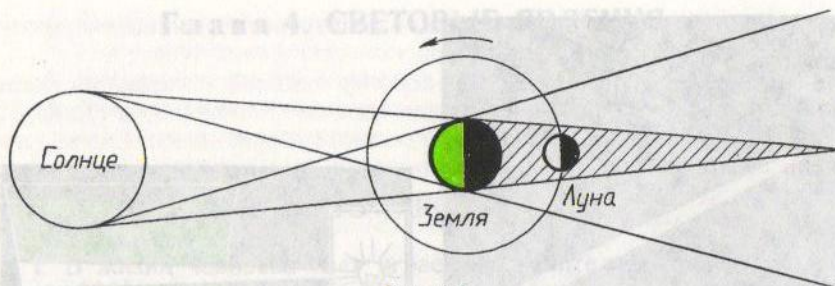


Рис. 4.4

тень. В тех участках Земли, которые оказываются в конусе полной тени, наблюдается *полное солнечное затмение*.

Кроме конуса полной тени, имеются еще участки, куда свет попадает лишь от части поверхности Солнца, а остальная часть Солнца перекрыта Луной.

Здесь в области *полутени* (см. рис. 4.3) наблюдается *частое солнечное затмение*.

IV. Если между Луной и Солнцем оказывается Земля (рис. 4.4), то происходит *лунное затмение*. Так как Земля намного больше Луны, конус ее полной тени оказывается довольно большим. И когда вся Луна находится в этом конусе, наблюдается *полное лунное затмение*. Если Луна погружена в тень не вся, то наблюдается *частное лунное затмение*.

Если же Луна попадает только в область полутени, то происходит полное или частное *полутеневое затмение*.

Различие в размерах земной тени и лунной, а также вращение Земли и движение Луны сказываются на деятельности затмений.

Если полное солнечное затмение длится максимально 7,5 мин, а чаще еще меньше, то полное лунное затмение длится 1,5—2 ч.

V. Если бы плоскость лунной орбиты совпадала с плоскостью эклиптики (плоскость, в которой лежит видимая траектория Солнца), то каждый месяц при новолунии наблюдалось бы солнечное затмение, а при полнолунии — лунное. На самом деле плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости эклиптики под углом примерно 5° . Поэтому очень часто Луна проходит мимо тени Земли, а Земля — мимо тени Луны, и затмения не наблюдаются.

VI. Существует *определенный промежуток времени* (сарос), равный 6585,32 сут (примерно 18 лет и 11 дней), в течение которого лунные и солнечные затмения повторяются строго в том же порядке. В течение одного сароса происходит 43 солнечных и 28 лунных затмений.

Однако в данном месте Земли солнечные затмения наблюдаются значительно реже лунных.

Объясняется это принципиальным различием между солнечными и лунными затмениями. Пока Луна движется внутри конуса земной тени, она не освещается Солнцем и лунное затмение видно со всего

полушария Земли. Во время полного солнечного затмения Луна просто загораживает свет Солнца от жителей тех районов земного шара, куда в это время падает ее тень. Полоса, которую пробегает тень Луны, проходит каждый раз по различным районам земного шара. Поэтому в данной местности полное солнечное затмение можно видеть очень редко, примерно один раз в 200—300 лет.

Вопросы для самопроверки

1. Как формулируется закон прямолинейного распространения света?
2. Что такое световой луч?
3. Как возникает солнечное затмение?
4. Когда видно солнечное затмение — в полнолуние или новолуние?
5. Как возникает лунное затмение?
6. Когда видно лунное затмение — в полнолуние или новолуние?
7. Луна обращается вокруг Земли за 27 сут. Почему же так редко наблюдаются солнечные и лунные затмения?

§ 4.3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

I. В VII классе вы ознакомились с одним из законов оптики — *законом отражения света*. Чтобы вспомнить этот материал, обратимся к опыту с *оптическим диском* (рис. 4.5).

Оптический диск представляет собой диск 1, на котором имеется шкала с делениями, позволяющими отсчитывать углы. На диске расположен источник света 2, испускающий узкий пучок 3. В центре диска расположен стеклянный полуцилиндр 4. На границе раздела стекло — воздух в точке O пучок света расщепляется на два пучка: отраженный 5 и преломленный 6.

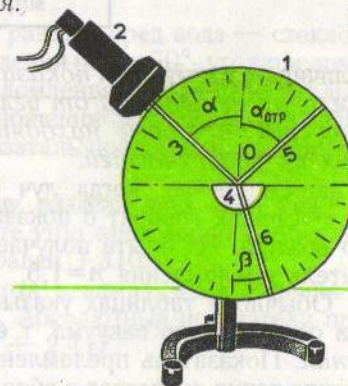
Угол α между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред называется *углом падения*. Угол между отраженным лучом и перпендикуляром называется *углом отражения*, а угол между преломленным лучом и перпендикуляром — *углом преломления*.

Рис. 4.5

II. Перемещая источник света по диску, меняют угол падения. Соответственно меняются и углы отражения и преломления. Опыт показывает, что при этом выполняются следующие закономерности:

а) *падающий, отраженный и преломленный лучи лежат в одной плоскости, перпендикулярной границе раздела двух сред;*

б) *угол отражения равен углу падения.*



Этот закон называется **законом отражения света**. Он был известен еще в глубокой древности. Во всяком случае, в «Началах» Евклида (III в. до н. э.) наряду с основами геометрии упоминается и этот закон.

III. Иначе обстояло дело с **законом преломления света**. Лишь в XVII в. В. Снеллиус около 1621 г. сформулировал закон преломления света, а около 1630 г. Р. Декарт сделал первую попытку теоретически его обосновать.

Чтобы вывести закон преломления света, вновь обратимся к опытам, которые проводятся с установкой, изображенной на рисунке 4.5.

Постепенно увеличивают угол падения луча на стекло. При этом всякий раз фиксируют угол преломления. Данные заносят в таблицу.

Угол падения α	Угол преломления β	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$n_{\text{сп}}$
10°	7°	0,1736	0,1219	1,424	1,5
20°	13°	0,3420	0,2250	1,520	
30°	19°	0,5000	0,3256	1,536	
40°	25°	0,6428	0,4226	1,521	
50°	31°	0,7660	0,5150	1,487	
60°	35°	0,8660	0,5736	1,510	
70°	39°	0,9397	0,6293	1,493	

На основе этих данных, учитывая погрешности измерений, формулируют **закон преломления света**:

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления является постоянной величиной для данных двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Величина n называется **показателем преломления**. Показатель преломления не зависит от угла падения и определяется свойствами сред, которые находятся по обе стороны от разделяющих их поверхностей.

В нашем случае, когда луч света переходит границу раздела воздух — стекло, говорят о показателе преломления стекла относительно воздуха. Из опыта получается, что для данного сорта стекла показатель преломления $n=1,5$.

IV. Обычно в таблицах указывают показатель преломления вещества относительно вакуума, т. е. **абсолютный показатель преломления**. Показатель преломления вещества относительно воздуха достаточно точно совпадает с абсолютным показателем преломления.

Если при переходе светового пучка из одного вещества в другое преломленный луч приближается к перпендикуляру, т. е. угол преломления оказывается меньше угла падения, то второе вещество называется **оптически более плотным**. Если же при переходе светового пучка из одного вещества в другое преломленный луч отклоняется от перпендикуляра, т. е. угол преломления оказывается больше угла падения, то второе вещество называется **оптически менее плотным**. У оптически менее плотного вещества абсолютный показатель преломления меньше, чем у оптически более плотного вещества.

Вопросы для самопроверки

1. С помощью какого прибора мы изучаем законы отражения и преломления света? Сделайте схематический рисунок и опишите ход эксперимента.
2. Как расположены лучи: падающий, отраженный и преломленный?
3. Как формулируется закон отражения света?
4. Как формулируется закон преломления света?
5. Что называется показателем преломления одной среды относительно другой?
6. Что называется абсолютным показателем преломления?
7. Какое вещество называется оптически более плотным; оптически менее плотным?

Упражнения

1. Луч света падает на границу раздела двух сред перпендикулярно поверхности раздела. Как направлен отраженный луч? Как направлен преломленный луч? Ответ обоснуйте и проверьте экспериментально.
2. Луч света переходит из воздуха в воду. Угол его падения равен 60°. Найдите угол преломления. Показатель преломления воды равен 1,333.
3. Луч света падает на границу раздела сред вода — стекло (сорт стекла — флинт ТФ-1). Угол падения равен 70°, угол преломления 49°28'. Найдите показатель преломления стекла относительно воды. Докажите, что он равен отношению абсолютных показателей преломления. Абсолютный показатель преломления данного сорта стекла равен 1,648.
4. Луч света падает на границу раздела двух сред лед — вода. Угол падения равен 50°. Найдите угол преломления. Абсолютный показатель преломления льда равен 1,310.
5. Луч света переходит из спирта в алмаз. Угол падения равен 63°. Найдите угол преломления. Абсолютные показатели преломления: спирта — 1,361, алмаза — 2,417.

§ 4.4. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

I. В оптическом диске стеклянный полуцилиндр устанавливают так, как это показано на рисунке 4.6. Поскольку пучок света падает на выпуклую поверхность стекла вдоль радиуса, то он не преломляется, а идет дальше. На плоской границе раздела двух сред стекло — воздух пучок раздваивается: одна часть его отражается под углом, равным углу падения, другая часть преломляется, а затем переходит из стекла в воздух.

Как видно, при переходе светового пучка из оптически более плотной среды (стекло) в оптически менее плотную среду (воздух) угол преломления больше угла падения. Закон преломления света в этом случае запишется так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}.$$

II. Увеличивая угол падения α , видят, что угол преломления β увеличивается еще быстрее. Кроме того, яркость отраженного пучка возрастает, а яркость преломленного уменьшается.

Наконец, когда угол падения станет предельным, угол преломления окажется равным 90° . При этом яркость преломленного пучка окажется равной нулю, т. е. этот пучок исчезнет, а яркость отраженного пучка окажется равной яркости падающего пучка.

Такое явление называется *полным отражением*. При падении света на границу раздела между оптически более плотной и оптически менее плотной средами под углом падения $\alpha > \alpha_{\text{пред}}$ свет в оптически менее плотную среду не переходит и полностью отражается от границы раздела, как от зеркала.

III. Предельный угол полного отражения $\alpha_{\text{пред}}$ найдем из закона преломления, учитывая, что $\sin \beta_{\text{пред}} = \sin 90^\circ = 1$.

Рис. 4.6

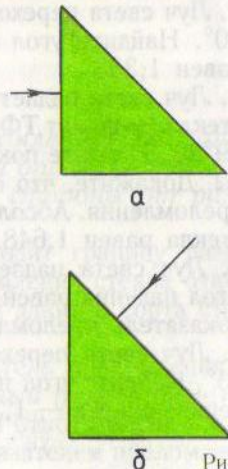
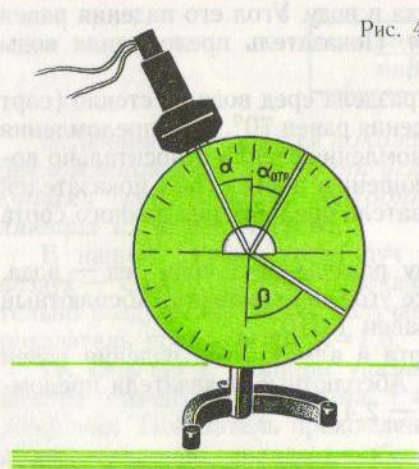


Рис. 4.7

Подставив эти значения в формулу, получим

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{n}.$$

Вопросы для самопроверки

1. При каких условиях происходит явление полного отражения света?
2. Возможно ли полное отражение при переходе пучка света из воздуха в воду; из воды в воздух; из алмаза в воду?

Упражнения

1. Определите предельный угол для воды, стекла типа крон К80 и флинт ТФ-1, алмаза. Абсолютные показатели преломления: 1,333; 1,516; 1,648; 2,417.
2. Определите предельный угол для границы раздела двух сред плексиглас — бензин. Абсолютные показатели преломления равны соответственно 1,5 и 1,4.
3. Треугольная призма, в основании которой лежит равнобедренный прямоугольный треугольник, изготовлена из стекла К80. Пучок света падает перпендикулярно грани, проходящей через катет основания (рис. 4.7, а). Нарисуйте его дальнейший ход.
4. На призму, описанную в предыдущей задаче, падает пучок света перпендикулярно грани, проходящей через гипотенузу основания (рис. 4.7, б). Нарисуйте дальнейший ход светового пучка.

§ 4.5. КОРПУСКУЛЯРНАЯ И ВОЛНОВАЯ ТЕОРИИ СВЕТА

I. Около 2,5 тыс. лет тому назад Пифагор выдвинул предположение: мы видим всевозможные предметы потому, что они испускают мельчайшие частицы, воспринимаемые глазом. Так было положено начало *корпускулярной гипотезе о природе света*. (Слово «корпускулярный» образовано от латинского слова corpusculum — тельце, маленькое тело.) В пользу этой гипотезы склоняется и И. Ньютон в своих знаменитых книгах «Лекции по оптике» (1669—1671) и «Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» (1704).

На основе корпускулярных представлений И. Ньютону удалось объяснить практически все известные в то время оптические явления, тем самым превратив первоначальную догадку в довольно стройную *корпускулярную теорию света*. Рассмотрим вкратце основные идеи этой теории.

II. Прямолинейность распространения света в однородной среде в теории рассматривается как следствие закона инерции. Для распространения света в вакууме это очевидно: на световую корпускулу не действуют силы и она движется прямолинейно и рав-

номерно. То же самое справедливо и в однородной среде, где суммарная сила, действующая на частицу, равна нулю.

Закон отражения света объясняется с помощью сравнения. Если упругий шарик бросить под некоторым углом на упругую среду (например, стол), то шарик отскочит от поверхности среды (стола) под углом, равным углу падения. Подобное произойдет и с бильярдным шаром, ударяющимся о борт стола. Очевидно, то же самое должно выполняться и со световыми корпускулами.

Закон преломления объясняется следующим образом. Пусть световая corpuscula переходит из воздуха в стекло. Более плотное стекло притягивает к себе corpusculu, скорость которой возрастает. За счет этого corpuscula приближается к перпендикуляр, т. е. угол преломления оказывается меньше угла падения.

Из корпускулярной теории можно математически строго вывести закон преломления (см. § 4.3). При этом оказывается, что абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в веществе v к скорости света в вакууме c : $n = v/c$.

Отсюда следует, что скорость световых corpuscul в веществе в n раз больше, чем в вакууме (или в воздухе): $v = nc$.

Что касается проблемы цвета, то мы к ней вернемся в § 4.10.

III. Параллельно с корпускулярной гипотезой была выдвинута идея, что свет — это волна в некоторой гипотетической среде, названной эфиром. Эту идею разделяли Р. Декарт, Р. Гук, Ф. Гримальди. Однако наибольший вклад в развитие начал волновой теории света внес Х. Гюйгенс в своем «Трактате о свете» (1690).

Дальнейшее развитие идея световых волн нашла в работах (1800–1803) Т. Юнга и особенно (1815–1821) О. Френеля. Тем самым была создана стройная *волновая теория света*, которая сумела объяснить не только закон прямолинейного распространения света, законы отражения и преломления (с чем успешно справилась и корпускулярная теория), но и некоторые другие явления, где корпускулярная теория оказалась несостоятельной.

IV. Мы не будем рассматривать вывод основных законов оптики из волновой теории, а остановимся лишь на одном законе преломления. Из волновой теории закон преломления света выводится математически строго, и при этом оказывается, что абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме c к скорости света в веществе v : $n = c/v$.

Отсюда следует, что скорость световых волн в веществе в n раз меньше скорости света в вакууме (или в воздухе): $v = c/n$.

V. Как видно, решить вопрос о том, какая теория справедлива — корпускулярная или волновая, можно, если измерить скорости света в некотором веществе и в воздухе и сравнить их. Однако измерение скорости света в веществе оказалось весьма сложной задачей, что в XVII—XVIII вв. сделать не удалось.

Только в 1850 г. через 160 лет после работ И. Ньютона и Х. Гюйгенса удалось измерить скорость света в воде (см. § 4.6). До этого экспериментально решить проблему в пользу той или иной

теории не удавалось, и обе теории использовались учеными в зависимости от их взглядов.

В России волновую теорию света пропагандировали и развивали М. В. Ломоносов и Л. Эйлер.

Вопросы для самопроверки

1. В чем сущность корпускулярной теории света?
2. Чему равен абсолютный показатель преломления согласно корпускулярной теории света?
3. В чем сущность волновой теории света?
4. Чему равен абсолютный показатель преломления согласно волновой теории света?
5. С помощью какого опыта можно подтвердить волновую или корпускулярную теорию света?

§ 4.6. СКОРОСТЬ СВЕТА

I. Существует много различных методов измерения скорости света. Однако все они в конце концов сводятся к тому, что измеряется время, в течение которого световой сигнал проходит некоторое расстояние. Разделив это расстояние на время распространения сигнала, находят скорость света.

Основная трудность заключается в том, что скорость света очень велика, поэтому приходится либо прибегать к измерению астрономических расстояний, либо (в земных условиях) учиться измерять очень маленькие промежутки времени, порядка десятитысячных долей секунды.

II. В 1609 г. Г. Галилей с помощью созданного им телескопа обнаружил у планеты Юпитер четыре спутника, названные Ио, Европа, Ганимед и Каллисто.

Наличие этих спутников подтверждает правильность теории Коперника. Согласно этой теории Земля не является единственным центром, вокруг которого происходит обращение небесных тел.

В 1676 г. датский астроном О. Ремер по наблюдениям за движением спутника Ио обнаружил интересное явление, позволившее впервые определить скорость света. Обращаясь вокруг Юпитера, спутник то погружается в тень планеты, то выходит из нее. Полный оборот спутник совершает за 42 ч 28 мин. Столько же времени должно было пройти между двумя последовательными появлениями спутника из тени.

Но поскольку Земля тоже обращается вокруг Солнца, то наблюдения за движением Ио производятся из разных точек земной орбиты. При этом О. Ремер заметил, что если наблюдать за движением этого спутника с ближайшего расстояния между Землей и Юпитером (положение 1, рис. 4.8), то можно точно предсказать момент наступления следующей вспышки. Если наблюдения вести с наиболее удаленного расстояния между ними (положение 2, рис. 4.8),

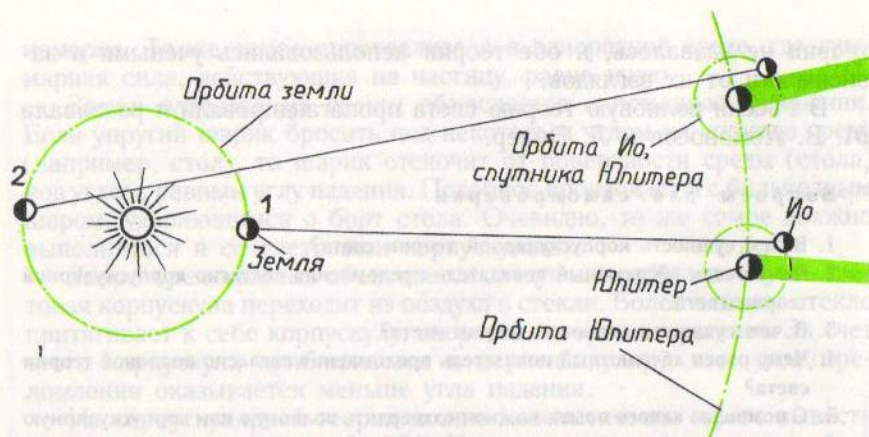


Рис. 4.8

то появление Ио из-за тени Юпитера запаздывает примерно на 22 мин от предсказанного момента.

Причину запаздывания О. Ремер объяснил правильно. Дело в том, что световому сигналу требуется больше времени, чтобы дойти до Земли, если Земля находится в положении 2, по сравнению с положением 1. А так как диаметр земной орбиты равен примерно 300 млн км, то О. Ремер смог вычислить скорость света в вакууме:

$$c = \frac{L}{t} = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ км}}{22 \cdot 60 \text{ с}} \approx 270\,000 \text{ км/с.}$$

Современные, более точные измерения дают $L = 2,992 \cdot 10^{11} \text{ м}$, $t = 16 \text{ мин } 38 \text{ с} = 998 \text{ с}$, откуда скорость света в вакууме

$$c = \frac{L}{t} = \frac{2,992 \cdot 10^{11} \text{ м}}{998 \text{ с}} = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

III. Для измерения скорости света в земных условиях нужна установка, позволяющая регистрировать очень малые промежутки времени. На рисунке 4.9 изображена принципиальная схема такой установки. Здесь свет от источника 1 проходит через полупрозрачное зеркало 2 и попадает в прерыватель 3, который пропускает свет короткими вспышками. Пройдя расстояние L , вспышка света доходит до зеркала 4, отражается от него и вновь попадает в прерыватель 3.

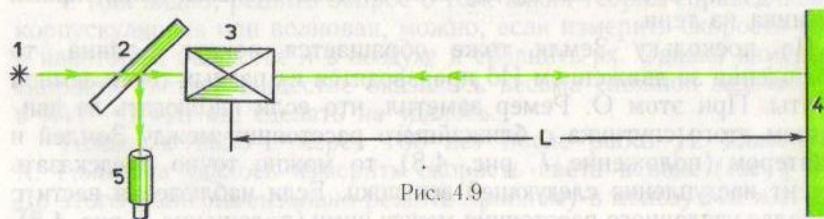


Рис. 4.9

Если прерыватель периодически пропускает, а затем гасит свет, то отраженный световой сигнал проходит через прерыватель лишь в том случае, если время движения сигнала туда и обратно равно периоду прерывания T . Но время движения сигнала туда и обратно равно $2L/c$. Следовательно, при условии $2L/c = T$ отраженный свет пройдет через прерыватель, отразится от полупосеребренного зеркала 2 и попадет в зрительную трубу 5, в которую смотрит наблюдатель. Скорость света в этом методе определится по формуле

$$c = 2L/T = 2Lv,$$

где v — частота прерываний.

IV. Впервые этот метод использовал в 1849 г. И. Физо, применив в качестве прерывателя быстровращающееся зубчатое колесо. Расстояние между зубчатым колесом и зеркалом равнялось 3,733 км. Зубчатое колесо имело 720 зубцов, и просветление возникло при частоте вращения 58 Гц. Период прерывания

$$T = \frac{1}{720 \cdot 58} \text{ с} = 2,39 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$$

частота прерываний $v = 720 \cdot 58 \text{ Гц} = 41\,760 \text{ Гц}$. Скорость света $c = 2Lv = 2 \cdot 3,733 \cdot 720 \cdot 58 \text{ км/с} = 3,18 \cdot 10^5 \text{ км/с}$. Для того времени это был очень неплохой результат.

В настоящее время, используя специальные электронные устройства, удалось измерить скорость света в вакууме с большой точностью: $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. При расчетах мы будем пользоваться приближенным значением скорости света в вакууме: $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Погрешность при этом составляет менее 0,07%.

V. В 1850 г. Л. Фуко использовал в качестве прерывателя вращающееся зеркало, что позволило уменьшить расстояние между прерывателем и зеркалом до 10 м. Пропустив свет через трубу, заполненную водой, он убедился, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе (и в вакууме). Оказалось, что скорость света в воде равна $3/4$ от скорости света в воздухе:

$$v = \frac{3}{4}c = \frac{c}{4/3} = \frac{c}{1,333}.$$

Как видно, это соответствует выводам из волновой теории света (см. § 4.5) и полностью противоречит выводам корпускулярной теории. Это послужило одним из решающих опровержений ньютоновской корпускулярной теории света.

Вопросы для самопроверки

1. Какие трудности возникают при измерении скорости света?
2. В чем сущность метода О. Ремера по измерению скорости света?
3. В чем сущность метода прерываний?
4. Какой опыт позволил опровергнуть корпускулярную теорию света?

Упражнения

1. Пользуясь волновой теорией, определите скорость света в воздухе с точностью до пяти значащих цифр ($n=1,000292$).
2. Докажите, что с точностью до трех значащих цифр скорость света в газах совпадает со скоростью света в вакууме.
3. С точностью до трех значащих цифр определите скорость света в алмазе, воде, стекле типа К80 и стекле типа ТФ-1.

§ 4.7. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

I. Опровержение корпускулярной теории света вовсе не означало автоматического признания справедливости волновой теории. Необходимо было найти такие явления, которые хорошо объяснялись бы только волновой теорией и не требовали бы никаких других гипотез. Такое явление существует — это *интерференция света*.

Для выяснения сущности явления интерференции обратимся к более простому и наглядному примеру сложения волн на поверхности воды.

II. Если вы коснетесь стерженьком поверхности воды, то вы увидите, что из этой точки начинает распространяться круговая волна в виде одиночного импульса. Если же периодически касаться стерженьком поверхности воды, то на ней образуется система круговых волн. Расстояние между двумя ближайшими гребнями или впадинами равно длине волны (рис. 4.10).

Как вам уже известно, длина волны λ определяется скоростью волны v и частотой колебаний ν :

$$\lambda = v / \nu = vT.$$

III. Рассмотрим теперь явление, которое возникнет, если на поверхности воды возбудить две волны одинаковой частоты. Для этой цели воспользуемся установкой, изображенной на рисунке 4.11. В специальную ванну налита вода, на поверхности которой двумя стерженьками S_1 и S_2 возбуждаются две круговые волны.

Заметим, что поскольку оба стерженька находятся на одной и той же упругой пластинке, то они должны колебаться совершенно одинаково и возбуждать две круговые волны, у которых одинаковые



Рис. 4.10

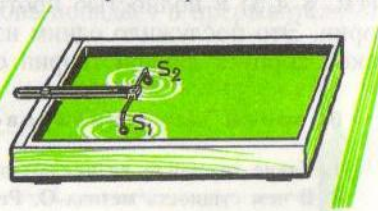


Рис. 4.11

частоты, а следовательно, и одинаковые длины. Обе эти волны встречаются во всех точках поверхности воды.

IV. На рисунке 4.12 показан результат опыта по сложению этих волн. Как видно, на некоторых участках свет не рассеивается, т. е. видны светлые полосы. Это значит, что здесь вода не колеблется, одна волна как бы гасит другую. В других участках наблюдаются рифленые темные полосы — результат рассеяния света на участках воды, где возникают сильные колебания. Здесь волны поддерживают друг друга. Иными словами, в результате сложения двух волн одинаковой частоты на одних участках возникают минимальные колебания, на других — максимальные. А это означает, что в данном случае имеет место перераспределение энергии, которую переносят волны. В самом деле, при распространении одной круговой волны во все участки поверхности воды волна приносит одинаковую энергию, которая пропорциональна квадрату амплитуды колебания. В случае же, когда встречаются две волны одинаковой частоты, энергия перераспределяется: в одних участках, где амплитуда колебания минимальная (или вовсе равна нулю), энергия колебаний также окажется минимальной (или равной нулю), а где амплитуда колебания максимальная, энергия колебаний окажется тоже максимальной. Таким образом, можно дать определение: *интерференция — это явление перераспределения энергии колебаний, возникающее при сложении двух волн одинаковой частоты*.

Устойчивая во времени картина максимумов и минимумов энергии колебаний называется *интерференционной картиной*.

V. Заметим, что, хотя мы рассмотрели интерференцию, пользуясь примером сложения волн на поверхности воды, на самом деле явление это характерно для любых волн. Важно лишь одно: источники этих волн должны колебаться совершенно одинаково, тогда и частоты обеих волн будут совпадать. В тех точках, куда волны приходят в одинаковой фазе, амплитуды складываются, а энергия колебаний оказывается максимальной. В тех точках, где волны встречаются в противофазе, амплитуда суммарного колебания окажется равной разности амплитуд, а энергия колебаний — минимальной.

В частном случае, когда амплитуды обеих волн одинаковы и равны A_0 , в точках максимума суммарная амплитуда колебания $A_{\text{макс}} = A_0 + A_0 = 2A_0$, а в точках минимума $A_{\text{мин}} = A_0 - A_0 = 0$. Соответственно энергия колебаний, которая пропорциональна квадрату амплитуды, в точ-

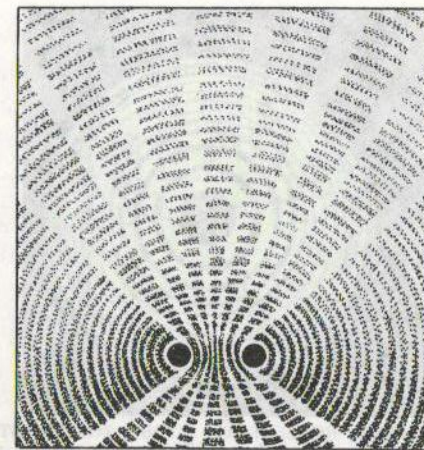


Рис. 4.12

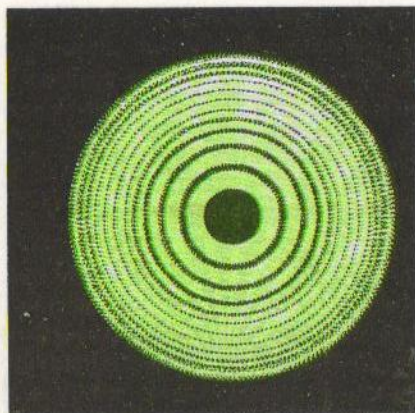


Рис. 4.13

ках максимума окажется равной $E_{\text{макс}} = 4E_0$. А в точках минимума энергия колебаний окажется равной нулю, т. е. колебаний не будет.

VI. Очевидно, что поскольку звук — это упругая волна, то должна наблюдаться интерференция звука. Опыт подтверждает это предсказание. При сложении электромагнитных волн одинаковой частоты также должно наблюдаться явление интерференции. Опыт подтверждает и это предположение. Интерференцию радиоволн одинаковой частоты можно наблюдать при любых

длинах волн — от километровых до сантиметровых.

Но если свет — волна, то обязательно должна наблюдаться интерференция световых волн. И, хотя здесь возникают некоторые трудности, интерференцию света можно наблюдать в эксперименте. И это является важнейшим решающим доказательством волновой природы света.

VII. Одну из первых установок для наблюдения интерференции света предложил И. Ньютон в 1671—1675 гг. Он понял, что наличие периодичности наблюдаемых светлых и темных колец (рис. 4.13) вызвано периодичностью свойств света, т. е. он очень близко подошел к идеям волновой теории.

Вместе с тем И. Ньютон больше склонялся к корпускулярной теории света, и это не позволило ему правильно объяснить происхождение интерференционных колец. Лишь в 1802 г. Т. Юнг на основе волновой теории правильно объяснил явление интерференции света, в том числе и происхождение колец Ньютона.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается явление интерференции?
2. В каких точках возникают интерференционные максимумы и минимумы?
3. Что называется интерференционной картиной?
4. Почему интерференцию света считают решающим доказательством волновой природы света?

§ 4.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

I. После того как было доказано, что свет — это волна, возникла проблема измерения длины световой волны и частоты ее колебаний. Естественно, что измерить можно одну из этих величин, а другую

можно вычислить, воспользовавшись соотношением между длиной волны, ее частотой и скоростью распространения.

Первым измерил длину световой волны Т. Юнг в 1803 г., используя для этого интерференционную установку. Ее схема показана на рисунке 4.14, где A и B — два отверстия в непрозрачной пластинке C . В реальном опыте размеры отверстий составляют около 0,1 мм, а расстояние между центрами отверстий $d \approx 1$ мм. Оба

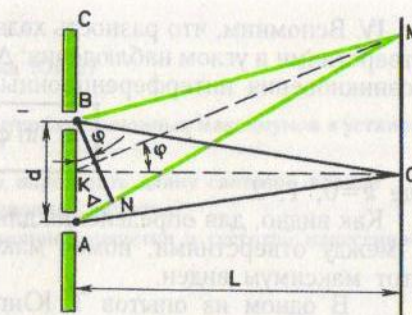


Рис. 4.14

отверстия освещаются одним источником света. Благодаря малым размерам каждое отверстие получает световые волны в разных направлениях. Встречаясь на экране OM , расположенном далеко от отверстий ($L \gg d$), обе волны складываются и дают интерференционную картину: чередование светлых и темных полос.

II. В точке O , равноотстоящей от отверстий A и B , образуется интерференционный максимум — светлая полоса. В самом деле, оба отверстия освещаются одним и тем же источником света, а потому колебания в них происходят в одной и той же фазе. Поскольку $AO = BO$, то в точку O волны придут также в одинаковой фазе, и здесь возникает интерференционный максимум. Он называется центральным или нулевым максимумом.

III. Иначе обстоит дело в произвольной точке M , поскольку колебания от отверстий A и B проходят разные расстояния, за счет чего может возникнуть разность фаз. Построим отрезок $BN \perp KM$. Тогда при $L \gg d$ отрезок $MN = MB$, а отрезок $\Delta = AN = AM - BM$. Этот отрезок называется разностью хода. Угол $\angle ABN = \angle MKO = \phi$ (как углы со взаимно перпендикулярными сторонами). Отсюда следует, что разность хода $\Delta = d \sin \phi$.

Поскольку отрезок $BM = MN$, то изменение фазы определяется только разностью хода. В самом деле, если на разности хода уложится половина длины волны $\lambda/2$, то фаза колебаний в точке N противоположна фазе колебаний на отверстиях A и B и в точке M обе волны придут в противофазе. Значит, здесь возникает интерференционный минимум — темная полоса (см. рис. 4.13). Тот же результат получится, если на разности хода уложится нечетное число полуwave:

$$\Delta = (2k+1) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } k \text{ — целое число, например } \Delta = 3\lambda/2, 5\lambda/2, 7\lambda/2$$

и т. д.

Если же на разности хода уложится длина волны, то в точку M обе волны придут в одинаковой фазе. Значит, в данной точке возникает интерференционный максимум — светлая полоса (см. рис. 4.13). Тот же результат получится, если на разности хода уложится целое число длин волн: $\Delta = k\lambda = 2k\lambda/2$.

IV. Вспомним, что разность хода определяется расстоянием между отверстиями и углом наблюдения: $\Delta = d \sin \varphi$. Отсюда получим условие возникновения интерференционных максимумов в установке Юнга:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где $k=0, 1, 2, \dots$

Как видно, для определения длины волны нужно знать расстояние d между отверстиями, номер максимума k и угол φ , под которым этот максимум виден.

В одном из опытов Т. Юнга расстояние между отверстиями $d=1$ мм, расстояние до экрана $L=1,2$ м и первый максимум в зеленом свете наблюдался на расстоянии $x=OM=0,6$ мм от центрального максимума. Здесь $x \ll L$, следовательно,

$$\sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{x}{L} = \frac{0,6}{1200} = 5 \cdot 10^{-4}.$$

Поскольку $k=1$ (первый максимум), то длина световой волны, соответствующая зеленому цвету, равна $\lambda = d \sin \varphi = 1 \text{ мм} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ мм} = 0,5 \text{ мкм}$.

V. Измерять длину световой волны с помощью установки Юнга неудобно. Более точные результаты получаются с помощью *дифракционной решетки*. Она представляет собой стеклянную пластинку, на которой алмазным резцом (или другими средствами) наносится очень большое число параллельных штрихов (рис. 4.15). Существуют также отражательные металлические дифракционные решетки.

Даже простейшие дифракционные решетки имеют от 50 до 200 штрихов на 1 мм, а хорошие решетки в исследовательских лабораториях имеют 500—600 штрихов на 1 мм. Если плотность штриховки обозначить через N , то расстояние между двумя соседними прозрачными участками $d=1/N$. Это расстояние называется *постоянной* или *периодом решетки*.

Дифракционная решетка представляет собой огромное множество щелей, поэтому условие наблюдения интерференционных максимумов совпадает с условием для опыта Т. Юнга. Но возникающая с помощью дифракционной решетки интерференционная картина существенно ярче. Она более удобна для исследования, поскольку постоянная решетка мала и угол наблюдения значительно больше, чем в установке Юнга.

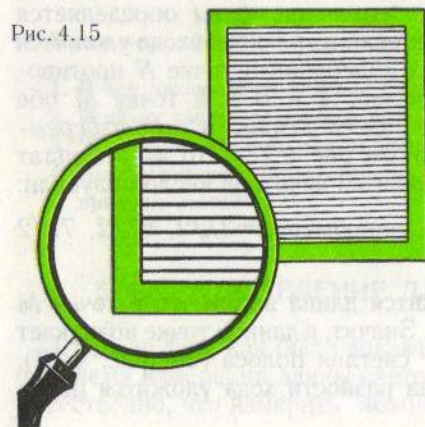


Рис. 4.15

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой установка Юнга?
2. Что такое разность хода?
3. Каково условие возникновения интерференционных максимумов в установке Юнга?
4. Как с помощью установки Юнга определить длину световой волны?
5. Что представляет собой дифракционная решетка?
6. Каково соотношение между постоянной решетки и плотностью нанесения на нее штрихов?

Упражнения

1. У красного света длина волны равна 0,7 мкм. На каком расстоянии от центрального максимума будет наблюдаться первый и второй максимумы, если в установке Юнга расстояние между отверстиями равно 0,8 мм, а расстояние до экрана равно 1,5 м?
2. Дифракционная решетка, имеющая 200 штрихов на 1 мм, освещается синим светом. Определите длину световой волны и ее частоту, если первый максимум виден под углом $5^\circ 30'$.
3. Определите, сколько всего максимумов в красном свете (длина волны 0,68 мкм) можно увидеть с помощью дифракционной решетки, имеющей 600 штрихов на 1 мм. (Указание. Синус не бывает больше 1.)
4. На дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, падает зеленый свет. Экран расположен от решетки на расстоянии 1,2 м. Расстояние между центральным и третьим максимумами равно 63,5 см. Определите длину световой волны.

§ 4.9. СВЕТ — ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

I. Итак, мы видим, что с помощью явления интерференции удалось обосновать волновую природу света и измерить длины волн и соответствующие частоты света разных цветов. После этого сомнения в правильности волновой теории света больше не возникали. Однако не все трудности были преодолены. Остался один очень сложный вопрос: в какой среде распространяются световые волны?

Вспомним, что в волновой теории звука таких трудностей нет. Звук — это упругая волна в веществе. Звуковые волны могут распространяться в газах (например, в воздухе), жидкостях (например, воде) и в твердых телах (например, в металлах, дереве, минералах и др.). При этом звуковые волны в газах и жидкостях — это продольные волны, в твердых телах возможны как продольные волны, возникающие за счет деформации сжатия и разрежения слоев

вещества, так и поперечные волны, возникающие за счет деформации сдвига одного слоя твердого вещества относительно другого.

Поскольку никаких других волн, кроме упругих, физики в первой половине XIX в. еще не знали, то была выдвинута гипотеза, что свет — это тоже упругая волна. Среду же, в которой распространяются световые волны, называли *светоносным эфиром* или просто *эфиром*. Однако эфирная гипотеза не спасла положение. Более того, она привела к дополнительным трудностям.

II. В самом деле, известно, что свет до нас доходит от Солнца, Луны, планет и звезд, отстоящих от Земли на огромных расстояниях, порядка сотен тысяч (Луна), сотен миллионов (Солнце) и миллиардов (звезды) километров. Следовательно, мы должны предположить, что все это пространство заполнено упругим эфиром. Но тогда непонятно, почему небесные тела, двигаясь сквозь эфир, не испытывают сопротивления и не тормозятся.

Большая трудность, которая встала перед гипотезой светоносного эфира, — это решение проблемы совмещения огромной скорости света и упругости эфира. В теории упругих волн доказывается, что большая скорость волны является следствием большой упругости вещества. Но скорость упругих волн даже в лучших сортах стали не превышает 6 км/с, а скорость света в вакууме больше в 50 000 раз. Следовательно, упругость эфира должна в сотни тысяч раз превосходить упругость стали. Но как же тогда планеты, Луна и другие небесные тела могут двигаться сквозь эфир, не испытывая никакого сопротивления?

Эта проблема не могла быть решена гипотезой упругого эфира. Видимо, это было основной причиной отказа И. Ньютона от волновой теории света, хотя он ясно представлял себе, что свет обладает периодическими свойствами.

III. Вторая неразрешимая проблема, возникшая перед гипотезой упругого эфира, заключалась в следующем. В 1808 г. Э. Малюс обнаружил, что свет является поперечной волной. В 1819—1821 гг. О. Френель поставил ряд опытов, с помощью которых убедительно было подтверждено, что свет является строго поперечной волной, а продольные колебания в световой волне отсутствуют.

Гипотеза упругого эфира встала перед непреодолимой трудностью: ведь поперечные волны возможны только в твердых телах. Но если принять, что эфир — это твердое тело, то невозможно объяснить свободное движение в нем планет, спутников, комет и других небесных тел. Более того, если в твердом теле возбудить строго поперечную волну, то все равно на расстоянии в несколько длин волн возникнет продольная составляющая, причем ее скорость окажется больше скорости поперечной составляющей. Как известно, со звуком так и происходит, и это учитывается в сейсмической разведке. Если бы у световой волны возникла продольная составляющая, то от любого светящегося тела (а тем более от далеких звезд) мы получили бы два световых сигнала, т. е. увидели бы двойное изображение. Но ничего подобного в природе не наблюдается. Значит, у световых

волн нет продольной составляющей. Все попытки разрешить эти трудности на основе гипотезы упругого эфира оказались безрезультатными.

IV. Проблема была решена Дж. Максвеллом в 1865 г. на основании разработанной им теории электромагнитных волн. Как мы уже говорили, он создал теорию электромагнитного поля, сформулировав ее в виде системы из четырех уравнений, которые сейчас называются *уравнениями Максвелла*. Из этих уравнений вытекало, что *возможно существование электромагнитных волн, скорость которых в вакууме равна $V=3,00 \cdot 10^8$ м/с, т. е. равна скорости света*. Кроме того, из теории вытекало, что *электромагнитные волны поперечны* (см. рис. 3.21).

Исходя из того, что экспериментально измеренная скорость света оказалась равной скорости электромагнитных волн, предсказанной теоретически, а также из того, что эти волны поперечны, Дж. Максвелл выдвинул смелое предположение, что *свет — это электромагнитная волна*. Все дальнейшее развитие науки подтвердило эту идею Дж. Максвелла.

V. Электромагнитная теория света, сохранив экспериментально установленный факт волновой природы света, устранила все трудности, которые возникли в гипотезе упругого светоносного эфира.

Свет — это небольшой участок излучения шкалы электромагнитных волн, показанной на рисунке 4.16. Именно это излучение воспринимает глаз человека. Остальные виды излучений невидимы. Диапазон видимого излучения примерно от 0,4 (красный свет) до 0,7 мкм (фиолетовый свет). Слева от области видимого излучения изображено инфракрасное излучение с длинами волн от 0,74 мкм до 1—2 мм, открытое Гершелем в 1800 г. Оно испускается нагретыми телами, поэтому инфракрасное излучение называют тепловым излучением. Это не совсем верно: при высокой температуре (свыше 800 °C) нагретые тела испускают и видимое излучение, продолжая также испускать и инфракрасное.



Рис. 4.16

Справа от области видимого излучения изображено ультрафиолетовое излучение с длинами волн от 0,4 мкм до 10 нм, открытое в 1801 г. И. Риттером и У. Волластоном. Оно также не воспринимается глазом, но оказывает довольно сильное химическое действие на фотопленку, а также биологическое действие. Так, за счет облучения кожи ультрафиолетовым излучением возникает загар. Однако при больших дозах ультрафиолетовое излучение способно вызвать повреждение глаз и ожог кожи.

К электромагнитным волнам относятся также радиоволны, рентгеновское и гамма-излучения (см. рис. 4.16).

VI. После опытов Г. Герца максвелловская теория электромагнитных волн и как ее часть электромагнитная теория света были приняты физической наукой и стали основой научной картины мира. Однако еще продолжались попытки представить электромагнитное поле как некоторое состояние эфира, уже не светового, а электромагнитного. Но эти попытки успеха не имели.

И лишь в начале XX в., после создания А. Эйнштейном теории относительности, стало ясно, что электромагнитное поле — это не состояние какого-то вещества, а самостоятельная сущность, особая форма материи. *В природе существуют две формы материи — вещество и электромагнитное поле.* Как вещество, так и электромагнитное поле — реальные объекты, обнаруживаемые в физическом эксперименте. Электромагнитное поле не является свойством какого-либо вещества, так же как вещество нельзя представить как некоторое свойство электромагнитного поля.

Вопросы для самопроверки

1. Почему учеными была выдвинута гипотеза упругого эфира?
2. Какие трудности возникли в связи с гипотезой упругого эфира?
3. Можно ли согласовать гипотезу упругого эфира с поперечностью световых волн? Какие трудности при этом возникают?
4. Что такое свет с точки зрения современной физической теории?
5. На основе каких соображений Дж. Максвелл выдвинул свою гипотезу о природе света?
6. Какое место занимает видимое глазом излучение в шкале электромагнитных волн?

§ 4.10. ДИСПЕРСИЯ. СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ

I. Еще в глубокой древности люди любовались радугой. Позже, когда они научились изготавливать стекло и шлифовать из него зеркала, они заметили, что на краях зеркала часто видна та же система цветов, что и в радуге. Но только в 1666 г. И. Ньютон провел систематическое исследование этого явления. Вот как выглядели поставленные им опыты.

Сквозь небольшое отверстие в ставне в темную комнату проникал узкий пучок солнечного света. Поставив на пути пучка трехгранную стеклянную призму, И. Ньютон обнаружил, что пучок отклоняется к основанию призмы и при этом белый свет разлагается на разные цвета. Сильнее всего отклоняется свет фиолетового цвета, слабее всего — красного (см. цветную вклейку I, 1). Всего И. Ньютон насчитал семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Полученную цветную картину называли *спектром*. (Слово «спектр» образовано от латинского слова spectrum — видение, представление, образ.)

Выделяя с помощью экрана с отверстием поочередно один из цветов спектра, он пропустил этот свет через вторую призму и убедился, что ни один из спектральных цветов не разлагается на другие цвета. Отсюда И. Ньютон сделал важные выводы, которые мы приведем почти в дословной формулировке:

1. Существуют *простые цвета*, которые не могут изменяться при отражении и преломлении или за счет других причин.
2. Каждому цвету соответствует определенная степень преломляемости: наименее преломляемые лучи соответствуют красному цвету, наиболее преломляемые — фиолетовому.
3. Изменение цвета может происходить при смешении простых цветов: например, смесь желтого с синим дает зеленый цвет, смесь красного с желтым — оранжевый.
4. Наиболее удивительной и чудесной смесью цветов является белый свет. Он всегда сложен, и для его получения нужна смесь всех простых цветов в правильных пропорциях.
5. На этой основе естественно объясняется появление цветов радуги в падающих дождевых каплях.
6. На этой же основе объясняются цвета тел. Они зависят только от различной способности тел отражать и поглощать простые цвета.

II. Как видно, И. Ньютон создал на основе системы детально поставленных опытов достаточно полную феноменологическую теорию света и цветов, справедливую и в современных условиях. При этом он не выдвигал никаких гипотез о природе света. По этому поводу он писал: «Не так легко, однако, с несомненностью и полно определить, что такое свет, почему он преломляется и каким способом или действием он вызывает в нашей душе представление цветов; я не хочу здесь смешивать домыслы с достоверностью». Это характеризует метод Ньютона, его стремление избегать домыслов, т. е. произвольных гипотез, его твердую убежденность в необходимости строго следовать только твердо установленным опытным фактам.

Однако нам-то теперь известно, что свет — это *электромагнитная волна* и это не домысел, а факт, установленный опытным путем. Поэтому нам следует рассмотреть и объяснить опытные факты, полученные И. Ньютоном, на основе электромагнитной теории света.

III. Для этого вернемся к опыту по измерению длины световой волны с помощью дифракционной решетки. На цветной вклейке II изображены интерференционные картины, полученные при освеще-

нии решетки красным, зеленым и белым светом. Интерференционные максимумы красного цвета расположены дальше от нулевого максимума, чем максимумы зеленого цвета. Это легко объяснить, воспользовавшись формулой $d \sin \varphi = k\lambda$. Ясно, что красному цвету соответствует большая длина волны, чем зеленому; поэтому и интерференционные максимумы наблюдаются у красного света под большими углами, чем у зеленого.

Если же решетка освещается белым светом, то только нулевой максимум имеет белый цвет. Действительно, при $k=0$ угол $\varphi=0$ независимо от длины волны. Все остальные максимумы окрашены в цвета спектра.

Таким образом, оказывается, что *каждому простому цвету (терминология И. Ньютона) соответствует электромагнитная волна с определенной длиной волны и соответственно с определенной частотой $\nu=c/\lambda$. Такой свет называется монохроматическим.* (Слово «монохроматический» образовано от греческих слов *monos* — один, единый и *chromatikos* — цветной, окрашенный.) *Белому свету не соответствует какая-либо одна частота (одна длина волны). Это смесь большого числа монохроматических волн с широким набором частот, смешанных в определенной пропорции.*

IV. В чем же сущность явления дисперсии? Оказывается, что электромагнитные волны с разными частотами только в вакууме распространяются с одинаковой скоростью c . В веществе скорость волны *зависит от ее частоты, причем обычно волна с малой частотой (например, красный свет) распространяется быстрее волны с большей частотой (например, фиолетовый свет).* Так вот, *зависимость скорости света в веществе от частоты световой волны называется дисперсией.*

Конечно, можно назвать дисперсией и зависимость скорости света в веществе от длины волны, но при этом надо помнить, что речь идет о длине волны в вакууме. В веществе же длина волны *изменяется, а частота колебаний остается неизменной.*

Но если скорость v волны в веществе зависит от ее частоты, то и показатель преломления $n=c/v$ тоже зависит от частоты световой волны. Зависимость показателей преломления некоторых веществ от длин волн в вакууме показана в таблице.

Длина волны в вакууме, нм	Цвет	Стекло (тяжелый флинт ТФ-1)	Стекло (легкий крон К80)	Вода	Каменная соль
656,3	Красный	1,6444	1,5145	1,3311	1,5407
589,3	Желтый	1,6499	1,5170	1,3330	1,5443
546,1	Зеленый	1,6546	1,5191	1,3345	1,5475
480,0	Синий	1,6648	1,5235	1,3374	1,5541
404,7	Фиолетовый	1,6852	1,5318	1,3428	1,5665

V. Поскольку показатель преломления зависит от частоты световой волны (от длины волны в вакууме), то при одном и том же угле падения α угол преломления β также зависит от частоты. В самом деле, для красного и фиолетового света закон преломления света запишется так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_{\text{кр}}} = n_{\text{кр}},$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_{\text{ф}}} = n_{\text{ф}}.$$

Разделив первое равенство на второе, получим

$$\frac{\sin \beta_{\text{ф}}}{\sin \beta_{\text{кр}}} = \frac{n_{\text{кр}}}{n_{\text{ф}}}.$$

Поскольку $n_{\text{кр}} < n_{\text{ф}}$, то $\beta_{\text{кр}} > \beta_{\text{ф}}$, т. е. фиолетовый свет преломляется сильнее, а фиолетовый луч оказывается ближе к перпендикуляру, чем красный (рис. 4.17). Если же свет проходит через две грани призмы, то эффект лишь усилится. Этим и объясняется явление спектрального разложения белого света за счет дисперсии.

VI. Итак, за счет интерференции (например, с помощью дифракционной решетки) или за счет дисперсии (например, с помощью трехгранной призмы) можно белый свет разложить на составляющие монохроматические цвета, т. е. осуществить *спектральное разложение*. Спектральное разложение света — это пространственное разделение сложной световой волны (например, белого света) на ее монохроматические составляющие.

Возможен и обратный процесс — синтез белого света из его монохроматических составляющих. Впервые это осуществил И. Ньютон в своих опытах по дисперсии света. Разложив с помощью призмы солнечный свет в спектр, он затем собрал вместе все цвета с помощью второй призмы или с помощью линзы и вновь получил белый свет.

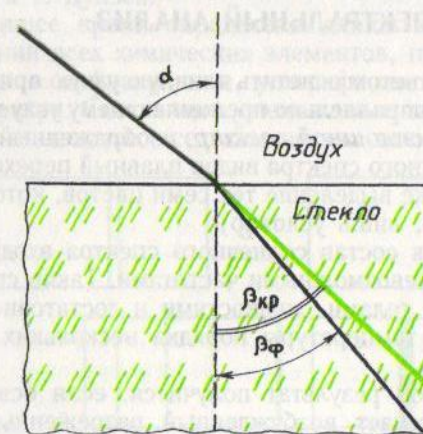


Рис. 4.17

Синтез света используется в цветном телевизоре. У него экран кинескопа содержит огромное количество ячеек (около 550 000), способных светиться при их бомбардировке пучком электронов. Один из элементов испускает красный свет, второй — зеленый и третий — синий. При смешении этих цветов в зависимости от яркости свечения того или иного элемента образуются всевозможные цвета. Это позволяет получить цветное изображение.

Вопросы для самопроверки

1. Как с помощью призмы получить спектр?
2. Какие цвета И. Ньютон назвал простыми?
3. Что представляют собой простые цвета с точки зрения волновой теории света? Как это можно доказать опытным путем?
4. Какой свет называется монохроматическим?
5. Что называется дисперсией?
6. С помощью каких приборов можно осуществить спектральное разложение белого света?
7. Как можно осуществить синтез белого света?

Упражнения

1. Пучок белого света падает из воздуха на пластинку из стекла типа флинт. Угол падения равен 60° . Найдите углы преломления для красного и синего света.
2. Определите скорость красного и фиолетового света в стекле типа крон с точностью до пяти значащих цифр. Скорость света в вакууме $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с.
3. Определите предельный угол полного отражения для зеленого света в стекле типа крон. Произойдет ли при этом полное отражение красного света?

§ 4.11. СПЛОШНОЙ И ЛИНЕЙЧАТЫЙ СПЕКТРЫ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

I. Если солнечным светом осветить длинную узкую прямоугольную щель, расположенную параллельно преломляющему углу трехгранной призмы, то мы увидим *сплошной спектр*, изображенный на цветной вклейке III, 1. У сплошного спектра виден плавный переход от одного цвета к другому, а также выделение тех семи цветов, которые назвал И. Ньютон (возможно, лишь условно).

Это означает, что в состав солнечного спектра входят электромагнитные волны со всевозможными частотами. Таков спектр света, излучаемого твердыми телами, жидкостями и достаточно плотными газами, нагретыми до температуры порядка нескольких тысяч градусов.

II. Совершенно иной результат получится, если осветить щель светом, который испускает возбужденный разреженный газ. Это

может быть либо газ, нагретый до высокой температуры (десятков тысяч градусов), либо электрический разряд в плазме (см. цветную вклейку I, 2). Мы увидим несколько ярких цветных линий на черном фоне. Такой спектр называется *линейчатым спектром испускания*.

Очевидно, возбужденный газ излучает электромагнитные волны с дискретным набором частот (дискретным набором длин волн). При этом каждый химический элемент испускает характерный спектр, отличный от спектров других элементов. На цветной вклейке III изображены линейчатые спектры испускания натрия (см. III, 2), водорода (см. III, 3) и гелия (см. III, 4).

III. Если свет от раскаленного твердого тела проходит через разреженный газ, а затем освещает щель, то виден сплошной спектр, на котором наблюдается система черных линий. Такой спектр называется *линейчатым спектром поглощения*.

Заметим, что каждая линия в линейчатом спектре испускания или поглощения является изображением щели в характерном монохроматическом свете, который излучает или поглощает данный газ.

Обратите внимание на то, что линии поглощения расположены точно в тех же участках спектра, где расположены яркие линии в линейчатом спектре испускания. Это видно при сопоставлении линейчатых спектров испускания и поглощения для натрия, водорода и гелия (сравните III, 2 и III, 6; III, 3 и III, 7; III, 4 и III, 8).

IV. Поскольку линии испускания и поглощения характерны для каждого химического элемента, то по линиям спектра можно определить, входит ли данный химический элемент в исследуемое вещество. Например, на рисунке 4.18, а, б изображены линии спектров двух химических элементов, а на рисунке 4.18, в — линии спектра некоторого сложного вещества. Видно, что первый химический элемент в сложное вещество не входит, а второй — входит.

Анализ химического состава того или иного вещества по его линейчатому спектру испускания или поглощения называется *спектральным анализом*. Этот метод разработали в 1859 г. Г. Кирхгоф и Р. Бунзен.

В настоящее время определены длины волн и яркость спектральных линий всех химических элементов, причем не только в видимом, но и в инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском участках спектра. Составлены специальные таблицы, где приведены все данные о спектрах всех химических элементов. Это позволяет

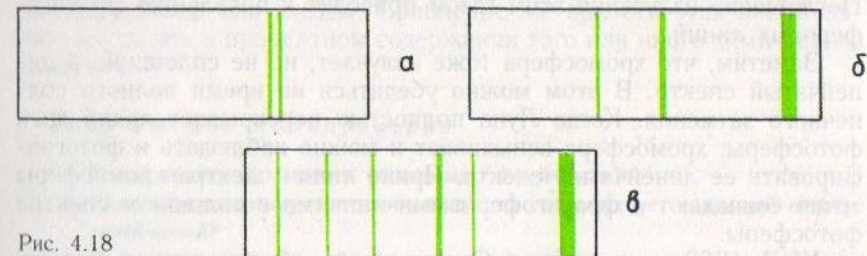


Рис. 4.18

во многих случаях взамен длительного и дорогостоящего химического анализа провести спектральный экспресс-анализ. Такой метод широко применяется в металлургии, геологии, ядерной физике, сельском хозяйстве, химии и т. д.

С помощью спектрального анализа были обнаружены предсказанные Д. И. Менделеевым новые, неизвестные в то время химические элементы *галлий*, *германий* и *скандий* (он назвал их эка-алюминий, экакремний и экабор). Это было расценено как триумф химической науки.

В 1894 г. Дж. Рэлей и У. Рамзай с помощью спектрального анализа открыли новый химический элемент — инертный газ *аргон*, определили его свойства и место в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

V. Исключительно важную роль играет спектральный анализ в астрономии. Это единственный метод, позволяющий определить химический состав Солнца и звезд.

В 1802 г. У. Волластон обратил внимание на наличие в спектре Солнца темных линий, однако объяснить их происхождение он не смог. И. Фраунгофер в 1814—1815 гг. исследовал и объяснил происхождение темных линий в солнечном спектре. В дальнейшем их стали называть фраунгоферовыми линиями (см. цветную вклейку III, 5).

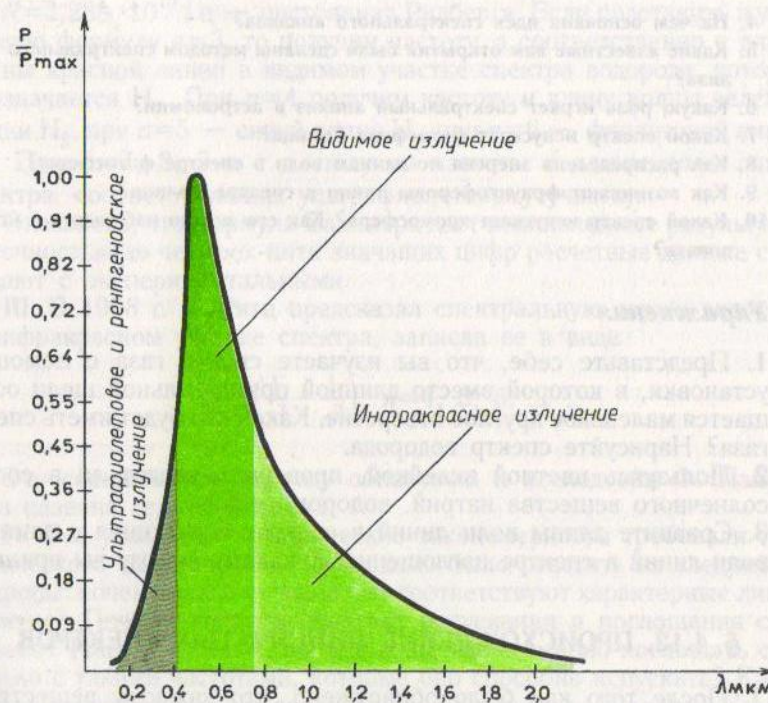
Возникновение фраунгоферовых линий поглощения объясняется следующим образом. Видимый наружный слой Солнца (фотосфера) представляет собой достаточно плотный слабоионизованный газ, в основном водород. Его давление около 1 гПа, плотность порядка $2 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ и температура около 6000 °С. При этих условиях излучение фотосферы содержит всевозможные частоты, т. е. имеет сплошной спектр.

Распределение энергии в спектре фотосферы по длинам волн представлено на рисунке 4.19. Как видно, максимум излучения приходится на длину волны 0,5 мкм (сине-зеленый участок спектра), несколько меньше мощность излучения в диапазонах фиолетового и желто-красного цвета. Кроме видимого излучения, фотосфера излучает в коротковолновом диапазоне ультрафиолетовое и рентгеновское излучения и в длинноволновом диапазоне — инфракрасное излучение.

Излучение из фотосферы проходит через находящийся над ней слой хромосферы, представляющий ионизованный разреженный газ. Поглощение излучения этим газом приводит к появлению фраунгоферовых линий.

Заметим, что хромосфера тоже излучает, но не сплошной, а линейчатый спектр. В этом можно убедиться во время полного солнечного затмения. Когда Луна полностью перекрывает яркий диск фотосферы, хромосфера вспыхивает и можно наблюдать и фотографировать ее линейчатый спектр. Яркие линии спектра хромосферы точно совпадают с фраунгоферовыми линиями в сплошном спектре фотосферы.

VI. В 1868 г. в спектре Солнца было обнаружено несколько



фраунгоферовых линий, которые не принадлежали ни одному из известных в то время химических элементов. Вновь открытый ими химический элемент был назван *гелием*. (Слово «гелий» образовано от греческого слова *helios* — Солнце, т. е. солнечное вещество.)

Позже этот инертный газ был обнаружен в атмосфере Земли и исследован. Оказалось, что на Земле гелия очень мало, но во Вселенной он сильно распространен, занимая второе место после водорода.

Итак, по длинам световых волн, соответствующих тем или иным линиям спектров испускания или поглощения, мы судим о наличии или отсутствии того или иного химического элемента в составе вещества Солнца или звезды. Сравнение же яркости этих линий позволяет судить о процентном содержании того или иного химического элемента.

Вопросы для самопроверки

1. Какой спектр называется сплошным; линейчатый?
2. Какому агрегатному состоянию вещества соответствует сплошной спектр; линейчатый?
3. При каких условиях наблюдаются линейчатые спектры испускания и поглощения?

4. На чем основана идея спектрального анализа?
5. Какие известные вам открытия были сделаны методом спектрального анализа?
6. Какую роль играет спектральный анализ в астрономии?
7. Какой спектр испускает фотосфера Солнца?
8. Как распределена энергия по длинам волн в спектре фотосферы?
9. Как возникают фраунгоферовы линии в спектре Солнца?
10. Какой спектр испускает хромосфера? Как его можно наблюдать и исследовать?

Упражнения

1. Представьте себе, что вы изучаете спектр газа с помощью установки, в которой вместо длинной прямоугольной щели освещается маленькое круглое отверстие. Какой вид будет иметь спектр газа? Нарисуйте спектр водорода.
2. Пользуясь цветной вклейкой, проверьте, входят ли в состав солнечного вещества натрий, водород, гелий.
3. Сравните длины волн линий в спектре испускания с длинами волн линий в спектре поглощения. К какому выводу вы пришли?

§ 4.12. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ

I. После того как было обнаружено, что каждому веществу в газообразном состоянии соответствует характерный набор линий в спектре испускания или поглощения, возник вопрос: нельзя ли найти какие-то закономерности, которые позволят вычислить соответствующую длину волны (или частоту)? В 1855 г., анализируя спектр водорода, И. Бальмер нашел, что длины волн четырех линий видимого участка спектра можно описать формулой

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

где $\lambda_0 = 364,60$ нм; $n = 3, 4, 5, 6$. Эту серию в дальнейшем стали называть *серией Бальмера*.

Формула Бальмера впервые указала на роль целых чисел в спектральных закономерностях. Это сыграло важную роль в развитии учения о строении атомов. Однако в конце XIX — начале XX в. смысл этих целых чисел оставался еще загадочным.

II. В 1890 г. И. Ридберг придумал серии Бальмера более удобный вид, записав ее для частот спектральных линий спектра водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots,$$

где $R = 3,288 \cdot 10^{15}$ Гц — постоянная Ридберга. Если подставить в указанную формулу $n = 3$, то получим частоту, а соответственно и длину волны красной линии в видимом участке спектра водорода, которая обозначается H_α . При $n = 4$ получим частоту и длину волны зеленой линии H_β , при $n = 5$ — синей линии H_γ , при $n = 6$ — фиолетовой линии H_δ . При $n = 7, 8, 9$ и т.д. получим частоты и длины волн линий спектра, соответствующих ультрафиолетовому участку.

Оказалось, что формула Бальмера дает великолепные результаты. С точностью до четырех-пяти значащих цифр расчетные данные совпадают с экспериментальными.

III. В 1908 г. В. Ритц предсказал спектральную серию водорода в инфракрасном участке спектра, записав ее в виде

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

Эту серию в том же году обнаружил и исследовал Ф. Пашен. Она названа *серией Пашена*.

IV. Все указанные эмпирические закономерности требовали теоретического обоснования. Необходимо было ответить на следующие вопросы: почему каждому веществу соответствуют характерные линии спектра? Почему линии в спектрах испускания и поглощения совпадают? Иными словами, почему вещество способно поглощать свет только с такими частотами, которые оно способно испускать? Какой смысл имеют целые числа в сериях Бальмера и Пашена? Какова связь между спектральными закономерностями и строением атомов вещества?

Дать ответы на все эти вопросы сразу оказалось весьма сложно. Двадцать лет потребовалось для их решения. Первый и решающий шаг сделал Н. Бор в 1913 г. Затем усилиями ряда ученых, в том числе и самим Н. Бором, В. Гейзенбергом и Э. Шредингером, была создана квантовая механика, которая полностью решила проблему строения атомов, молекул, кристаллов и в том числе структуры спектров.

Квантовая механика является довольно сложной теорией, изложить которую полностью в данном учебнике невозможно, поэтому мы ограничимся рассмотрением идей, изложенных в первой работе Н. Бора.

V. Итак, Н. Бор пришел к выводу: *линейчатые спектры испускаются атомами вещества*, т. е. электроны в атоме переходят из одного состояния в другое. В связи с этим он выдвинул два предположения, которые названы постулатами.

Первый постулат (постулат стационарных состояний). Атом может находиться в особых, стационарных состояниях. (Слово «стационарный» образовано от латинского слова stationarius — неподвижный.) Находясь в этих состояниях, он не излучает и не поглощает электромагнитные волны. Каждому

стационарному состоянию соответствует определенное значение энергии — энергетический уровень.

Второй постулат (правило частот). При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_k испускается или поглощается один квант энергии:

$$h\nu = E_n - E_k,$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка.

Понятие *квант* (слово «квант» образовано от латинского слова quantum — сколько) означает наименьшее количество какой-либо величины, например наименьшая порция энергии $\epsilon = h\nu$, поглощаемая или излучаемая системой, собственная частота которой равна ν . Понятие *квантование энергии* ввел М. Планк в 1900 г., а в 1905 г. А. Эйнштейн выдвинул идею, согласно которой монохроматическая электромагнитная волна частотой ν состоит из отдельных порций — *квантов излучения* — с энергией $\epsilon = h\nu$. В настоящее время квант электромагнитного излучения называется *фотоном*. (Слово «фотон» образовано от греческих слов phos и photos — свет.)

Испускание кванта электромагнитного излучения (фотона) происходит при переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, поглощение кванта — при переходе атома из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией.

VI. Согласно первому постулату Бора, энергия атома не может принимать любые произвольные значения. Существует только некоторый определенный набор значений энергий — набор энергетических уровней. Графически энергетические уровни принято изображать, как это показано на рисунке 4.20. Здесь также показан схематически переход атома с более высокого энергетического уровня E_3 на более низкий энергетический уровень E_1 , сопровождающийся испусканием кванта с энергией $h\nu_{3,1} = E_3 - E_1$. Переход же атома с более низкого энергетического уровня E_2 на более высокий энер-

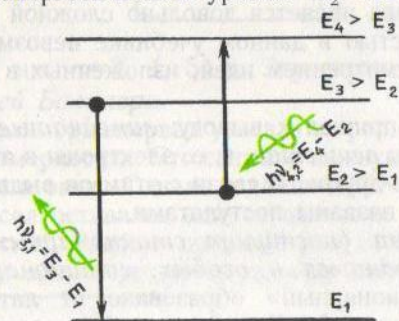


Рис. 4.20

гетический уровень E_4 сопровождается поглощением кванта с энергией $h\nu_{4,2} = E_4 - E_2$.

Очевидно, что у атомов данного химического элемента в связи с особенностями распределения электронов на электронных оболочках имеется свой характерный набор энергетических уровней. Следовательно, атомам этого химического элемента будут соответствовать характерные линии в спектре испускания, отличные от линий в спектре другого элемента.

Аналогично объясняется тот факт, что линии в спектрах испускания и поглощения совпадают. В самом деле, частоты волн, соответствующие этим линиям в спектре, определяются одними и теми же энергетическими уровнями. Поэтому атомы могут поглощать электромагнитные волны только с теми частотами, которые они способны сами испускать.

Вопросы для самопроверки

1. Спектр какого вещества описывает серия Бальмера?
2. Какие величины можно рассчитать с помощью формулы Бальмера?
3. Как записывается серия Бальмера для частот?
4. Как записывается серия Пашена? Какой участок спектра она описывает?
5. Как формулируется первый постулат Бора?
6. Как формулируется второй постулат Бора?
7. Что означает понятие *квант*?
8. В каких случаях происходит поглощение кванта; испускание кванта?
9. Как с помощью постулатов Бора объяснить, что частоты (длины волн) в спектрах испускания и поглощения совпадают?

Упражнения

1. Найдите частоту и длину волны излучения, испускаемого атомами ртути при торможении электронов, если их кинетическая энергия равна 4,86 эВ. К какой области спектра относится это излучение?
2. Атом переходит с энергетического уровня с энергией $E_2 = -25,2$ эВ на уровень с энергией $E_1 = -26,9$ эВ. Найдите частоту и длину волны испускаемого кванта. К какой области спектра относится это излучение?

§ 4.13. СПЕКТРАЛЬНЫЕ СЕРИИ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

I. Пользуясь постулатами Бора, можно вычислить частоты (и длины волн), соответствующие линиям спектров разреженных газов, т. е. атомарных спектров. Но для этого необходимо рассчитать значения энергии, соответствующие стационарным энергетическим уровням атомов того или иного химического элемента.

Эта задача оказалась весьма сложной, и методы ее решения разработаны в квантовой механике. Единственное вещество, для которого нужная формула может быть записана элементарно, — это водород.

II. Для того чтобы ионизовать невозбужденный атом водорода, т. е. атом, у которого электрон расположен на первом энергетическом уровне, нужно затратить энергию ионизации, равную $E_0 = 2,1786 \cdot 10^{-18}$ Дж = 13,598 эВ. Один электрон-вольт (эВ) — это кинетическая энергия, которую приобретает частица, несущая на себе элементарный электрический заряд $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл, ускоренная электрическим полем при напряжении 1 В. Тогда энергия стационарного состояния атома водорода, т. е. энергия энергетического уровня с номером n , вычисляется на основе простой формулы

$$E_n = \frac{-E_0}{n^2}.$$

Данное выражение называется *правилом квантования энергетических уровней* атома водорода. Как видно, энергии стационарных состояний атома водорода являются отрицательными величинами. Это связано с тем, что мы считаем, что энергия свободного покоящегося электрона равна нулю. Но энергия электрона внутри атома меньше энергии свободного электрона, поскольку для отрыва электрона от атома надо затратить работу по преодолению сил притяжения между положительно заряженным ядром и отрицательно заряженным электроном. Поэтому энергия связанного с атомом электрона меньше нуля, т. е. является отрицательной величиной.

III. Воспользовавшись вторым постулатом Бора, получим для энергии кванта, испускаемого при переходе электрона с уровня, где энергия равна E_n , на уровень, где энергия равна E_k :

$$h\nu = E_n - E_k = E_0 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Разделив это выражение на постоянную Планка, получим выражение для частоты соответствующей линии спектра:

$$\nu = \frac{E_0}{h} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Величина $R = \frac{E_0}{h} = \frac{2,1786 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}}{6,628 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 3,287 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, т. е. она равна постоянной Ридберга (см. § 4.12). Следовательно, для частот спектральных линий атомов водорода получается выражение

$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > k.$$

Эта формула, полученная Бором, называется *обобщенной формулой Бальмера*.

Приняв $k=2$, $n=3, 4, 5, 6, \dots$, получим серию Бальмера для видимого участка спектра водорода. Приняв $k=3$, $n=4, 5, 6, \dots$, получим серию Пашена для инфракрасного участка спектра.

Бор предсказал существование серии линий в далеком ультрафиолетовом участке спектра. Для этого в обобщенной формуле Бальмера следует принять $k=1$, $n=2, 3, 4, 5$. Эта серия линий описывается формулой

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 1.$$

Она была экспериментально обнаружена Т. Лайманом и называется *серией Лаймана*.

IV. Мы видим, что теория Бора полностью описывает происхождение и структуру линейчатого спектра атомарного водорода. Стал ясен смысл целых чисел в спектральных сериях.

Оказывается, что серия Бальмера в видимом участке спектра возникает при переходе электрона атома водорода с третьего, четвертого, пятого, шестого и т. д. энергетических уровней на второй (рис. 4.21). Серия Пашена возникает при переходе электрона с

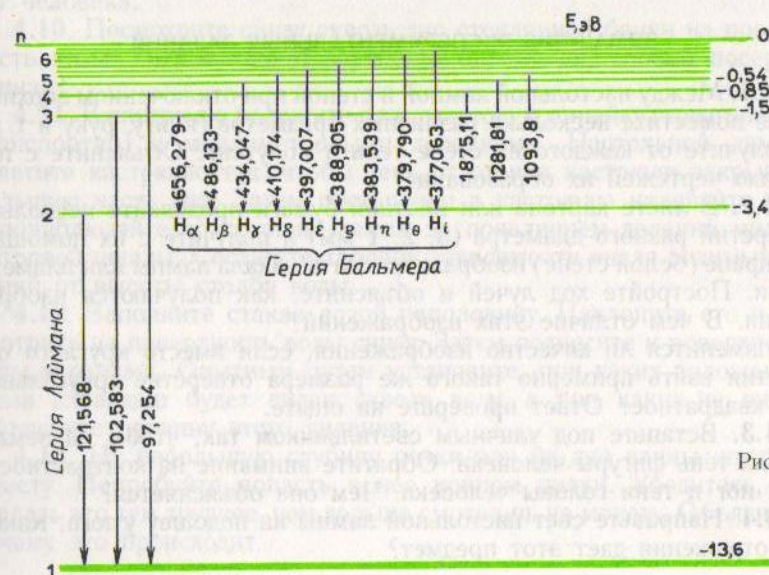


Рис. 4.21

четвертого, пятого, шестого и т. д. энергетических уровней на третий. Серия Лаймана — при переходе со второго, третьего, четвертого и т. д. уровней на первый. На рисунке 4.21 указаны длины волн спектральных серий, но очень легко вычислить и соответствующие частоты.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется энергией ионизации атома?
2. Что такое электрон-вольт? Выразите один электрон-вольт в джоулях.
3. Как записывается выражение для энергии атома водорода на определенном энергетическом уровне?
4. Почему энергия атома на данном энергетическом уровне является отрицательной величиной?
5. Как записывается обобщенная формула Бальмера?
6. Какой смысл имеют целые числа в обобщенной серии Бальмера?
7. При каких переходах электрона атома водорода возникают серии Бальмера, Пашена и Лаймана?

Упражнения

1. Воспользовавшись формулой Бальмера, вычислите значения частот и длин волн четырех первых спектральных линий в видимом участке спектра (т. е. линии H_α , H_β , H_γ , H_δ). Сравните с экспериментальными данными (см. рис. 4.21).
2. Вычислите частоты и длины волн головных линий серий Лаймана (лайман-альфа) и Пашена. При каких переходах они возникают?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

4.1. Между настольной лампой и стеной при отключенном верхнем свете поместите несколько различных предметов (книгу, руку и т. д.) и получите от каждого на стене тень и полутень. Объясните с помощью чертежей их образование.

4.2. В листе картона или плотной бумаги проделайте несколько отверстий разного диаметра (5, 2, 1 мм) и получите с их помощью на экране (белой стене) изображение нити накала лампы или пламени свечи. Постройте ход лучей и объясните, как получаются изображения. В чем отличие этих изображений?

Изменится ли качество изображения, если вместо круглого отверстия взять примерно такого же размера отверстие треугольное или квадратное? Ответ проверьте на опыте.

4.3. Встаньте под уличным светильником так, чтобы на землю падала тень фигуры человека. Обратите внимание на контрастность тени ног и тени головы человека. Чем она объясняется?

4.4. Направьте свет настольной лампы на подошву утюга. Какой вид отражения дает этот предмет?

4.5. Направьте свет настольной лампы на плоскую вмятину блестящей поверхности консервной банки и заметьте интенсивность отраженного пучка света. Объясните, почему отраженный свет пропадает, когда в банку налита холодная вода.

4.6. Согните под прямым углом лист картона или плотной бумаги. В вертикальной плоскости листа сделайте прорезь. Поставьте этот уголок на пути пучка света от настольной лампы — и вы получите на горизонтальной плоскости листа узкий пучок света. На пути этого пучка поставьте плоское зеркало и убедитесь в справедливости закона отражения света. На сколько градусов отклонился отраженный от зеркала луч, если зеркало повернуть на 15° ?

4.7. Подержите вертикально в руках на различных расстояниях от глаза два карандаша. Ближний должен закрывать собой дальний. Один глаз прикройте, а другой сместите сначала вправо, а затем влево. Ответьте на вопрос: в какую сторону при этом смещается дальний предмет относительно ближнего?

4.8. Установите перед карманным зеркалом карандаш и определите, где за зеркалом находится изображение карандаша. Для этого поместите за зеркалом другой карандаш. Смещая его вправо и влево, найдите такое положение, когда карандаш за зеркалом не будет смещаться относительно изображения первого карандаша. На основании опыта сделайте вывод о соотношении расстояний между предметом и зеркалом, между его изображением и зеркалом.

4.9. Положите к своим ногам зеркало и найдите в нем изображение верхушки дерева или другого предмета, высоту которого нужно определить. Задача решается с учетом подобия треугольников при условии, что угол падения равен углу отражения. При этом нужно знать рост человека и расстояние от центра туловища до ступней ног человека.

4.10. Посмотрите снизу сквозь дно стеклянной банки на поверхность воды. Почему эта поверхность блестящая, словно посеребренная?

4.11. В кастрюлю положите пластмассовую линейку (треугольник, транспортир) с миллиметровыми делениями. Настольной лампой осветите кастрюлю так, чтобы тень от стенки кастрюли закрывала большую часть дна. Затем постепенно в кастрюлю наливайте воду и наблюдайте со стороны лампы за появлением делений миллиметровой шкалы. Составьте таблицу зависимости числа видимых делений от высоты столба воды.

4.12. Заполните стакан водой наполовину. Наклоните его и посмотрите на поверхность воды снизу. Затем поднесите к поверхности воды карандаш. Опытным путем установите, при каких положениях глаза карандаш будет виден сквозь воду, а при каких не виден. Объясните причину этого явления.

4.13. На небольшую глубину речки или на дно ванны опустите монету. Попробуйте попасть в нее концом палки. Убедитесь, что сделать это тем труднее, чем дольше смотришь на монету. Объясните, почему это происходит.

4.14. Во время зари наблюдаются цвета в том порядке, как они расположены в спектре: у горизонта — красный. Объясните, почему иногда некоторые цвета отсутствуют.

4.15. Вследствие преломления солнечных лучей в атмосфере (рефракции) светила кажутся нам выше, чем они находятся на самом деле. Солнце и Луна около самого горизонта кажутся нам приплюснутыми. Зависит ли продолжительность восхода и захода этих светил от состояния атмосферы?

4.16. Встаньте против фонтана спиной к Солнцу — и вы увидите радугу. Объясните наблюдаемое вами явление.

4.17. При рассмотрении радуги обратите внимание на положение Солнца: чем оно ниже, тем выше радуга. Пронаблюдайте и опишите, какой вид имеет радуга, когда Солнце находится у самого горизонта.

Глава 5. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

§ 5.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

I. Оптические приборы и устройства появились много столетий назад. Создавались они искусными умельцами, обладавшими не только умелыми руками, но и большой наблюдательностью. Первые линзы и телескопы были сделаны на основе расчетов и предшествующих опытов. Расчеты велись с помощью законов *геометрической оптики*: закона прямолинейного распространения света в однородной среде, законов отражения и преломления света, полученных опытным путем. При этом использовались понятия *световой пучок* и *световой луч*.

Напомним еще раз, что *световой луч* — это линия, в направлении которой световая волна переносит энергию, т. е. это перпендикуляр к фронту световой волны. До создания волновой оптики луч считали физическим объектом, и эта терминология по традиции сохраняется иногда и в учебниках, а особенно в быту и популярной литературе. Но при этом следует помнить, что *реальными физическими объектами являются световая волна и световой пучок*. Световой луч — это полезная идеализация, чисто геометрическое понятие, облегчающее решение ряда задач методами геометрической оптики.

II. Поскольку свет является электромагнитной волной, то все задачи оптики могут быть решены на основе волновых представлений. Между тем многие задачи гораздо проще решаются на основе понятий и законов геометрической оптики. Эти методы сохранили свое значение и после того, как была выяснена волновая природа света. В данной главе вы ознакомитесь с применением этих методов для объяснения принципа действия глаза и ряда других оптических приборов.

III. Основной задачей, решаемой с помощью оптических приборов является управление световыми пучками для получения изображения или концентрации энергии.

Любой предмет мы можем рассматривать как совокупность точек, которые светятся собственным или отраженным светом. Отсюда следует, что сначала нужно выяснить, что мы понимаем под *изображением точки*.

Пусть входное отверстие оптической системы (объектив) освещается расходящимся пучком света из точки A (рис. 5.1). Если пройдя оптическую систему прибора, световой пучок соберется в точке A' , то эту точку называют *действительным изображением точки A* . В этой точке происходит концентрация энергии световой волны, что можно зафиксировать с помощью светочувствительного вещества, например фотобумаги или фотопленки, а также фоторезистора, устройство которого рассмотрено в VIII классе.

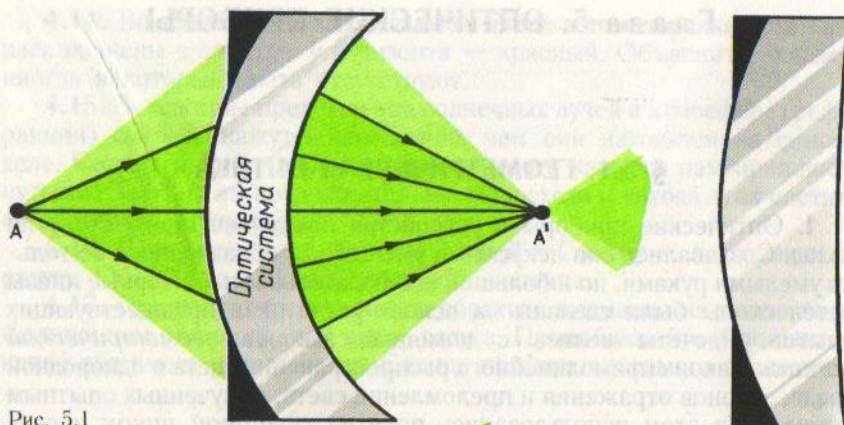


Рис. 5.1

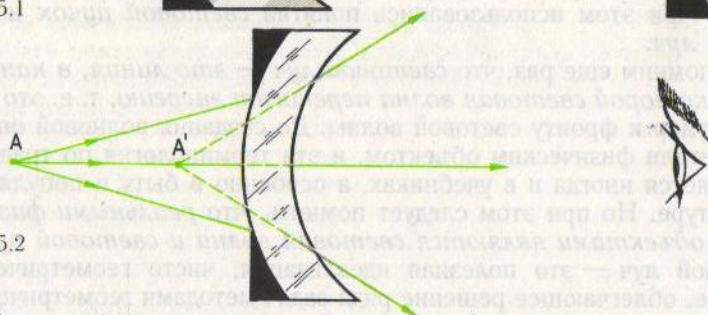


Рис. 5.2

Если любой луч, исходящий из точки A , пройдет через точку A' , то мы получим идеальное изображение. На самом деле в реальных оптических системах это условие нарушается и имеют место *абберации* — дефекты изображения. В результате действительное изображение точки несколько расплывается. Однако в хороших оптических приборах применяют ряд мер, чтобы абберации максимально уменьшить.

IV. Может случиться, что расходящийся пучок, пройдя через оптическую систему, останется расходящимся. Естественно, что в данном случае оптическая система изображения точки не дает. Однако если смотреть на этот расходящийся пучок (рис. 5.2), то глаз увидит, что свет как бы исходит из точки A' . Из закона прямолинейного распространения света следует, что точка A' лежит на продолжении лучей. В этом случае точку A' называют *мнимым изображением* точки A .

Принципиальное различие действительного и мнимого изображений заключается в следующем. В точке, где возникает действительное изображение, происходит концентрация энергии, что обнаруживается объективно, например с помощью фотопленки или фоторезистора. Мнимое изображение точки имеет чисто субъективный смысл: нам кажется, что световые лучи исходят из некоторой точки, которой на самом деле нет.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные законы геометрической оптики? Как они формулируются?
2. Что такое световой луч?
3. Что называется действительным изображением точки? Как его можно обнаружить?
4. Что называется мнимым изображением точки? Как его можно обнаружить?
5. В чем принципиальное отличие действительного и мнимого изображений?
6. Изменится ли сопротивление фоторезистора, если его поместить в точку, где видно действительное изображение; мнимое изображение?

§ 5.2. ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

I. *Плоским зеркалом* служит либо полированная плоская металлическая пластинка, либо плоская стеклянная пластинка, на одну из поверхностей которой нанесен тонкий слой металла (обычно серебро или алюминий). На опыте, а также построением можно убедиться, что если на плоское зеркало направить параллельный пучок света, то после отражения он также окажется параллельным пучком. Такое отражение называется *зеркальным*.

Если же на плоское зеркало падает расходящийся пучок света от точечного источника, то после отражения он вновь окажется расходящимся. Для доказательства обратимся к рисунку 5.3.

Пусть над плоским зеркалом находится точечный источник света S , освещающий это зеркало. Из всего светового потока выберем два луча: 1 и 2, которые падают на зеркало под разными углами α_1 и α_2 . После отражения от зеркала эти лучи, как видно из рисунка, расходятся. Продолжения отраженных лучей пересекаются в точке S' , находящейся по другую сторону зеркала относительно источника (в Зазеркалье, как сказала бы Алиса из книги Льюиса Кэрролла). Нашему глазу будет казаться, что лучи 1 и 2 выходят из

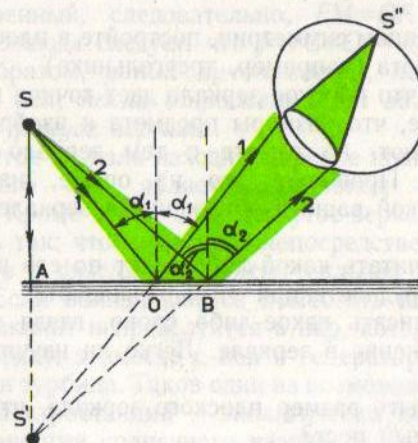


Рис. 5.3

этой точки, как будто там находится источник света. Следовательно, точка S' воспринимается нами как мнимое изображение точечного источника S .

II. Почему же мы видим мнимое изображение? Да дело в том, что хрусталик глаза и стекловидное тело собирают расходящийся световой пучок на сетчатке в точке S'' . Оптика фотоаппарата тоже собирает расходящийся пучок, поэтому фотоаппарат также способен фиксировать мнимое изображение.

III. Совсем необязательно строить изображение предмета в плоском зеркале, пользуясь двумя или большим числом лучей. Возможен более простой способ построения. На перпендикуляре, опущенном на зеркало из источника (см. рис. 5.3), надо отложить отрезок $SA = S'A$. Так мы найдем положение мнимого изображения S' . Здесь мы, по существу, пользуемся симметричностью предмета и изображения относительно зеркала. Докажем правильность такого построения. Легко убедиться, что $\triangle SOB = \triangle S'OB$, поскольку у них общая сторона OB и равны оба прилежащих к ней угла (по закону отражения). Следовательно, $SO = S'O$. Но тогда равны и треугольники SOA и $S'OA$, поскольку они имеют две равные стороны и углы между ними равны. Из равенства этих треугольников следует, что $SA = S'A$ и $SA \perp AO$.

Вопросы для самопроверки

1. Как отражается от плоского зеркала параллельный пучок? Ответ подтвердите построением.
2. Как построить в плоском зеркале изображение точки?
3. Какое изображение дает плоское зеркало — действительное или мнимое?
4. Как проще построить изображение точки в плоском зеркале?

Упражнения

1. Пользуясь принципом симметрии, постройте в плоском зеркале изображение предмета (например, треугольника).
2. Иногда говорят, что плоское зеркало дает точное изображение предмета. Докажите, что размеры предмета и изображения действительно совпадают, но вместе с тем зеркало превращает правшу в левшу. Проверьте это на опыте, например посмотрите, какой рукой ваше изображение в зеркале причешивается.
3. Попробуйте прочитать какой-либо текст по его изображению в зеркале. Какие трудности при этом возникают?
4. Попробуйте написать какое-либо слово, глядя не на бумагу, а на ее изображение в зеркале. Легко ли научиться так писать?
5. Каков должен быть размер плоского зеркала, чтобы человек увидел себя в полный рост?

§ 5.3. СФЕРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО

I. Если в качестве отражающей поверхности используется внешняя или внутренняя поверхность зеркальной сферы, то получается *сферическое зеркало*. Различают два вида сферических зеркал: *вогнутые* (отражает внутренняя поверхность сферы) и *выпуклые* (отражает внешняя поверхность сферы).

На рисунке 5.4 изображено сечение вогнутого сферического зеркала, а на рисунке 5.5 — сечение выпуклого сферического зеркала, где O — центр сферической поверхности; C — вершина зеркала; прямая NC — ось вращения, называемая *главной оптической осью*.

II. Пусть на вогнутое зеркало параллельно главной оптической оси падает пучок света (см. рис. 5.4). Выберем произвольный луч $KM \parallel NC$. Радиус OM — нормаль к поверхности сферы; $\angle KMO = \alpha$ — угол падения. По закону отражения луч в точке M отразится от зеркала под углом OMF , равным $\angle KMO = \alpha$. Точка F — *фокус вогнутого зеркала*. Расстояние $f = FC$ от вершины зеркала до фокуса называется *фокусным расстоянием*.

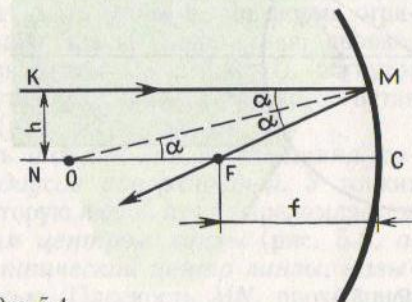


Рис. 5.4

Если пучок света достаточно узкий, т. е. его ширина $h \ll R$, где R — радиус сферической поверхности, то фокусное расстояние равно половине радиуса:

$$f = R/2.$$

В самом деле, как видно из рисунка 5.4, треугольник OFM равнобедренный, следовательно, $FM = OF$. Если же $h \ll R$, то $FM \approx FC$. Отсюда следует, что $f = FC \approx OF = R/2$.

Таким образом, *узкий пучок света, параллельный главной оптической оси, после отражения от вогнутого зеркала собирается в фокусе зеркала*.

III. Вогнутое зеркало находит широкое практическое применение. Прежде всего оно является основной частью телескопа — рефлектора. Кроме этого, если вогнутое зеркало большого диаметра расположить так, чтобы на него непосредственно падало солнечное излучение, то в фокусе произойдет сильная концентрация энергии излучения. Если вблизи фокуса поместить котел с водой, то вода нагреется, закипит и превратится в пар, который заставит работать паровую турбину, а вместе с ней и генератор, находящийся на том же валу, что и турбина. Таков один из возможных принципов создания солнечных электростанций — экологически чистых установок, работающих на энергии солнечного излучения.

IV. Мощный источник света (например, электрическая дуга), помещенный в фокусе вогнутого зеркала, после отражения от зеркала дает почти параллельный яркий пучок света, способный освещать далеко расположенные предметы. На этом принципе основано действие *прожектора*.

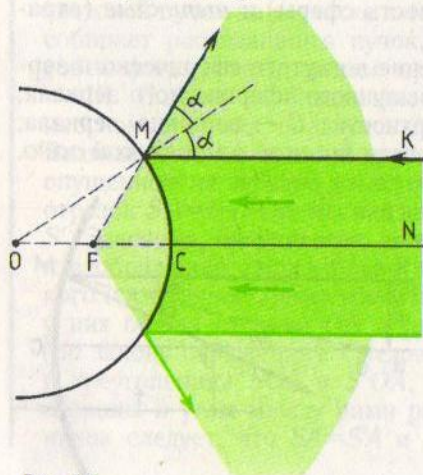


Рис. 5.5

Вогнутое зеркало фокусирует не только видимый свет, но и любое электромагнитное излучение — инфракрасное, ультрафиолетовое, радиоволны. На этом принципе основано применение вогнутых зеркал в радиоастрономии, радиолокации, радиосвязи и телевидении на дециметровых и сантиметровых волнах.

V. Как видно из рисунка 5.5, у выпуклого зеркала фокус мнимый. И здесь для узкого пучка справедливо условие

$$FC = f = R/2.$$

Предоставляем читателю возможность доказать это самостоятельно.

Выпуклые зеркала устанавливаются на автомобилях для того, чтобы водитель, не поворачивая головы, видел, что делается на дороге вокруг машины. Выпуклые зеркала лучше плоских, так как у них более широкое поле обозрения.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется сферическим зеркалом?
2. Чем отличается вогнутое зеркало от выпуклого?
3. Что называется главной оптической осью зеркала?
4. Что такое фокус вогнутого зеркала? Где он расположен?
5. Чем отличается фокус выпуклого зеркала от фокуса вогнутого зеркала?
6. Каков принцип действия прожектора?
7. Каков принцип действия тепловизора?

Упражнения

1. Начертите принципиальную схему солнечной электростанции, где используются вогнутые зеркала.
2. Докажите, что у выпуклого зеркала положение мнимого фокуса определяется тем же уравнением, что и у вогнутого зеркала.
3. Для широкого пучка света выразите фокусное расстояние через угол падения α и ширину пучка h .

4. Пользуясь результатом предыдущей задачи, оцените погрешность, которую мы допускаем, полагая $f = R/2$. Сделайте расчет при $h = 0,1R$; при $h = 0,4R$.

§ 5.4. ЛИНЗЫ

I. Линза — это прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями с радиусами кривизны R_1 и R_2 (рис. 5.6).

Прямая O_1O_2 , на которой лежат центры кривизны обеих сферических поверхностей, называется *главной оптической осью* линзы. Одна из поверхностей линзы может быть плоской. По форме ограничивающих поверхностей различают шесть видов линз: двояковыпуклая (рис. 5.7, а), плоско-выпуклая (рис. 5.7, б), вогнуто-выпуклая (рис. 5.7, в), двояковогнутая (рис. 5.7, г), плоско-вогнутая (рис. 5.7, д) и выпукло-вогнутая (рис. 5.7, е).

Мы будем далее рассматривать *тонкие линзы*, толщина которых значительно меньше радиусов поверхностей. У тонких линз есть точка C , проходя через которую любой луч не преломляется. Эта точка называется *оптическим центром линзы* (рис. 5.8, а, б). Прямая, проходящая через оптический центр линзы, называется *побочной оптической осью*. Плоскость MN , проходящая через оптический центр тонкой линзы перпендикулярно главной оптической оси, — это *главная плоскость* линзы.

Конечно, световой луч, проходящий через линзу, преломляется дважды: на каждой из поверхностей линзы. Но для простоты выполнения построения хода лучей их проводят так, будто бы они один раз преломляются на главной плоскости MN .

II. Если на выпуклую линзу, находящуюся в воздухе, направить пучок света параллельно главной оптической оси, то пучок соберется в точке F — *главном фокусе линзы* (см. рис. 5.8, а). Такие линзы называются *собирающими*. На схемах они обозначаются, как показано на рисунке 5.8, в. Вогнутая линза в воздухе оказывается рассеивающей. Она показана на рисунке 5.8, г.

Если пучок света направить на рассеивающую линзу, то он будет рассеиваться так, будто бы лучи исходят из точки F , которую называют *мнимым главным фокусом рассеивающей линзы*.

Пучок света, направленный на собирающую линзу параллельно побочной оптической оси, собирается в *побочном фокусе* F' (рис. 5.9). Все побочные фокусы лежат на *фокальной плоскости* CD , проходящей через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси. У рассеивающей линзы можно тоже построить *мнимые фокальные плоскости*.

III. Реальным линзам свойственны некоторые дефекты. Один из них — *сферическая аберрация*, которая заключается в том, что лучи, отстоящие далеко от главной оптической оси, выпуклая линза собирает в фокусе F_1 , расположенном ближе к линзе; лучи, которые близко прилегают к оптической оси, выпуклая линза со

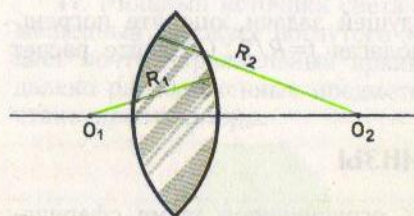
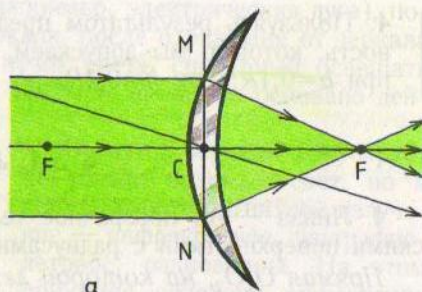
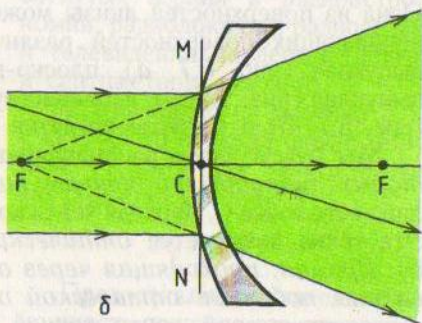


Рис. 5.6



а



б

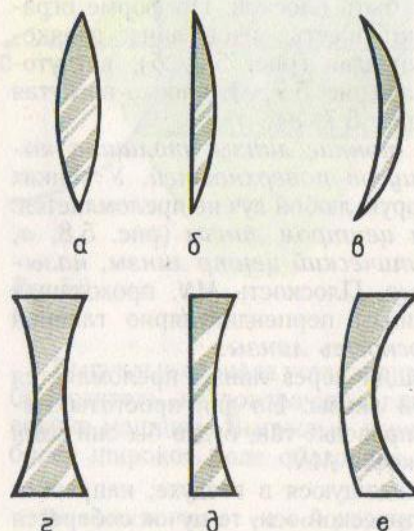


Рис. 5.7

Рис. 5.8

бирает в фокусе F_2 (рис. 5.10, а). У вогнутой линзы — аналогичная картина (рис. 5.10, б).

Один из способов борьбы со сферической aberrацией — использование пучков, близких к главной оптической оси. Для этого около линзы ставят диафрагму, которая пропускает через линзу узкий пучок света. Но при этом уменьшается энергия пучка и, следовательно, освещенность изображения. Другой способ ослабления сферической aberrации состоит в том, что подбирают две или несколько линз, таких, чтобы их aberrации существенно компенсировались (рис. 5.10, в).

IV. Вторым серьезным дефектом линз является *хроматическая aberrация*, которая возникает из-за дисперсии. В линзе, как и в призме, происходит разложение белого света в спектр. При этом лучи красного цвета, преломляясь слабее лучей других цветов, фокусируются в точке F_K ; лучи синего и фиолетового цвета, пре-

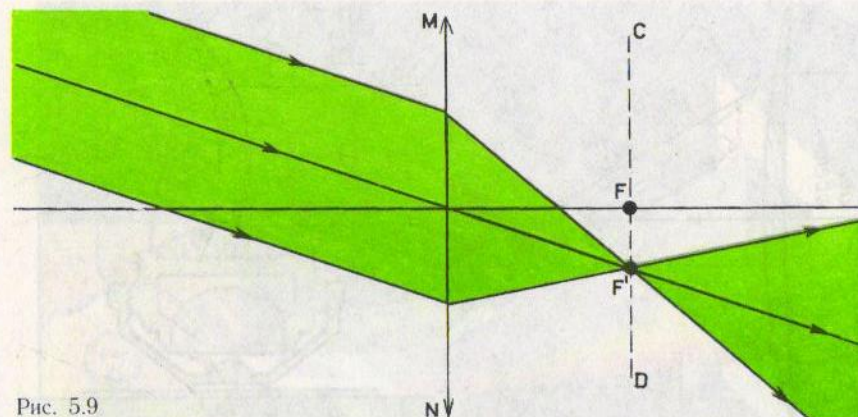


Рис. 5.9

ломляясь сильнее, фокусируются в точке F_C (рис. 5.11). В результате хроматической aberrации изображение в линзе оказывается размытым и окрашенным.

Исправить хроматическую aberrацию можно с помощью двух или нескольких линз (см. рис. 5.10), подобрав так виды стекол с разными показателями преломления, чтобы они компенсировали друг друга. Линзы, подобранные на хроматическую aberrацию, называются *ахроматами*. Такие линзы используются в качестве объективов телескопов — рефракторов, хороших биноклей, простейших фотоаппаратов.

Значительные aberrации возникают также при падении на линзу лучей под большим углом к оптической оси. Устранение этих aberrаций возможно путем подбора системы из нескольких (порой до десятка) линз, каждая из которых компенсирует недос-

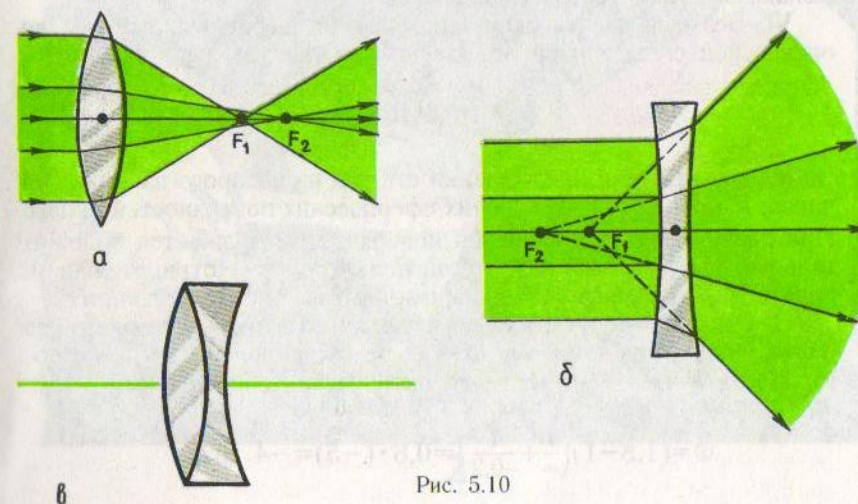


Рис. 5.10

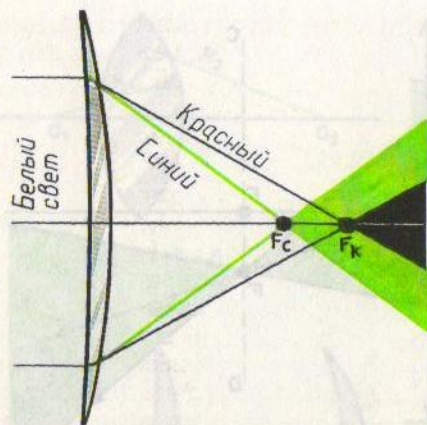


Рис. 5.11

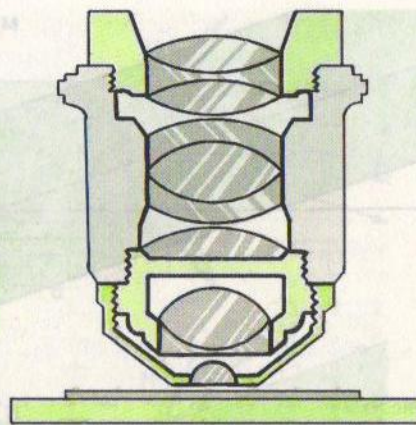


Рис. 5.12

татки другой. На рисунке 5.12 изображен собранный из десяти линз объектив хорошего микроскопа, в котором устранены почти все aberrации. Расчет, изготовление и проверка таких сложных оптических систем весьма трудная задача, требующая хороших знаний теории и высокой квалификации.

V. Основными характеристиками линзы являются ее *фокусное расстояние* f (расстояние от фокуса до центра линзы) и ее *оптическая сила* $\Phi = 1/f$ — величина, обратная фокусному расстоянию. Единицей оптической силы является *диоптрия* (дптр). Оптическая сила собирающей линзы 1 дптр, если ее фокусное расстояние равно 1 м.

У рассеивающих линз фокусное расстояние и оптическая сила выражаются отрицательными числами.

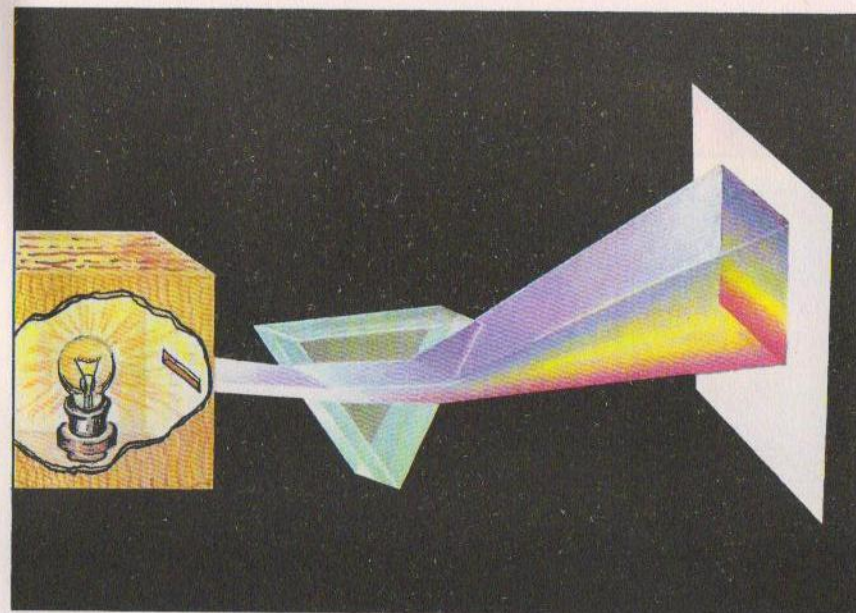
VI. Без вывода и не для запоминания введем выражение для оптической силы тонкой линзы:

$$\Phi = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

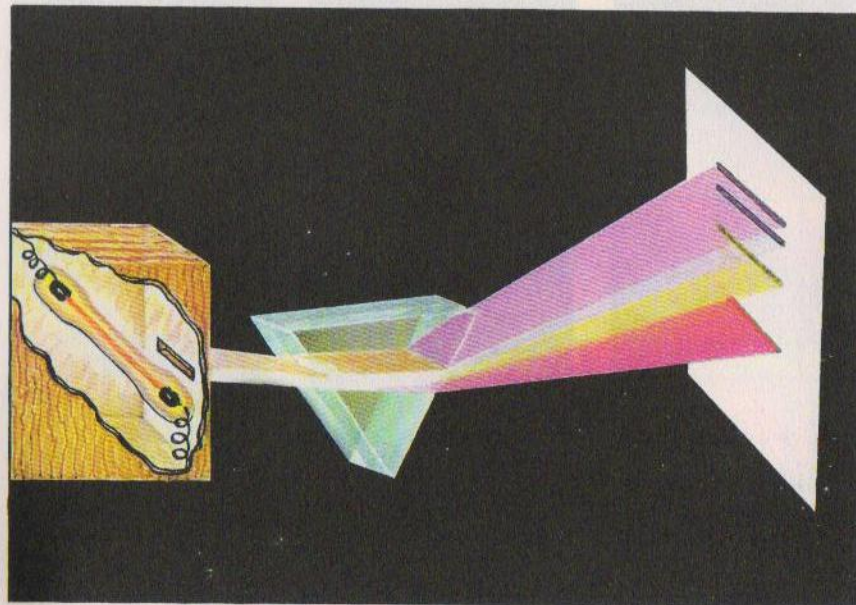
где n — показатель преломления стекла, из которого изготовлена линза; R_1 и R_2 — радиусы обеих сферических поверхностей линзы. При расчетах радиус выпуклой поверхности выражается положительным числом, радиус вогнутой поверхности — отрицательным, радиус плоской поверхности считается бесконечно большим.

Пусть, например, плоско-вогнутая линза изготовлена из стекла с показателем преломления $n=1,8$; радиус кривизны вогнутой поверхности $R=-0,2$ м. Тогда ее оптическая сила

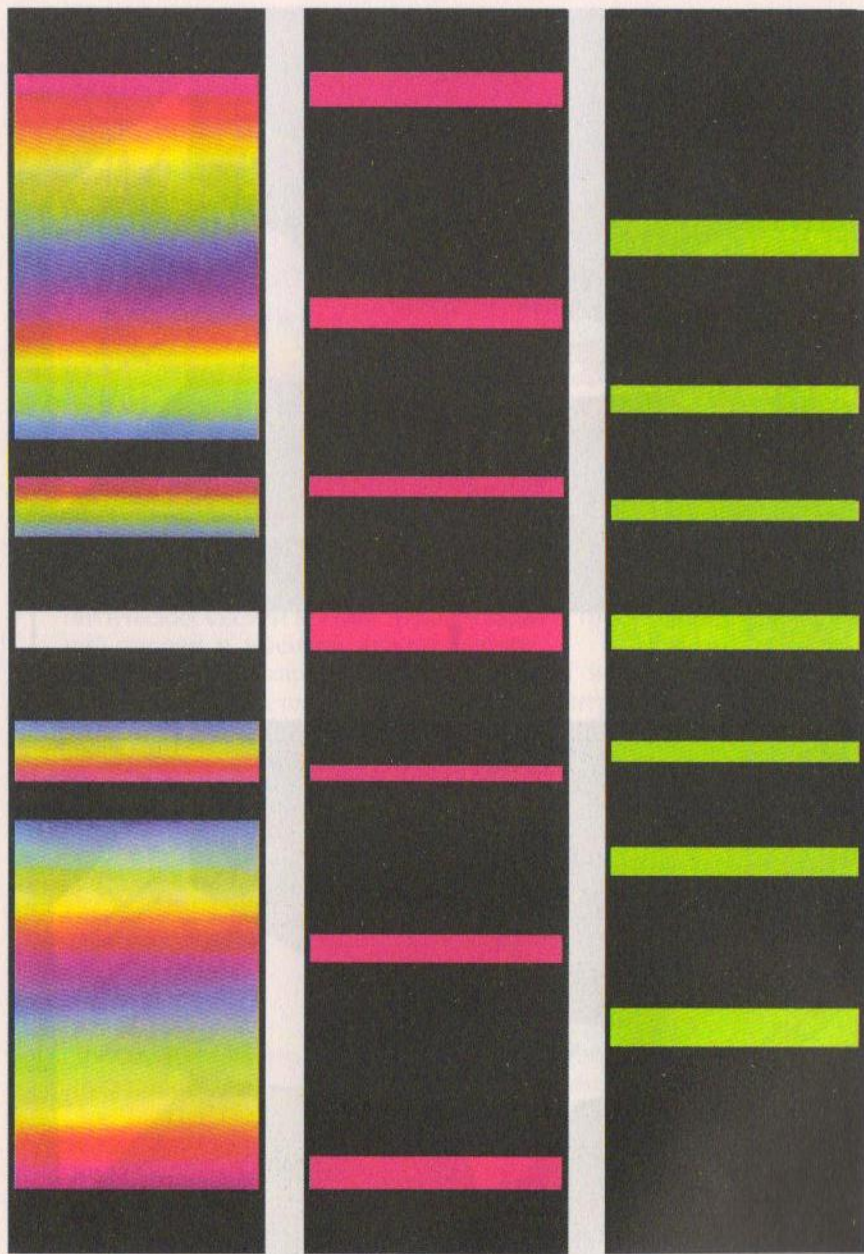
$$\Phi = (1,8-1) \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0,2} \right) = 0,8 \cdot (-5) = -4 \text{ дптр.}$$



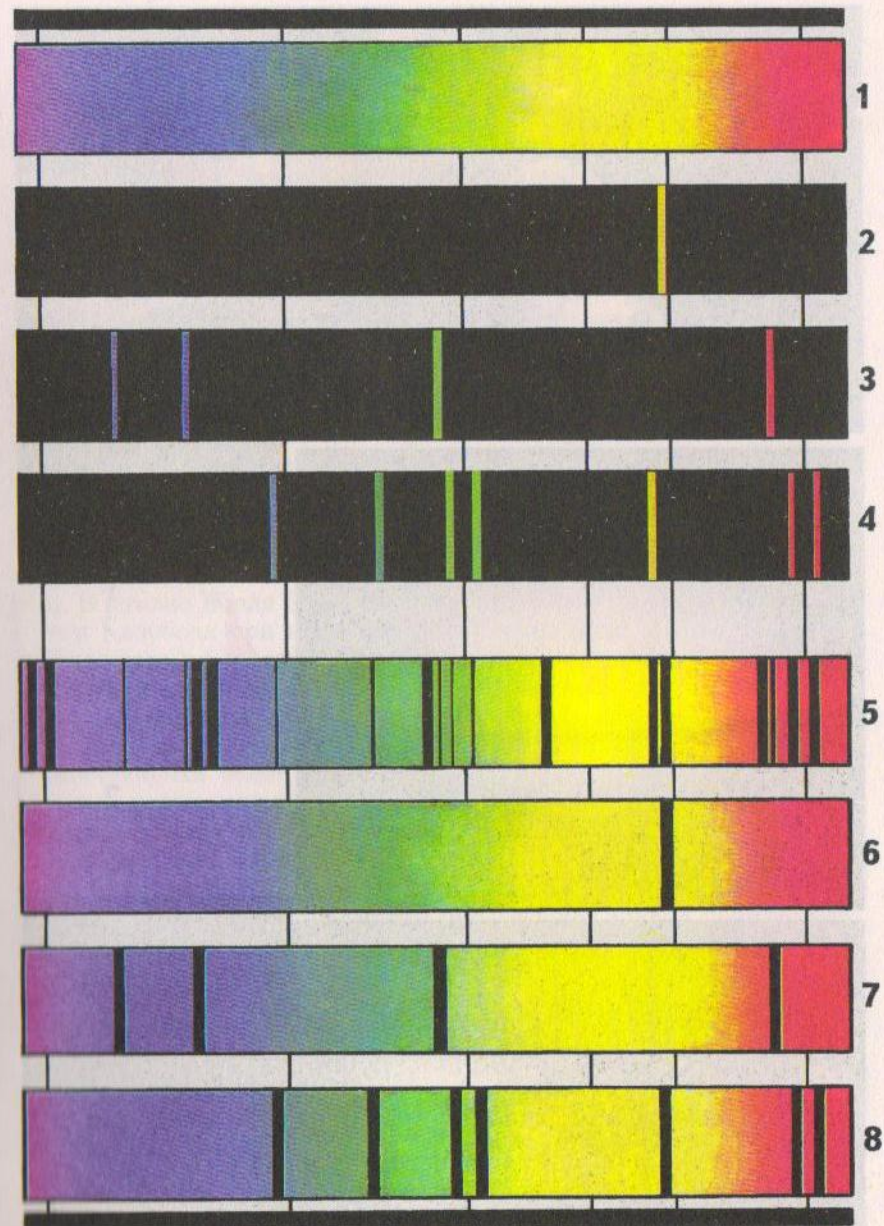
1



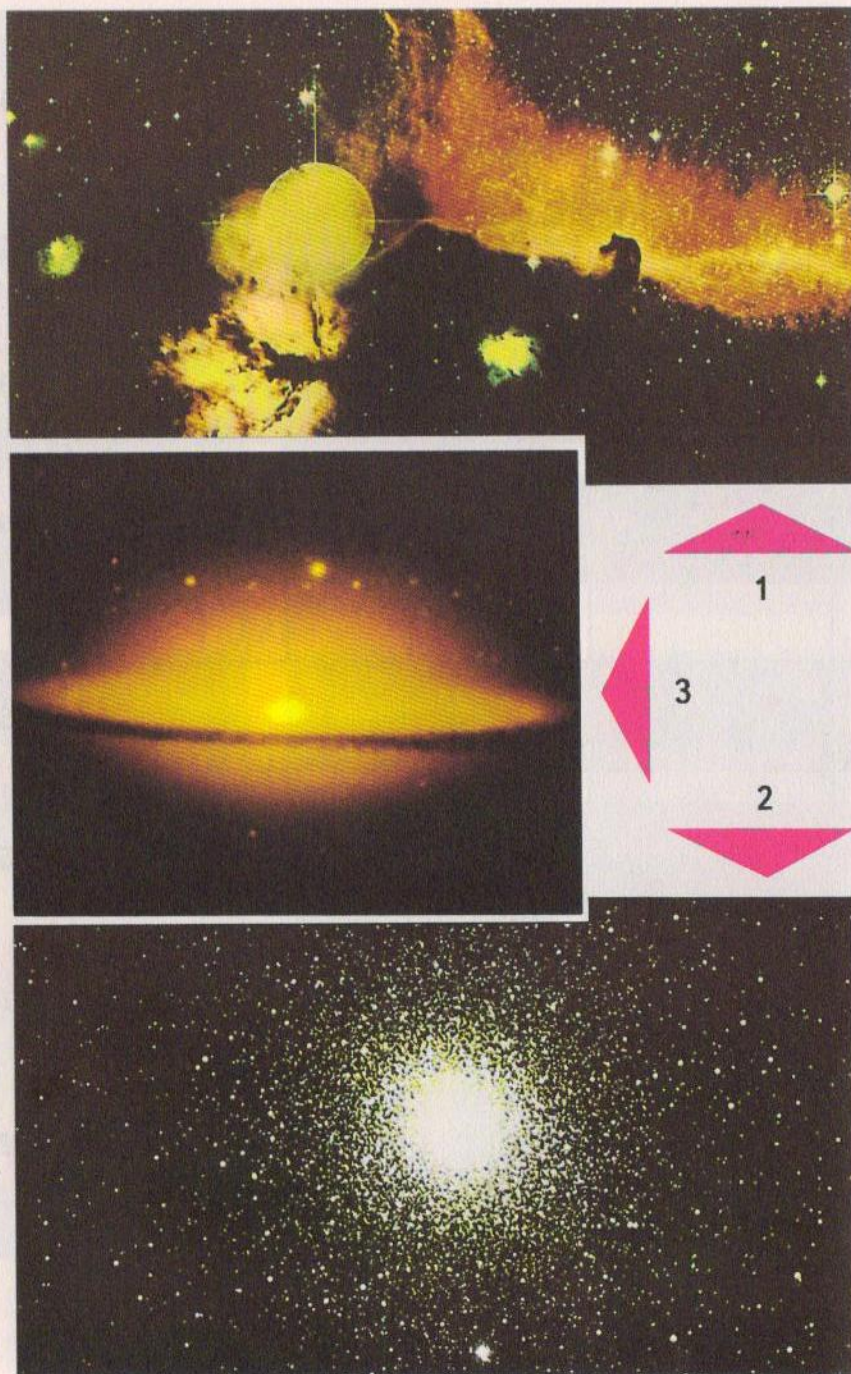
2



II



III



IV

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляет линза? Какие виды линз вам известны? Перечислите их.
2. Какие характерные точки, линии и плоскости у линзы вам известны? Нарисуйте линзу и отметьте все эти характерные величины на чертеже.
3. Что называется фокусом линзы; фокусным расстоянием?
4. Чем отличаются фокусы собирающей и рассеивающей линз?
5. Что называется оптической силой линзы? Как называется единица оптической силы и каков ее смысл?
6. В чем заключается сферическая абберация и как ее исправляют?
7. В чем заключается хроматическая абберация и как ее исправляют?

Упражнения

1. Оптическая сила линзы равна 8 дптр. Какая это линза — собирающая или рассеивающая? Чему равно ее фокусное расстояние?
2. Оптическая сила линзы равна -5 дптр. Какая это линза — собирающая или рассеивающая? Чему равно ее фокусное расстояние?
3. В романе Жюль Верна «Путешествие капитана Гаттераса» доктор Клоубони при морозе -48°C зажег огонь с помощью льда. Для этого он из глыбы пресноводного льда высек кусок круглой формы диаметром около фута (т. е. около 30 см) и отшлифовал из него двояковыпуклую линзу. Поскольку день был солнечный, то ему удалось зажечь трут, от него запылал костер, и путешественники были спасены. Полагая, что фокусное расстояние линзы равно около 40 см, а также зная показатель преломления льда и считая радиусы кривизны обеих поверхностей двояковыпуклой линзы одинаковыми, определите эти радиусы.
4. Как изменится оптическая сила стеклянной линзы, если ее поместить в воду? Показатель преломления стекла принять равным 2,03, воды — 1,33.

§ 5.5. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗАХ И СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ

1. Обычно размер предмета ($AB=h$), изображение которого мы строим, значительно больше размера линзы или зеркала.

Пусть предмет находится намного дальше фокуса собирающей линзы (рис. 5.13), например на расстоянии $d > 2f$. Из точки A выходит световой пучок; часть его, закрашенная на рисунке, проходит через линзу и собирается в точке A' , которая является изображением точки A .

Конечно, изображение точки A дает именно этот пучок, но построение хода его лучей (кроме побочной оптической оси AC) затруднительно. Поэтому проведем вспомогательное построение.

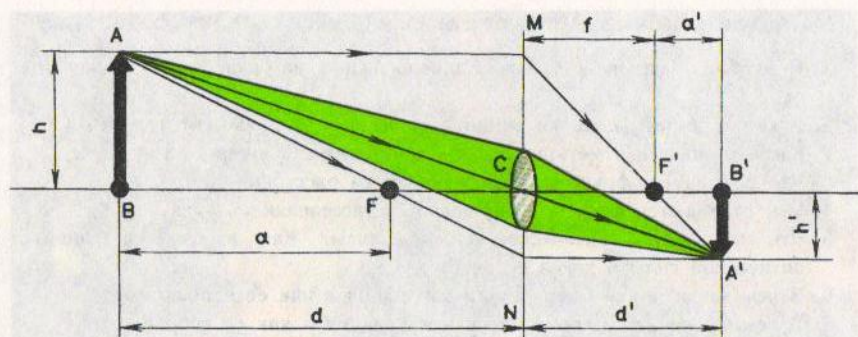


Рис. 5.13

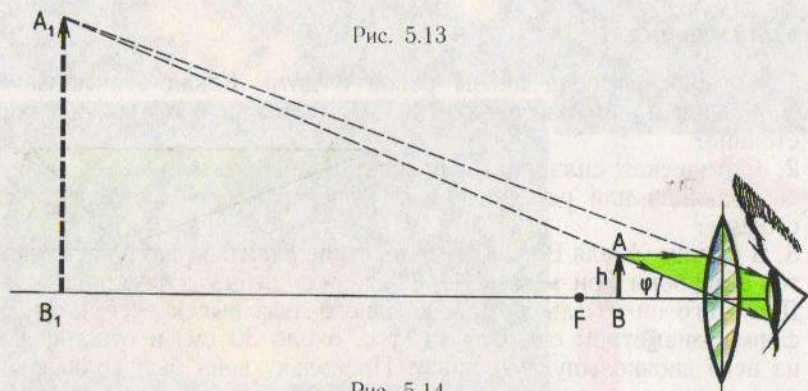


Рис. 5.14

II. Чтобы найти положение точки A' , проведем *главную плоскость* линзы MN и для построения выберем любые два из трех *стандартных лучей* (см. рис. 5.13), перечисленных ниже.

1. Луч AM , параллельный главной оптической оси. После преломления на главной плоскости он проходит через главный фокус F' .

2. Луч, совпадающий с побочной оптической осью AC , проходит без преломления через центр линзы.

3. Луч AN , проходящий через главный фокус F . После преломления на главной плоскости он идет параллельно главной оптической оси.

Построив изображение точки A' , опускаем перпендикуляр на главную оптическую ось и находим точку B' , находящуюся от центра линзы на расстоянии $d' < d$; она является изображением точки B . Если же предмет имеет более сложную форму, то тем же способом нужно построить изображения основных точек, которые определяют форму предмета.

III. В данном случае ($d > 2f$) мы получили действительное перевернутое уменьшенное изображение ($h' < h$). Здесь предмет и его изображение обратимы. Если в том месте, где находится изображение, поместить какой-то предмет $A'B'$, то его изображение (увеличенное) окажется там, где раньше располагался предмет AB . Проверьте это построением.

IV. Если предмет $AB = h$ будет расположен между собирающей линзой и ее главным фокусом (рис. 5.14), то глаз, расположенный за линзой, увидит прямое мнимое увеличенное изображение $A'B'$. Предмет и мнимое изображение видны под одним и тем же углом φ .

В рассеивающей линзе мы увидим прямое мнимое уменьшенное изображение $A'B'$ предмета AB (рис. 5.15). Этот результат не зависит от того, на каком расстоянии предмет находится от линзы. Чтобы проверить это экспериментально, воспользуйтесь очками близоручного человека.

V. Аналогично строится изображение предмета в сферическом зеркале (рис. 5.16, 5.17). Здесь также используются три характерных луча:

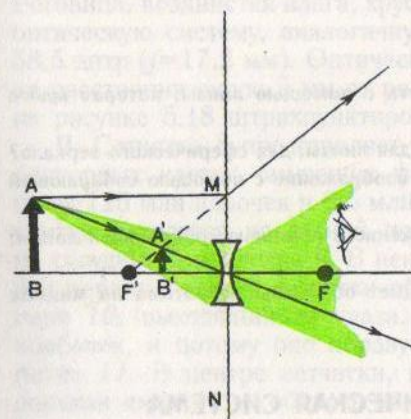


Рис. 5.15

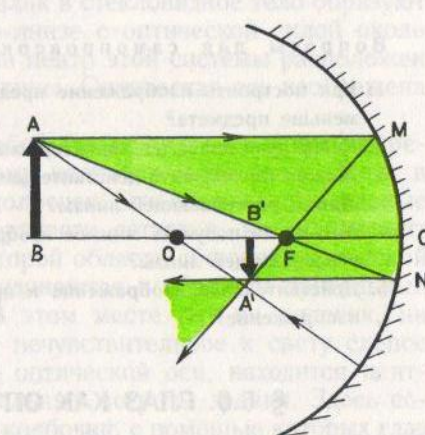


Рис. 5.16

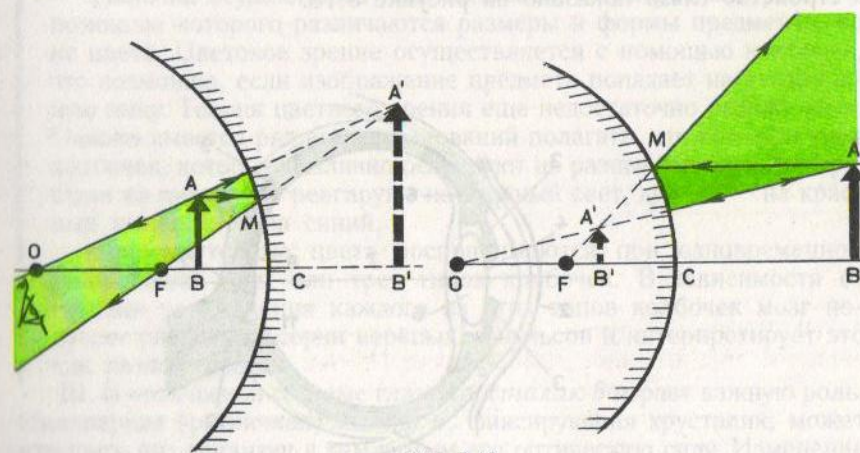


Рис. 5.17

1. Луч AM , идущий параллельно главной оптической оси. После отражения он проходит через фокус (см. рис. 5.16). У выпуклого зеркала продолжение луча проходит через мнимый фокус (см. рис. 5.17).

2. Луч AN , идущий через фокус. После отражения он проходит параллельно главной оптической оси (см. рис. 5.16, справа).

3. Луч AO , идущий через центр зеркала O (побочная оптическая ось). После отражения от зеркала он идет опять через центр (см. рис. 5.16, 5.17).

Выполните самостоятельно построение изображений предметов, находящихся на разных расстояниях от вогнутого зеркала, — вы получите те же случаи, что и для собирающей линзы.

Вопросы для самопроверки

1. Как построить изображение предмета с помощью линзы, которая много меньше предмета?
2. Какие лучи являются характерными для линзы; для сферического зеркала?
3. Можно ли получить действительное изображение с помощью собирающей линзы; рассеивающей линзы?
4. Можно ли получить мнимое изображение с помощью собирающей линзы; рассеивающей линзы?
5. Действительное изображение и предмет обратимы. Обратимо ли мнимое изображение?

§ 5.6. ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

I. Говоря об оптических системах, надо прежде всего проанализировать работу глаза — совершенной системы, созданной природой. Устройство глаза показано на рисунке 5.18.

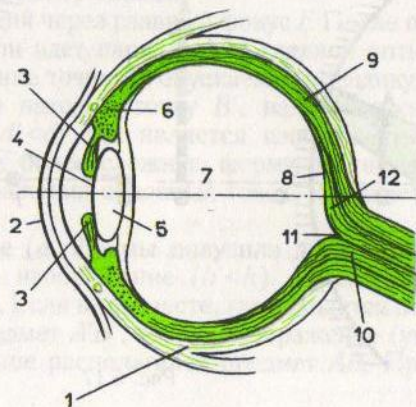


Рис. 5.18

Наружную оболочку глазного яблока образует склера 1. Она защищает внутреннее содержание глаза и обеспечивает его жесткость. На передней поверхности склера переходит в тонкую прозрачную роговицу 2, через которую в глаз проникает свет. За роговицей расположена радужная оболочка 3. В ней имеется отверстие — зрачок 4. Радужная оболочка представляет собой мышечное кольцо, окрашенное пигментом. Это кольцо, сжимаясь или растягиваясь, меняет размеры зрачка, а следовательно, и световой поток, попадающий в глаз, т. е. действует как диафрагма.

За радужной оболочкой находится хрусталик 5 — эластичное линзоподобное тело. Полость между роговицей и хрусталиком заполнена водянистой влагой. За хрусталиком находится стекловидное тело 7. Роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, аналогичную линзе с оптической силой около 58,5 дптр ($f=17,2$ мм). Оптический центр этой системы расположен на расстоянии около 5 мм от роговицы. Оптическая ось изображена на рисунке 5.18 штрихпунктиром.

II. Сетчатка 8 представляет собой полусферу, состоящую из рецепторных клеток, имеющих форму колбочек и палочек. Всего в глазу 125 млн палочек и 6,5 млн колбочек. Эти светочувствительные клетки находятся на задней поверхности сетчатки, которая лежит на сосудистой оболочке 9. В некоторой области сбоку от оптической оси нервные клетки сетчатки объединяются и образуют зрительный нерв 10, выходящий из глаза. В этом месте нет ни палочек, ни колбочек, и потому оно образует нечувствительное к свету слепое пятно 11. В центре сетчатки, на оптической оси, находится центральная ямка 12 — область наибольшей остроты зрения. Здесь сосредоточены светочувствительные колбочки, с помощью которых глаз ощущает цвета. В остальных участках сетчатки расположены в основном палочки.

Палочки осуществляют так называемое сумеречное зрение, с помощью которого различаются размеры и формы предметов, но не цвета. Цветовое зрение осуществляется с помощью колбочек, что возможно, если изображение предмета попадает на центральную ямку. Теория цветного зрения еще недостаточно разработана. Однако имеется ряд веских оснований полагать, что есть три типа колбочек, которые различно реагируют на разные участки спектра. Одни из них лучше реагируют на зеленый свет, другие — на красный и третьи — на синий.

Промежуточные цвета воспринимаются при одновременном раздражении двух или трех типов колбочек. В зависимости от степени раздражения каждого из этих типов колбочек мозг получает различные серии нервных импульсов и интерпретирует это как разные цвета.

III. В оптической системе глаза хрусталик 5 играет важную роль. Цилиарная (ресничная) мышца 6, фиксирующая хрусталик, может изменить его кривизну и тем самым его оптическую силу. Изменение кривизны хрусталика определяет способность глаза к аккомо-

дации — изменению оптической силы глаза. Именно поэтому при разных расстояниях от предмета до глаза возможно сохранение постоянным расстояния от центра глаза до сетчатки, на которой фокусируется четкое изображение предмета.

Аккомодация происходит непроизвольно. Как только глаз переводится с одного предмета на другой, нарушается резкость изображения, о чем в мозг приходит сигнал. Обратный сигнал из мозга к цилиарной мышце вызывает ее сокращение или растяжение другой стенки, пока не получится резкое изображение. Точка, которую глаз видит при расслабленной цилиарной мышце, называется *дальней точкой*; точка, видимая при максимальном напряжении, — *ближней точкой*. Для нормального глаза дальняя точка лежит бесконечно далеко, ближняя точка N — на расстоянии около 15—20 см от глаза.

IV. При *близорукости* дальняя точка находится на конечном расстоянии, иногда (при сильной близорукости) очень близко к глазу. Соответственно приближается и ближняя точка, поэтому близорукие люди для лучшей видимости приближают предметы к глазу. Лучи фокусируются не на сетчатке, а внутри стекловидного тела (рис. 5.19, а). Близорукость вызывается либо вытянутостью глазного яблока, либо спазмом цилиарной мышцы. Коррекция близорукости производится с помощью очков с рассеивающими линзами (рис. 5.19, б).

Дальнозоркость вызвана либо укороченностью глазного яблока, либо слабой аккомодацией, что приводит к удалению ближней точки от глаза. Дальнозоркость обычно возникает в старческом возрасте, когда хрусталик теряет упругость, но встречается и врожденная дальнозоркость. При дальнозоркости лучи фокусируются не на сетчатке, а за ней (рис. 5.20, а). Для коррекции этого недостатка глаза применяются очки с собирающими линзами (рис. 5.20, б).

V. На сетчатке возникают перевернутые изображения всех предметов. Но мозг, перерабатывая полученную зрительную информацию, воспринимает предметы правильно.

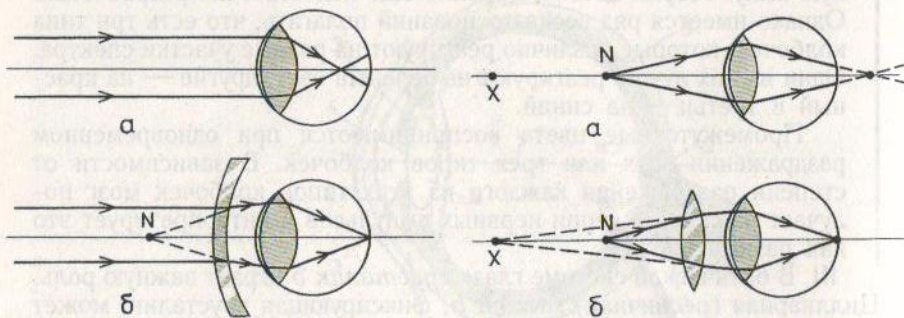


Рис. 5.19

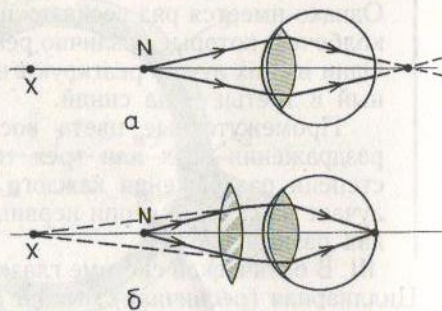


Рис. 5.20

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен глаз?
2. Какую функцию выполняет сетчатка?
3. Какую функцию выполняет хрусталик?
4. Чем вызвана близорукость? Как она корректируется?
5. Чем вызвана дальнозоркость? Как она корректируется?
6. Как действует радужная оболочка? Как меняется диаметр зрачка при сильной и слабой освещенности?
7. Как определить расстояние до предмета, если смотреть двумя глазами?

§ 5.7. УГОЛ ЗРЕНИЯ. ПРИБОРЫ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ УГЛА ЗРЕНИЯ

I. *Размер изображения $S'S'_1$ предмета SS_1 на сетчатке определяется углом зрения $\varphi = h/f$. Это угол с вершиной в оптическом центре глаза и лучами, направленными на крайние точки предмета (рис. 5.21).*

Можно увеличить угол зрения, приблизив предмет к глазу. Однако при этом усиливается напряжение цилиарной мышцы, и глаз устает. Особенно трудно аккомодировать глаз, если предмет расположен около ближней точки.

Расстояние наилучшего зрения — это расстояние от предмета до глаза, при котором угол зрения оказывается максимальным, а напряжение аккомодации не очень велико, и глаз не устает. У нормального глаза расстояние наилучшего зрения около 25 см.

Для получения достаточной информации о структуре рассматриваемого глазом предмета изображения отдельных участков проецируются на разные светочувствительные участки сетчатки. Поскольку размер изображения на сетчатке определяется углом зрения, под которым виден предмет, то увеличение объема зрительной информации достигается лишь за счет увеличения угла зрения. Приборами, позволяющими искусственно увеличить угол зрения, являются *лупа, микроскоп и телескоп*.

II. *Лупа — это короткофокусная собирающая линза, сделанная из стекла или прозрачной пластмассы. Маленький предмет, рассматриваемый через лупу, показан на рисунке 5.14.*

Применительно к лупе, как правило, пользуются понятием *угловое увеличение*. Если нормальный глаз рассматривает малый предмет $AB = h$, расположенный на расстоянии наилучшего зрения $D = 25$ см, то он видит этот предмет под углом φ_0 , причем $\tan \varphi_0 = h/D$. Если же перед глазом поместить короткофокусную собирающую линзу, то угол зрения увеличится (см. рис. 5.14). Мнимое изображение $A'B'$ предмета AB , помещенного вблизи фокуса лупы, имеет существенно большие размеры, а глаз видит это изображение под углом φ , причем $\tan \varphi = h/f$, где f — фокусное расстояние линзы. За-

метим, что для малых углов $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$, где угол φ выражен в радианах.

Из этих соотношений выводят формулу для углового увеличения лупы (при условии, что глаз аккомодирован на бесконечность):

$$\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0} \approx \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{D}{f}.$$

Чем меньше фокусное расстояние лупы, тем большее увеличение она дает. На практике лупы с фокусным расстоянием меньше чем 2 см не применяют. Такие короткофокусные линзы вносят очень серьезные искажения в получаемые изображения, так что практически теряется смысл в увеличении. Именно поэтому наибольшее угловое увеличение лучших луп считается 5—10.

III. Во многих научных и технических исследованиях даже десятикратное увеличение угла зрения недостаточно. Например, биологи исследуют клетки растений или животных, размеры которых очень малы. Для увеличения угла зрения в этих случаях используют *оптические микроскопы*, представляющие собой комбинацию двух короткофокусных систем: *объектива* (см. рис. 5.12) и *окуляра*. На объектив свет падает от рассматриваемого объекта, через окуляр свет попадает в глаз наблюдателя. Схема построения изображения показана на рисунке 5.22.

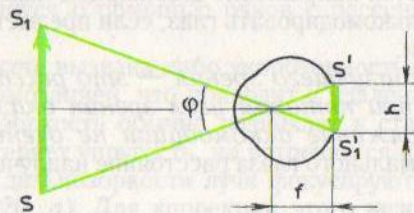


Рис. 5.21

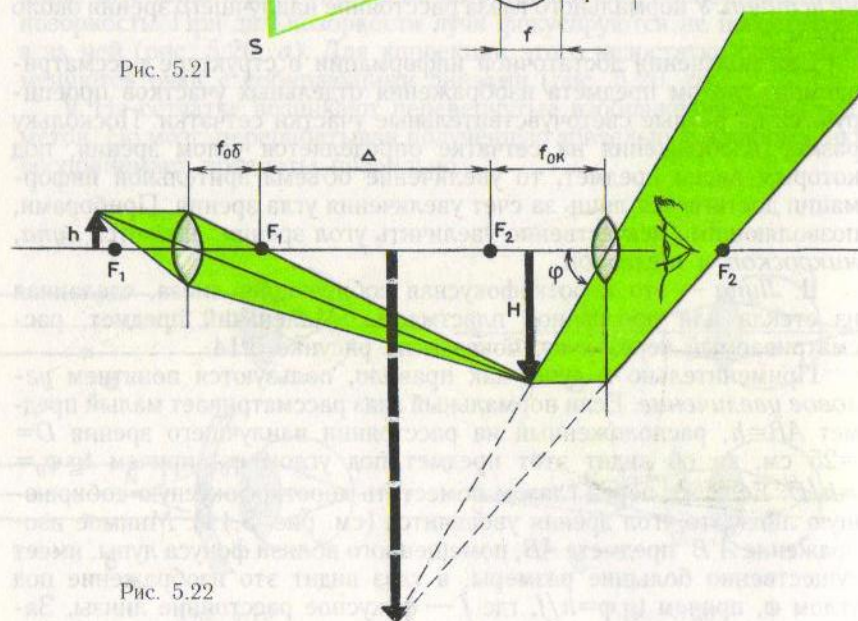


Рис. 5.22

IV. Для наблюдения удаленных объектов (планет, звезд) в астрономии используют телескопы, которые бывают двух основных видов: *рефлекторы* и *рефракторы*.

Действие *рефлектора* (отражающего телескопа) основано на использовании зеркального отражающего объектива. Впервые такой телескоп был создан И. Ньютоном в 1668 г. Используя в качестве объектива не линзу, а зеркало, И. Ньютон стремился устранить хроматическую аберрацию, свойственную линзам. Заметим, что изготовить хорошо отшлифованное зеркало гораздо проще, чем линзу большого диаметра, поэтому *современные телескопы с диаметром объектива в несколько метров всегда рефлекторы*. Ход лучей в таком телескопе показан на рисунке 5.23.

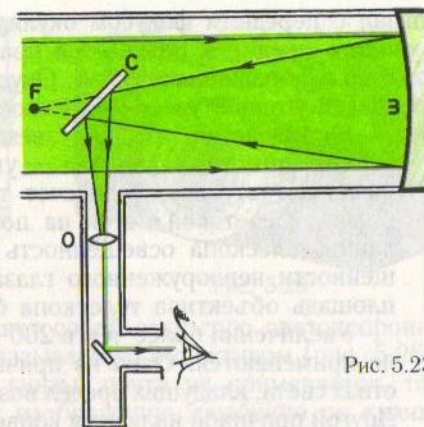


Рис. 5.23

Пучок света, отражаясь от вогнутого зеркала 3, попадает на другое небольшое вспомогательное зеркало C, а оттуда — в линзовый окуляр O. Вспомогательное зеркало направляет пучок света в глаз.

Самый крупный в мире зеркальный телескоп, построенный в нашей стране, имеет диаметр зеркала 6 м.

V. В *рефракторе* (линзовом телескопе), как и в микроскопе, используются две системы линз. Ход лучей в трубе Кеплера показан на рисунке 5.24. В отличие от микроскопа наблюдаемый объект находится от телескопа практически на бесконечном расстоянии. Оптическую систему телескопа для получения максимального углового увеличения конструируют так, чтобы задний фокус объектива сов-

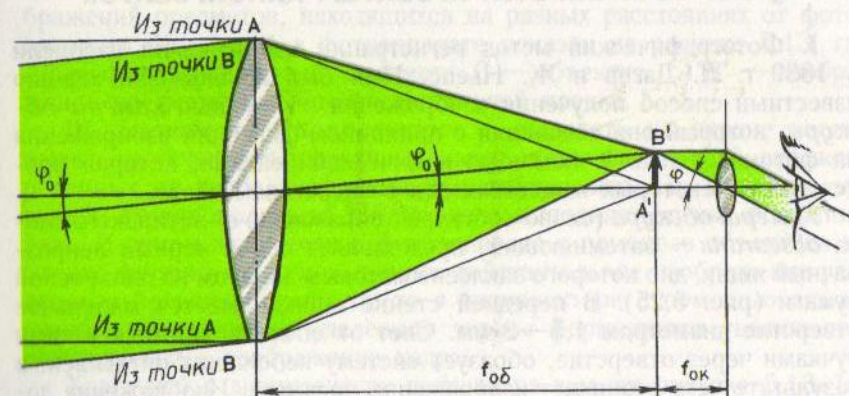


Рис. 5.24

падал с передним фокусом окуляра. Изображение далеко расположенного предмета получается практически в фокальной плоскости; размер изображения $A'B' = h$. Окуляр выполняет роль лупы: он обеспечивает угловое увеличение изображения.

Оказывается, что для звезд даже при большом увеличении угол зрения все равно мал — увидеть детали не удастся. Но глаз различает эту звезду за счет того, что телескоп концентрирует большой световой поток на поверхности зрачка. При использовании телескопа освещенность зрачка получается больше освещенности невооруженного глаза во столько раз, во сколько раз площадь объектива телескопа больше площади самого зрачка.

Увеличения более чем в 200—300 раз в оптических телескопах не применяются. Одна из причин заключается в волновых свойствах света, кладущих предел возможным увеличениям угла зрения. Другой причиной являются конвективные потоки и неоднородности в атмосфере, которые ухудшают качество изображения, особенно при больших увеличениях.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется углом зрения?
2. Что называется расстоянием наилучшего зрения? Чему оно равно для нормального глаза?
3. Почему с помощью лупы удастся увеличить угол зрения на предмет малых размеров? Постройте ход лучей в лупе.
4. Как устроен микроскоп? Постройте ход лучей в микроскопе.
5. Как устроен телескоп-рефлектор? Постройте ход лучей в рефлекторе.
6. Как устроен телескоп-рефрактор? Постройте ход лучей в рефракторе.
7. Почему все гигантские телескопы — это рефлекторы, а не рефракторы?

§ 5.8. ФОТОАППАРАТ. ПРОЕКТОР. КИНОПРОЕКТОР

I. Фотографический метод регистрации изображений изобрели в 1839 г. Л. Дагер и Ж. Ньепс. Ими был использован хорошо известный способ получения изображения с помощью *камеры-обскуры*, который они соединили с принципом фиксации изображения на фотоматериалах с помощью химической реакции, которая происходит в некоторых веществах под воздействием света.

Камера-обскура (слово «обскура» образовано от латинского слова *obscurans* — затемняющий) представляет собой черный непрозрачный ящик, дно которого заклеено матовым экраном из папиросной бумаги (рис. 5.25). В передней стенке ящика имеется маленькое отверстие диаметром 1,5—2 мм. Свет от объекта, проходя узкими пучками через отверстие, образует систему небольших пятнышек, в результате чего возникает изображение предмета. Изображение достаточно слабое и слегка размытое, но в темной комнате его разглядеть можно.

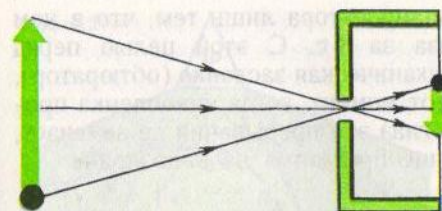


Рис. 5.25

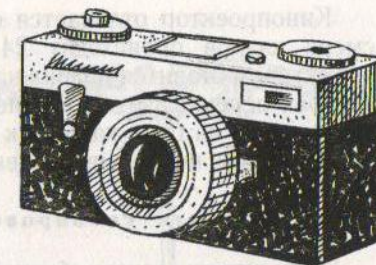


Рис. 5.26

II. *Фотоаппарат* представляет собой закрытую светонепроницаемую камеру и систему линз, называемую объективом (рис. 5.26). Объектив, состоящий из одной линзы, почти не применяется, так как он дает большие искажения изображения, особенно по краям. Поэтому даже относительно простые объективы состоят из двух-трех линз; более совершенные, с помощью которых получаются изображения лучшего качества, — из семи — девяти линз. Объектив дает изображение на фотопленке (или фотопластинке), покрытой фотоэмульсией. Для фиксации изображения предмета на пленке необходимо открыть объектив на какое-то короткое время — время *экспозиции* (выдержки). Это обеспечивается применением затвора.

Для настройки на резкость объектив фотоаппарата слегка перемещается. При фотографировании удаленных предметов фотопленка находится почти в фокальной плоскости объектива. Если же предмет расположен близко, то объектив слегка удаляется. Специальные приспособления облегчают наводку на резкость.

Еще одна важная деталь фотоаппарата — диафрагма. Казалось бы, деталь лишняя, так как уменьшение диаметра диафрагмы сужает световой пучок и заставляет увеличивать выдержку при фотографировании. Но использование диафрагмы позволяет решить проблему, важную в практике фотографирования, — это получение четких изображений предметов, находящихся на разных расстояниях от фотоаппарата. Ход лучей в фотоаппарате показан на рисунке 5.13, где AB — фотографируемый предмет, C — объектив, $A'B'$ — изображение предмета на светочувствительной пленке.

III. Назначение *диапроектора* — создавать на экране увеличенные изображения прозрачных рисунков или фотографий, зафиксированных на кадре диафильма или диапозитиве. По существу это задача, противоположная той, которую выполняет оптика фотоаппарата. В самом деле, если в фотоаппарате с помощью объектива на пленке формируется уменьшенное действительное изображение удаленного большого предмета, то в диапроекторе с помощью аналогичного объектива на удаленном экране формируется увеличенное действительное изображение кадра.

Ход лучей в диапроекторе показан на том же рисунке 5.13. Но теперь $A'B'$ — проектируемый кадр диафильма или диапозитива, а AB — увеличенное изображение этого кадра на экране.

Кинопроектор отличается от диапроектора лишь тем, что в нем смена кадров происходит 24 раза за 1 с. С этой целью перед объективом ставится подвижная механическая заслонка (обтюратор), которая перекрывает объектив в тот момент, когда киноплёнка продергивается на один кадр. Так как глаз эти прерывания не замечает, то мы видим непрерывное движение предметов на киноэкране.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроена камера-обскура?
2. Какую роль играет объектив в фотоаппарате, если в камере-обсуре изображение получается без всяких линз?
3. Чем отличается настройка на резкость у глаза и фотоаппарата?
4. Какой части глаза аналогична диафрагма фотоаппарата? Какую функцию она выполняет?
5. Каков принцип действия диапроектора?
6. Какое свойство глаза позволяет создать кино?
7. Каков принцип действия кинопроектора?

§ 5.9. ПРИЗМА. СПЕКТРОСКОП

I. Пусть на грань стеклянной призмы из воздуха падает параллельный пучок света под углом α_1 . Преломившись дважды на обеих гранях (углы β_1 и α_2), пучок отклонится от первоначального направления к основанию призмы (рис. 5.27). Угол отклонения ϵ зависит от преломляющего угла φ в вершине призмы, а также от частоты световой волны, соответствующей исследуемому пучку света. Действительно, в результате дисперсии показатель преломления, например, для сине-фиолетового света больше, чем для красно-желтого. Соответственно пучок синего или фиолетового цвета отклонится призмой сильнее, чем пучок красного или желтого цвета.

II. *Спектроскопом называют прибор, предназначенный для визуального исследования спектрального состава света, испускаемого некоторым источником.* Школьный спектроскоп показан на рисунке 5.28.

Спектрографом называют прибор, в котором спектр регистрируется на фотопластинке MN. Простейшая схема спектрографа показана на рисунке 5.29. Слева расположен коллиматор SL_1 . Прямоугольная узкая щель S находится в фокальной плоскости объектива L_1 . Следовательно, если щель осветить, то на призму будет падать параллельный пучок света.

Из призмы выходят параллельные пучки, отклоненные в результате дисперсии на разные углы в зависимости от частоты света, т. е. от его цвета. В фокальной плоскости линзы L_2 возникает множество изображений щели S , причем каждое изображение соответствует частоте волны и в результате этого имеет определенный цвет. Все эти

Рис. 5.27

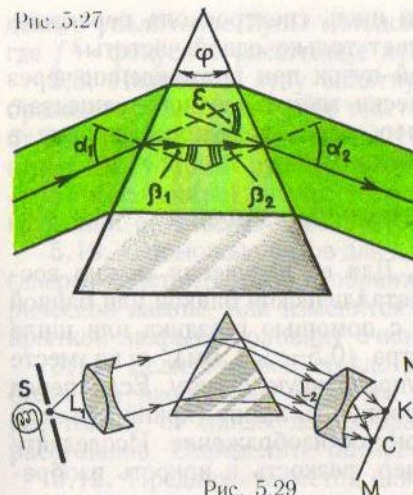


Рис. 5.29

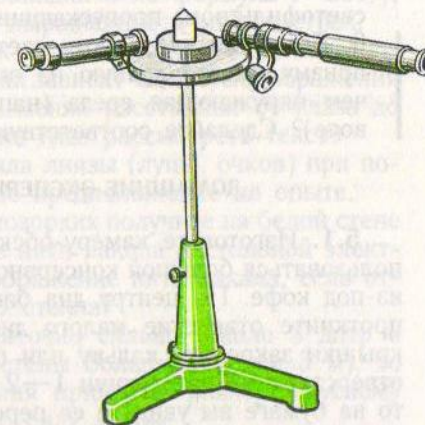


Рис. 5.28

изображения либо фотографируются (в спектрографе), либо рассматриваются глазом через окуляр спектроскопа.

III. Если щель освещается белым светом, то наблюдается *сплошной спектр* — плавный переход от изображения щели в одном цвете к другому. Если же щель освещается смесью из нескольких волн с разной частотой, то в фокальной плоскости линзы L_2 наблюдается *линейчатый спектр* — ряд узких цветных линий, разделенных черными промежутками. Каждая цветная полоска — это изображение щели S в данном цвете, соответствующем определенной частоте световой волны.

Исследование линейчатых спектров позволяет осуществлять спектральный анализ, что было рассмотрено в § 4.11.

Вопросы для самопроверки

1. Как ведет себя световой пучок при прохождении через стеклянную призму?
2. Почему при прохождении белого света через призму происходит его спектральное разложение?
3. Как устроен спектрограф?
4. Как в спектрографе образуется линейчатый спектр?

Упражнения

1. Щель спектрографа имеет вид узкой прямоугольной прорези. В результате в фокальной плоскости второй линзы наблюдается спектр, имеющий форму прямых полосок разного цвета (см. рис. 4.18). Какой вид должен иметь спектр, если в спектрографе вместо прямоугольной щели сделать небольшое круглое отверстие? Сделайте соответствующий цветной рисунок.

2. Что увидит наблюдатель, если щель спектроסקопа перекрыть светофильтром, пропускающим свет только одной частоты?

3. Как будет себя вести световой пучок при прохождении через призму, изготовленную из оптически менее плотного вещества, чем окружающая среда (например, через воздушную призму в воде)? Сделайте соответствующий рисунок.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

5.1. Изготовьте камеру-обскуру. Для ее получения можно воспользоваться большой консервной металлической банкой или банкой из-под кофе. По центру дна банки с помощью гвоздика или шила проткните отверстие малого диаметра (0,5—1,0 мм), а на месте крышки закрепите кальку или полупрозрачную бумагу. Если перед отверстием на расстоянии 1—2 м поставить лампу (яркий объект), то на бумаге вы увидите ее перевернутое изображение. Исследуйте влияние размера отверстия на размер, резкость и яркость изображения.

5.2. При открытой задней крышке фотоаппарата получите на матовом стекле изображение той же лампы с помощью объектива фотоаппарата. Сравните это изображение с тем, что дает камера-обскура. В чем преимущества изображения, даваемого объективом фотоаппарата?

5.3. Докажите на опыте, что на сетчатке глаза, как и в фотоаппарате, получается перевернутое изображение. Для доказательства возьмите две открытки, в одной из них проколите иголкой отверстие диаметром 0,5 мм. Глядя на включенную лампу или светлое небо, держите ее перед глазом на расстоянии 2—3 см. Краем второй открытки постепенно перекрывайте зрачок, перемещая открытку снизу перед самым глазом. Опишите, что вы увидите в поле зрения глаза.

5.4. Изготовьте из листа бумаги трубку диаметром 20—26 мм и длиной 100—150 мм и смотрите через нее одним глазом на расположенный впереди предмет. Перед другим глазом поместите ладонь руки, держа ее вплотную к трубке на расстоянии, равном длине трубки. Что вы увидите в вашей ладони?

5.5. Посмотрите через лупу на лист миллиметровой бумаги. При этом добейтесь максимального увеличения миллиметровой сетки. Обратите внимание на неодинаковую резкость изображения, на красные и синие каемки. Назовите эти оптические недостатки линз.

5.6. С наступлением темноты зрачок человеческого глаза расширяется. Проверьте на опыте это явление и объясните, как это отражается на резкости изображений окружающих предметов. Есть ли у фотоаппарата аналогичная деталь?

5.7. На страницу книги положите лупу, при этом глаз должен быть на расстоянии наилучшего зрения. Как и почему меняется изображение букв при удалении лупы от страницы по направлению к глазу? Зависит ли видимый размер изображения от расстояния глаза до лупы? Получите наибольшее прямое изображение и опре-

делите увеличение лупы методом прикидки и по формуле $\Gamma = 250/f$, где f — фокусное расстояние лупы, выраженное в миллиметрах.

5.8. Поднесите лупу вплотную к глазу и получите четкое изображение букв какого-либо текста. Как зависит четкость изображения от расстояния букв до лупы? Не изменяя расстояния от глаза до страницы, уберите лупу. Способен ли глаз рассмотреть текст?

5.9. Изменится ли оптическая сила линзы (лупы, очков) при погружении ее в воду? Проверьте свое предположение на опыте.

5.10. С помощью очков для дальновидящих получите на белой стене (двери) действительное изображение нити накала настольной электрической лампы. Как изменится изображение нити накала, если открыткой закрыть половину очкового стекла?

5.11. Если очковое стекло достаточно сильно (около 3 дптр и более), а расстояние от линзы до стены большое (более 3 м), то расстояние от линзы до изображения примерно равно фокусному расстоянию. Определите оптическую силу линзы.

5.12. Предложите метод для различения собирающей линзы от рассеивающей, не определяя при этом на ощупь их толщину в разных местах.

5.13. Спираль лампочки накаливания или пламя свечи находится в фокусе рассеивающей линзы (очки для близоруких). Построением определите, на каком расстоянии от линзы находится изображение спирали (свечи). Предложите на этой основе метод определения оптической силы рассеивающей линзы и проверьте его на опыте.

5.14. Спираль лампочки накаливания проецируется на стену (экран) с помощью линзы (например, объектива фотоаппарата). Перекройте часть линзы полоской из непрозрачного материала и выведите лампочку из плоскости оптимальной фокусировки. Опишите и объясните характер изменения изображения.

5.15. Ознакомьтесь с устройством диапроектора (фильмоскопа). Определите фокусное расстояние его объектива. Получите изображение кадра (диапозитива) на экране, расположенном вдали и вблизи диапроектора. Как вы добиваетесь четкого изображения? Есть ли такое же устройство в фотоаппарате?

5.16. Сравните размеры изображений на экране, расположенном вдали и вблизи от диапроектора. Когда изображение на экране ярче? Почему?

Глава 6. ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

§ 6.1. ПОЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ПРОСТРАНСТВЕ И СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

I. В VII классе, рассматривая движение тел, мы ввели понятие *материальной точки* как тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. Это понятие, являясь весьма существенным в механике, позволяет упрощать решение многих задач. Рассмотрим, применимо ли понятие *материальная точка* в астрономии.

В VII классе при изучении тел Солнечной системы вы узнали, что размеры планет значительно (в несколько тысяч раз) меньше, чем расстояния между ними. Поэтому планеты можно считать материальными точками при изучении их движения и определении положения на небе.

В полной мере это понятие применимо и к наиболее многочисленным на небе объектам — звездам. Они находятся от Земли и друг от друга на таких колоссальных расстояниях, что даже в самые сильные телескопы видны как точки.

У Луны и Солнца ясно виден диск конечных размеров. Однако при их перемещении относительно неподвижных звезд, например при рассмотрении движения Солнца по эклиптике, можно следить за движением одной точки, например центра диска. Значит, и в этих задачах мы можем Луну и Солнце считать материальными точками.

II. Разумеется, что во многих других случаях, например при изучении природы Солнца, Луны, планет и звезд или таких явлений, как лунные и солнечные затмения, небесные тела не могут рассматриваться как материальные точки.

Заметим, что дальше во всех рассматриваемых задачах механики (включая и небесную механику) мы под понятием *тело* будем понимать именно *материальную точку*.

III. Чтобы описать положение и движение тела, следует выбрать систему координат. Простейшей является *декартова система координат*, предложенная Р. Декартом примерно в 1637 г. Чтобы понять идею этого метода, обратимся к примеру.

Допустим, что вы хотите указать электромонтеру, в какой точке комнаты он должен расположить электрическую лампочку. Нетрудно сообразить, что для этого следует указать три числа (три координаты) — *высоту лампочки над полом и расстояния от двух взаимно перпендикулярных стен*. Это изображено на рисунке 6.1. Мы выбираем некоторую точку O , называемую *началом координат*, и проводим через нее три взаимно перпендикулярные прямые OX , OY и OZ , т. е. проводим *оси координат*. Затем из точки M , координаты которой надо определить, опускаем перпендикуляр MM_1 на плоскость XOY , а из точки M_1 — перпендикуляры на оси координат OX и OY .

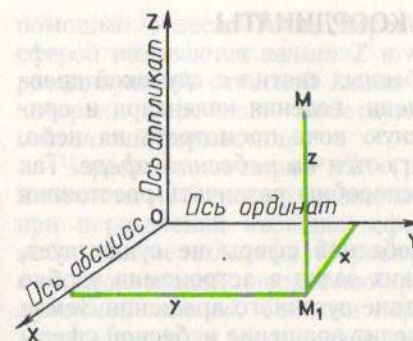


Рис. 6.1

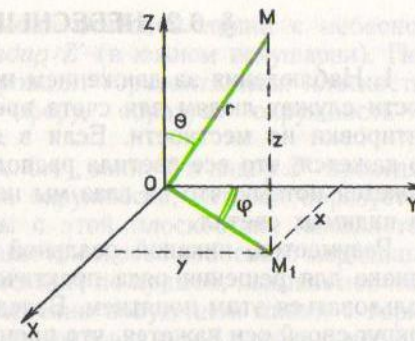


Рис. 6.2

Получаем три отрезка, длинами которых и определяются координаты точки M — абсцисса x , ордината y и аппликата z .

IV. Очень часто взамен прямоугольной декартовой системы координат используют *сферическую систему координат* (рис. 6.2). Здесь начало координат O называется *полем*. Координаты точки M задаются длиной радиуса-вектора $r = OM$ и двумя угловыми координатами: углом φ — долгота и углом Θ — полярное расстояние.

Из рисунка 6.2 нетрудно вывести соотношение между полярными и декартовыми координатами. В самом деле, из прямоугольного треугольника MOM_1 следует $MM_1 = OM \cos \Theta = r \cos \Theta$, $OM_1 = OM \sin \Theta = r \sin \Theta$, откуда

$$\begin{cases} x = r \sin \Theta \sin \varphi, \\ y = r \sin \Theta \cos \varphi, \\ z = r \cos \Theta. \end{cases}$$

Вопросы для самопроверки

1. Что мы понимаем под материальной точкой?
2. В каких случаях можно небесные тела рассматривать как материальные точки?
3. Как строится декартова система координат?
4. Как называются декартовы координаты точки?
5. Как строится сферическая система координат?

Упражнения

1. Координаты точки M равны $x=2$ м, $y=4$ м, $z=4$ м. Определите длину радиуса-вектора точки, т. е. расстояние от точки M до начала координат.
2. Координаты точки равны $x=y=0$, $z=-2$ м. Где находится данная точка? Каково ее расстояние до начала координат?
3. Координаты точки равны $z=0$, $x=3$ м, $y=4$ м. Где находится данная точка? Каково ее расстояние до начала координат?

§ 6.2. НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ

I. Наблюдения за движением небесных светил с глубокой древности служат людям для счета времени, ведения календаря и ориентировки на местности. Если в ясную ночь посмотреть на небо, то кажется, что все светила располагаются на *небесной сфере*. Так кажется потому, что на глаз мы не способны различить расстояния до видимых светил.

Разумеется, никакой реальной небесной сферы не существует, однако для решения ряда практических задач в астрономии удобно пользоваться этим понятием. Вследствие суточного вращения Земли вокруг своей оси кажется, что происходит вращение небесной сферы вокруг воображаемой линии — оси мира, пересекающей сферу в точках Северного и Южного полюсов мира. Из курса VII класса вам известно, что неподалеку от Северного полюса мира находится звезда, которая названа Полярной.

II. Видимое вращение небесной сферы со всеми находящимися на ней светилами происходит вокруг оси мира. Она проходит через центр Земли и пересекает ее поверхность в точках, получивших названия северного и южного географических полюсов. Поскольку размеры Земли по сравнению с расстояниями до звезд ничтожно малы, то ось мира для наблюдателя в любом пункте Земли параллельна оси вращения нашей планеты.

Наблюдая за движением светил по небесной сфере, можно не учитывать расстояние, на котором они находятся, и указывать только направление на светило, его расположение на этой сфере. Для этого в астрономии используются в основном две системы координат: *горизонтальная* и *экваториальная*.

III. Для того чтобы ввести эти системы координат, необходимо рассмотреть основные точки и линии на небесной сфере (рис. 6.3). Линия ZO , вдоль которой действует сила тяжести в точке наблюдения O , называется *отвесной линией*. Ее направление определяется с

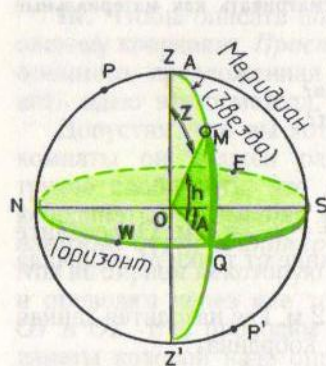


Рис. 6.3



Рис. 6.4 Небесный экватор Горизонт

помощью отвеса. Точки пересечения отвесной линии с небесной сферой называются *зенит* Z и *надир* Z' (в южном полушарии). Перпендикулярно отвесной линии проходит горизонтальная плоскость, которая, пересекая небесную сферу, образует окружность — *истинный горизонт*.

Через полюсы мира P и P' (рис. 6.4), зенит Z и надир Z' проходят плоскость небесного меридиана, а окружность, которая образуется при пересечении небесной сферы с этой плоскостью, называется *небесным меридианом*. Пересечение плоскости небесного меридиана с горизонтальной плоскостью происходит по прямой, называемой *полуденной линией*. Точками пересечения полуденной линии с горизонтом являются хорошо известные всем точка юга S и точка севера N .

Плоскость, проведенная через точку наблюдения (центр сферы) перпендикулярно оси мира PP' , называется *плоскостью небесного экватора*. Она параллельна земному экватору и в пересечении с небесной сферой образует *небесный экватор*. Он пересекается с горизонтом в точках запада W и востока E .

IV. Простейшей из систем небесных координат является *горизонтальная система*, которая изображена на рисунке 6.3. Основной плоскостью в этой системе является горизонтальная плоскость. Координатами служат азимут A и высота светила h .

Если через плоскость провести отвесную линию и зафиксировать точку M , которая обозначает положение светила, то окружность, образуемая при пересечении этой плоскости с небесной сферой, пересекается с горизонтом в точке Q . Высота светила h отсчитывается от горизонта и выражается углом QOM (или соответствующей ему дугой). Значения высоты меняются от $+90^\circ$ до -90° . Для светил, находящихся над горизонтом, высота считается положительной. Иногда вместо высоты измеряется *зенитное расстояние* — угол $ZOM = z = 90^\circ - h$.

Азимут светила A измеряется углом SOQ по горизонту от точки юга к западу, т. е. в направлении суточного вращения небесной сферы. Он меняется в пределах от 0 до 360° .

V. Светила в течение суток восходят и заходят, т. е. их горизонтальные координаты постоянно меняются. Вместе с тем фотографии звездного неба, сделанные с большой экспозицией, показывают, что все звезды вращаются как единое целое; их расположение друг относительно друга не изменяется. Это дает возможность построить *экваториальную систему координат* (см. рис. 6.4), которая применяется при составлении звездных карт и атласов. В такой системе, где основная плоскость — плоскость небесного экватора, координатами являются прямое восхождение α и склонение δ . Эти координаты аналогичны применяемым на Земле: географическим долготе и широте. Склонение — это угловое расстояние светила M от небесного экватора (угол $M'OM = \delta$). Склонение считается положительным от 0 до $+90^\circ$ для звезд северного полушария неба и отрицательным (от 0 до -90°) для звезд южного полушария.

Началом отсчета для прямого восхождения условились считать

точку весеннего равноденствия Υ , находящуюся в созвездии Рыбы, где Солнце бывает в день весеннего равноденствия. В этот день (20 или 21 марта), когда Солнце пересекает небесный экватор, переходя из южного полушария неба в северное, повсюду на Земле продолжительность дня равна продолжительности ночи. Прямое восхождение светила — это его угловое расстояние по небесному экватору от точки весеннего равноденствия до точки M' , от которой отсчитывается склонение светила, т. е. угол $\Upsilon OM' = \alpha$. Прямое восхождение отсчитывается в направлении, противоположном вращению небесной сферы, и выражается обычно не в угловых единицах, а в единицах времени — часах, минутах и секундах. Поскольку полный оборот Земля (и небесная сфера) совершает за 24 ч, то легко убедиться, что одному часу (1 ч) соответствует угол 15° , одной минуте (1 мин) — угол $15'$, а одной секунде (1 с) — угол $15''$.

VI. Определение экваториальных координат звезд всегда было и остается одной из важнейших задач астрономии. Это позволило составить звездные каталоги (списки с указанием координат) и на их основе — звездные карты и атласы. С древних времен характерные группы ярких звезд получили имена, заимствованные из мифологии: Большая Медведица, Малая Медведица, Пегас, Водолей, Персей, Андромеда и др. В настоящее время звездное небо разделено на 88 участков-созвездий, каждый из которых имеет свое название.

VII. Наиболее древние из числа дошедших до нас каталогов и карт составлены китайским астрономом Ши Шэнем (IV в. до н. э.), греческим ученым Клавдием Птолемеом (II в. н. э.), узбекским астрономом Улугбеком (XV в.) и датчанином Тихо Браге (XVI в.). К настоящему времени с помощью специального искусственного спутника Земли определены с очень высокой степенью точности (около $0,001''$) координаты более 118 тыс. звезд. Звездные каталоги и карты необходимы в морской и воздушной навигации для точного определения координат на поверхности Земли и в космическом пространстве, для изучения движения тел Солнечной системы звезд и других объектов во Вселенной.

Вопросы для самопроверки

1. С каким телом отсчета связана горизонтальная система небесных координат?
2. Какая точка на небесной сфере называется Северным полюсом мира?
3. Какая плоскость называется плоскостью небесного меридиана?
4. Что такое полуденная линия?
5. Что называется высотой светила над горизонтом?
6. Что такое азимут?
7. Чем отличаются друг от друга горизонтальная и экваториальная системы отсчета?
8. Что называется склонением и прямым восхождением светила?
9. Какая система координат применяется при составлении астрономических каталогов, карт и атласов?

10. Что называется созвездием?

11. В чем состоит научная ценность астрономических каталогов, карт и атласов, составленных в разные исторические эпохи?

Упражнения

1. Изобразите по памяти горизонтальную систему координат. Обозначьте высоту и азимут светила.
2. Изобразите экваториальную систему координат. Обозначьте склонение и прямое восхождение светила.
3. Держа глобус в руках так, чтобы его ось сохраняла постоянное направление в пространстве, обойдите вокруг электрической лампы. Заметьте, какие положения глобуса соответствуют дням весеннего и осеннего равноденствий.
4. Наблюдатель находится на Северном полюсе Земли. С каким направлением совпадает для него ось мира? В каких точках находятся Полюса мира?
5. Эту же задачу решите для наблюдателя, находящегося на Южном полюсе Земли.
6. Эту же задачу решите для наблюдателя, находящегося на земном экваторе.
7. Экваториальные координаты звезды Антарес: $\alpha = 16^h 28^m$, $\delta = -26^\circ 23'$. В каком полушарии находится эта звезда? Каков угол между плоскостью, проходящей через ось мира и точку весеннего равноденствия, и плоскостью, проходящей через ось мира и звезду?

§ 6.3. КУЛЬМИНАЦИИ ЗВЕЗД. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ И ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

I. При суточном движении Солнце и звезды дважды пересекают небесный меридиан. Прохождение светила через небесный меридиан называется *кульминацией*. Когда кульминация происходит в той части меридиана, где расположен зенит, она называется *верхней*, а когда в той, где надир, — *нижней*.

На рисунке 6.5 показаны траектории суточного движения звезд A , B , C и D на географической широте около 45° . Верхние кульминации обозначены индексом «в», нижние — индексом «н». Как видно, звезды A и B являются незаходящими — обе их кульминации находятся над горизонтом.

Звезда C является заходящей — ее нижняя кульминация происходит под горизонтом, а звезда D в этом полушарии Земли не видна: обе ее кульминации происходят под горизонтом.

II. Зная местное время в момент верхней кульминации светила и высоту нахождения светила в кульминации, можно определить географические координаты пункта наблюдений — долготу и широту.

По местному времени истинный полдень наступает в момент верхней кульминации центра видимого диска Солнца.

Рис. 6.5

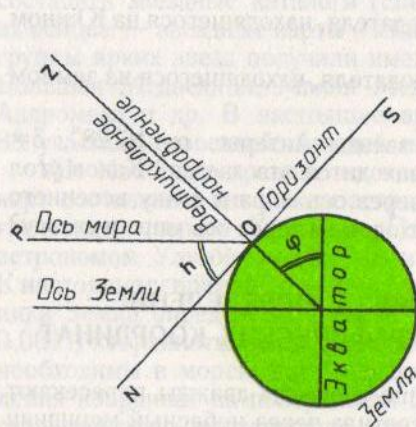
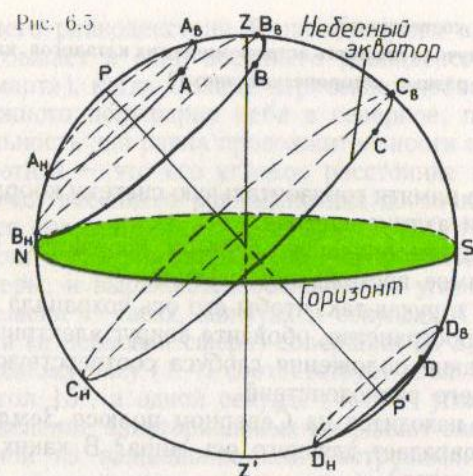


Рис. 6.6

Верхние кульминации Солнца и любой звезды повторяются спустя ровно сутки. За это время Земля совершает один полный оборот вокруг своей оси, и светило снова оказывается на небесном меридиане.

Прямое восхождение Солнца, звезд и других небесных объектов не случайно выражают в единицах времени. Время, прошедшее между моментами кульминации двух светил, равно разности их прямых восхождений. Так что, наблюдая кульминацию звезды с известными координатами, можно определить время, которое прошло с начала суток или полудня, т.е. определить местное время данного пункта.

Службы времени на астрономических обсерваториях и другие научные учреждения, имеющие хорошо известные географические ко-

Вертикальное направление

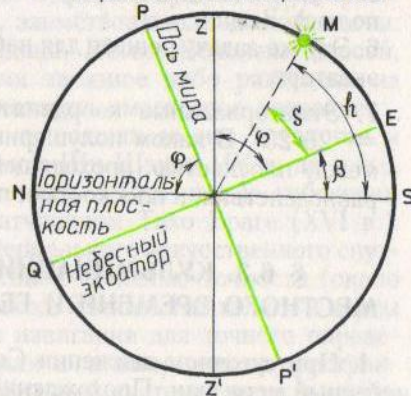


Рис. 6.7

ординаты, хранят время с помощью атомных и кварцевых часов. Эти часы с высокой степенью точности поддерживают частоту разных колебательных процессов. Периодически они передают сигналы точного времени по радио.

III. В каком-то месте Земли в данный момент наступил полдень. Но в пунктах, лежащих восточнее этого места, полдень уже прошел. В пунктах, лежащих западнее, полдень наступит ровно на столько позже, сколько времени нужно земному шару, чтобы повернуться на соответствующий угол. Соотношение между единицами времени и угловыми единицами указано в предыдущем параграфе. Сказанное относится не только к полудню (или полночи), но и к любому другому моменту времени в течение суток.

Коротко эту закономерность можно сформулировать так: *разница местных времен в двух пунктах равна разности их географических долгот.*

Следовательно, если по наблюдениям Солнца или звезд определить местное время в каком-то пункте, географическая долгота которого неизвестна, и сравнить его (пользуясь сигналами точного времени) с местным временем пункта с известной долготой, то можно вычислить интересующую нас географическую долготу.

IV. Географическая широта места на Земле равна высоте Полюса мира над горизонтом: $\varphi = h_p$ (рис. 6.6). Стало быть, измерив высоту Полярной звезды над горизонтом, можно узнать примерную географическую широту. Точнее ее можно определить, если измерить высоту в верхней кульминации любой звезды, склонение которой известно.

Как видно из рисунка 6.7, высота светила h в верхней кульминации связана с его склонением δ и широтой места φ соотношением $\varphi = 90^\circ - h + \delta$.

В самом деле, угол между вертикальным направлением ZZ' и небесным экватором QE (рис. 6.7), т.е. $\angle ZOE = \angle PON = \varphi$, равен высоте Полюса мира над горизонтом (углы со взаимно перпендикулярными сторонами). Угол $EOS = \beta = 90^\circ - \varphi$, а с другой стороны, $\beta = h - \delta$. Отсюда следует $90^\circ - \varphi = h - \delta$, или $\varphi = 90^\circ - h + \delta$.

Следовательно, измерив высоту той или иной звезды в верхней кульминации h и зная ее склонение δ (величина табличная), легко определить широту местности.

V. В большинстве случаев повседневной жизни мы пользуемся не местным, а *поясным временем*. Согласно поясной системе отсчета времени весь земной шар разделен по долготе на 24 часовых пояса (по числу часов в сутках). Во всех точках каждого пояса часы показывают одно и то же время. В соседних поясах время отличается на 1 ч: западнее — на 1 ч назад, восточнее — на 1 ч вперед.

Кроме того, в России, как и во всех европейских странах, с конца марта по конец октября действует летнее время. В эти месяцы все часы переведены на 1 ч вперед по сравнению с зимним временем.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют кульминациями светила?
2. Как расположены верхняя и нижняя кульминации светила по отношению к зениту и надиру?
3. Что такое истинный полдень для данного места?
4. Как определить местное время по наблюдениям за звездным небом?
5. Где ведется служба точного времени?
6. Как связаны между собой следующие угловые величины: склонение светила, его высота в верхней кульминации для данной точки Земли и широта, на которой эта точка находится? (Покажите эти углы на рисунке 6.8.)
7. Как определить широту места по наблюдениям за звездным небом? Как быть в тех случаях, когда Полярная звезда закрыта облаками?
8. Как определить долготу места?

Упражнения

1. Как будут выглядеть траектории звезд *A*, *B*, *C* и *D* (см. рис. 6.5), если наблюдатель будет находиться на Северном полюсе? Сделайте соответствующий рисунок. Можно ли здесь говорить о верхней и нижней кульминациях?
2. Эту же задачу решите для наблюдателя, находящегося на земном экваторе. Сделайте соответствующий рисунок. Существуют ли здесь незаходящие и невосходящие звезды?
3. Долгота обсерватории равна $36^{\circ}20'$. Истинный полдень в данной точке Земли был зафиксирован на 30 мин 20 с позже, чем в обсерватории. Определите, где находится данная местность — к востоку или западу от обсерватории. Какова долгота местности?
4. В пункте, находящемся в восточном полушарии, был получен сигнал точного времени из Гринвичской обсерватории: 7 ч. Через 32 мин 23 с в этом месте был зарегистрирован истинный полдень. Какова долгота местности?
5. Какова широта местности в северном полушарии, если высота Полюса мира над горизонтом составляет $61^{\circ}30'$?
6. Каково зенитное расстояние Полюса мира, если широта местности в северном полушарии равна $48^{\circ}40'$?
7. Склонение звезды равно $30^{\circ}10'$. Высота этого светила в момент верхней кульминации равна $60^{\circ}20'$. Определите широту местности.
8. На рисунке 6.7 изображен случай, когда точка верхней кульминации звезды расположена к югу от зенита. Докажите, что если в верхней кульминации звезда находится севернее зенита, то широта местности определяется по формуле $\varphi = 90^{\circ} + h - \delta$. Сделайте соответствующий рисунок.
9. В землю вертикально вкопан шест высотой *H*. Выразите длину тени *l* как функцию высоты Солнца над горизонтом. Докажите, что в истинный полдень длина тени наименьшая. Постройте соответствующий чертеж.

§ 6.4. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СУТОК И КАЛЕНДАРЬ

I. Земля делает оборот вокруг своей оси за 24 ч. Это продолжительность суток, продолжительность одной смены дня и ночи. Смена времен года происходит за один оборот Земли вокруг Солнца. К сожалению, продолжительность суток и продолжительность года несоизмеримы. Земля проходит свой путь по орбите вокруг Солнца за время, равное 365 сут 5 ч 48 мин 46 с. Это создает неудобства при ведении календаря, поскольку в практической деятельности людей именно сутки являются естественной единицей времени.

Поэтому еще до нашей эры римский император Юлий Цезарь ввел календарь, названный юлианским, в котором год принимался равным 365 сут 6 ч. Это значит, что три года имеют по 365 дней, а каждый четвертый — 366 дней. Каждый четвертый год в этом календаре високосный.

II. Поскольку на самом деле год несколько короче, то при таком счете времени календарь за 400 лет отстает от истинного времени приблизительно на трое суток. Чтобы преодолеть такое отставание, по предложению главы католической церкви папы Григория XIII в 1582 г. в странах Европы был принят новый стиль (григорианский календарь), который намного точнее юлианского: его год всего лишь на 26 с длиннее истинного. Лишние сутки в этом календаре набегают за 3300 лет. Это достигнуто за счет того, что из числа високосных исключаются годы, которые оканчиваются на два нуля, но не делятся на 400, например 1600 год високосный, а 1700, 1800 и 1900 не високосные, 2000 год снова високосный.

В России григорианский календарь был принят лишь в 1918 г. За время с 1582 г. юлианский календарь отстал от григорианского на 13 сут. Поэтому в нашей литературе до сих пор можно увидеть обозначения знаменательных дат по новому стилю (григорианскому) и по старому (юлианскому).

Вопросы для самопроверки

1. Почему продолжительность года по календарю непостоянна — в простые годы она составляет 365 сут, а в високосные — 366 сут?
2. Чем отличается григорианский календарь от юлианского?

§ 6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ИХ РАЗМЕРОВ

I. Мы уже говорили о том, что наше впечатление о звездном небе как о небесной сфере вызвано тем, что звезды находятся очень далеко. Установлено, что при гигантской скорости (300 тыс. км/с) свет от ближайшей звезды до Земли идет 4,3 года. При таких гигантских расстояниях мы не можем заметить простым глазом ни перемещения звезд относительно друг друга, ни их размеров, ни их

разных расстояний до Земли. Все они кажутся точками различной яркости на одной сфере, подобно тому как далекий от нас лес кажется одной стеной на горизонте. И тем не менее ученым удается определить расстояния до планет, Солнца и многих звезд, а также диаметры многих светил.

Один из основных методов астрономических измерений состоит в использовании *параллакса*. Параллактическое смещение заключается в изменении положения наблюдаемого объекта при переносе точки наблюдения.

Пусть объект M рассматривается из точек A и B , расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Отрезок AB называется *базисом*. Тогда $\angle \alpha = \angle AMB$, под которым базис виден из точки M (рис. 6.8), называется *параллаксом*.

По параллаксу и базису можно определить расстояние до наблюдаемого предмета. Такой способ измерения расстояний на Земле используется в геодезии и картографии.

II. В астрономических наблюдениях в качестве базиса используется либо радиус Земли, либо диаметр (или радиус) орбиты Земли вокруг Солнца.

При определении расстояний до тел Солнечной системы базисом может служить радиус Земли. *Горизонтальный параллакс* угол $\angle p = \angle OSA_2$ — это угол, под которым с наблюдаемого светила виден радиус Земли, перпендикулярный лучу зрения. Из рисунка 6.9 видно, что расстояние $OS = D$ от Земли до исследуемого светила можно рассчитать по формуле

$$D = \frac{R_{\oplus}}{\sin p},$$

где R_{\oplus} — радиус Земли; p — горизонтальный параллакс светила. Зная радиус Земли $R_{\oplus} = 6378$ км и измерив параллакс, например, для Луны, равный $p_L = 0^\circ 57'$, получим

$$D_L = \frac{6378}{\sin 0^\circ 57'} \text{ км} = \frac{6378}{0,01658} \text{ км} = 384\,680 \text{ км}.$$

III. Для обнаружения параллакса звезд в качестве базиса используют другое известное расстояние — средний радиус земной орбиты, т. е. астрономическую единицу (а.е.):

$$a = 1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м} \approx 150 \text{ млн км}.$$

Угол π , под которым радиус земной орбиты, перпендикулярный лучу зрения, виден из звезды, называется *годовым параллаксом*. Тогда расстояние r до звезды равно:

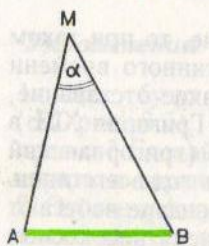


Рис. 6.8

Где от звезды

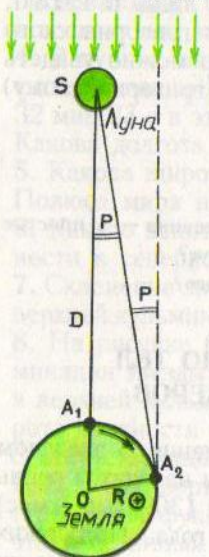


Рис. 6.9

$$r = \frac{a}{\sin \pi}.$$

Годичный параллакс всех звезд очень мал: он всегда меньше $1''$. Так, у ближайшей к нам звезды Проксима Центавра $\pi = 0,76''$, годичный параллакс Веги (α Лиры) $\pi = 0,12''$.

IV. Расстояние до звезды, годичный параллакс которой равен $1''$, называется *парсеком* (от слов «параллакс» и «секунда»):

$$1 \text{ пк} = \frac{1 \text{ а.е.}}{\sin 1''} = 206265 \text{ а.е.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}.$$

Расстояние до звезды, выраженное в парсеках, определяется по очень простой формуле

$$r = \frac{1}{\pi} \text{ пк},$$

где угол π выражается в угловых секундах.

V. Если известен горизонтальный параллакс какого-либо светила p , то можно определить его радиус. Для этого нужно измерить угол ρ , под которым виден радиус R этого светила (рис. 6.10). Тогда расстояние до светила $D = R_{\oplus} / \sin p$, а радиус светила

$$R = D \sin \rho = R_{\oplus} \frac{\sin \rho}{\sin p}.$$

Поскольку p и ρ — малые углы, то выражение упростится:

$$R = R_{\oplus} p / p.$$

Например, известно, что горизонтальный параллакс Луны $p = 0^\circ 57'$, а угловой ее радиус $\rho = 15' 30''$, а следовательно,

$$R_L = \frac{15,5}{57} R_{\oplus} = 0,27 R_{\oplus} = 0,27 \cdot 6378 \text{ км} = 1734 \text{ км}.$$

Таким же способом можно определить размеры других небесных тел Солнечной системы.

Вопросы для самопроверки

1. Почему звезды на небе кажутся светящимися точками, расположенными на сферической поверхности?
2. В чем состоит явление параллактического смещения?
3. Как измерить расстояние до некоторой удаленной точки методом параллакса?
4. Что такое горизонтальный параллакс?
5. Как определить расстояние от Земли до некоторой планеты, используя горизонтальный параллакс?

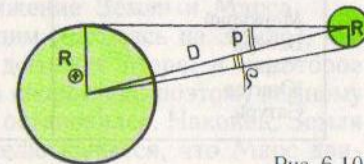


Рис. 6.10

6. Что такое годичный параллакс?
7. Как определить расстояние до некоторого светила, используя годичный параллакс?
8. Как определить диаметр планеты, если известен угол, под которым виден ее радиус (или диаметр)?

Упражнения

1. Горизонтальный параллакс Солнца равен $8''$, угловой радиус Солнца равен $16'$. Принимая радиус Земли равным 6378 км, определите: а) среднее расстояние от Солнца до Земли; б) во сколько раз радиус Солнца больше радиуса Земли.
2. В таблице представлены горизонтальные параллаксы и видимые угловые размеры некоторых планет (в угловых секундах). Определите средние радиусы этих планет.

Планета	Горизонтальный параллакс, p	Максимальный угловой размер, 2ρ
Меркурий	17,1	13
Венера	34,3	66
Марс	24,5	26
Юпитер	2,23	50
Сатурн	1,11	21

3. Зная годичные параллаксы Проксима Центавра ($0,76''$) и Веги ($0,12''$), определите расстояния от них до Солнца в парсеках, астрономических единицах и километрах.
4. Годичный параллакс Сириуса равен $0,38''$. Какая из звезд ближе к Солнцу — Проксима Центавра, Сириус или Вега? Во сколько раз?

§ 6.6. ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

1. В VII классе, рассматривая принцип относительности движения, мы пришли к выводу, что характер движения тела существенно зависит от того, что принято за тело отсчета. Рассматривая движение планет на небесной сфере, мы в качестве тела отсчета принимаем Землю. Тем самым фактически используется *геоцентрическая система*, центром которой является Земля. Но можно в качестве тела отсчета принять Солнце, и мы получим *гелиоцентрическую систему*.

Так как в VII классе были подробно рассмотрены особенности обеих систем отсчета, то здесь мы ограничимся лишь повторением основных идей.

II. Существенной трудностью в геоцентрической системе Аристотеля — Птолемея явилось объяснение сложного, петлеобразного движения планет. Это удалось сделать, введя довольно сложную систему деферентов и эпициклов. Птолемей предположил, что в отличие от Луны, Солнца и неподвижных звезд, которые обращаются вокруг Земли, планеты движутся по окружности — эпициклам, а центры этих эпициклов движутся вокруг Земли по орбитам — деферентам. Подобрав радиусы эпициклов и деферентов, углы между плоскостями этих орбит и периоды обращения, Птолемей смог довольно точно для того времени описать движение планет и других небесных тел, а также дать методы расчета солнечных и лунных затмений и т. д.

В гелиоцентрической системе Н. Коперника телом отсчета служит Солнце, а Земля оказывается рядовой планетой, которая обращается вокруг Солнца так же, как и другие планеты. Вокруг Земли обращается небесное тело — ее спутник Луна.

Петлеобразное движение планет в теории Коперника объясняется очень просто. Дело в том, что периоды обращения планет и их расстояния до Солнца различны, вследствие чего различны и скорости их движения. Сравним, к примеру, движение Земли и Марса.

Пока Земля догоняет Марс, мы видим (находясь на Земле), что Марс движется вперед. Затем Земля догоняет Марс, и некоторое время они движутся почти с одинаковой скоростью, поэтому земному наблюдателю кажется, что Марс как бы остановился. Наконец, Земля перегоняет Марс, а земному наблюдателю кажется, что Марс движется назад. А поскольку Земля и Марс движутся вокруг Солнца по замкнутым орбитам, то эти явления периодически повторяются.

Ситуация здесь такая же, как в случае, когда пассажирский поезд догоняет, а затем перегоняет товарный состав и пассажиру кажется, что товарные вагоны стали двигаться назад. Точно такой же эффект наблюдается, когда легковой автомобиль перегоняет медленно движущуюся грузовую машину.

III. Хотя теория Коперника была существенным шагом вперед по сравнению со взглядом Аристотеля — Птолемея, но в ней был один существенный недостаток. Следуя взглядам древних, Н. Коперник полагал, что планеты обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам, двигаясь с постоянной по модулю скоростью. Оказалось, что это не так. Истинные законы движения планет установил в 1609—1619 гг. И. Кеплер.

Используя многолетние наблюдения Тихо Браге за движением планет, особенно Марса, и свои собственные наблюдения, И. Кеплер установил три закона движения планет. Затем он доказал, что эти законы справедливы также для Луны и четырех известных в то время спутников Юпитера, открытых Г. Галилеем в 1610 г. Дальнейшие исследования показали, что законы Кеплера справедливы для всех небесных тел.

Для того чтобы сформулировать законы Кеплера, нам придется рассмотреть некоторые геометрические понятия.

IV. Представим себе прямой круговой конус (рис. 6.11). Его вершину обозначим S , ось симметрии — SD , образующую — SK . Если провести сечение поверхности конуса плоскостью, образующей некоторый угол с осью симметрии, например плоскостью AA_1 , то в сечении получится замкнутая кривая линия, напоминающая вытянутую окружность — *эллипс*. Если провести сечение параллельно образующей SK_1 , то мы получим разомкнутую кривую — *параболу*. Наконец, если провести сечение параллельно оси симметрии SD , то мы получим также разомкнутую кривую, но несколько другой формы — *гиперболу*.

Эти три конических сечения были известны еще древнегреческим математикам. Их теорию построил Аполлоний Пергский во II в. до н. э. Рассмотрим более подробно свойства эллипса.

У эллипса имеется центр симметрии O (рис. 6.12) и две оси симметрии: большая ось $AA_1=2a$ и малая ось $BB_1=2b$. На расстоянии

$OF_1=OF_2=c=\sqrt{a^2-b^2}$ от центра находятся два фокуса F_1 и F_2 . Основное свойство эллипса заключается в том, что сумма расстояний от произвольной точки M до обоих фокусов есть величина постоянная, равная длине большой оси: $MF_1+MF_2=2a$. Это позволяет построить эллипс следующим образом. Вбейте два гвоздика в точки, принятые за фокусы. Свяжите в кольцо нить длиной $2a+2c$ и накиньте ее на гвоздики. Карандаш, натягивающий нить (рис. 6.13), опишет эллипс.

Отношение $e=c/a$ называется эксцентриситетом. Он характеризует степень вытянутости эллипса. Окружность можно рассматривать как предельный случай эллипса, у которого обе оси равны, т. е. $a=b=r$. Расстояние между фокусами равно нулю, и оба они расположены в центре, т. е. $c=0$, следовательно, и эксцентриситет окружности равен нулю.

V. В 1609 г. и 1619 г. И. Кеплер установил три закона небесной механики.

Первый закон Кеплера: *все планеты обращаются вокруг Солнца по эллипсам; в одном из фокусов находится Солнце.*

В дальнейшем было доказано, что этот закон применим не только к планетам, но и к их спутникам, а также к двойным звездам. Кометы же и метеориты могут двигаться по параболическим и гиперболическим траекториям. Это позволяет дать более общую формулировку закона движения небесных тел: *все небесные тела движутся по траекториям, которые являются коническими сечениями.*

Заметим, что ближайшая к Солнцу точка орбиты называется *перигелием* (слово «перигелий» образовано от греческих слов $peri$ — около и $helios$ — Солнце), а наиболее удаленная точка называется *афелием* (слово «афелий» образовано от греческих слов apo — вдали и $helios$ — Солнце). Кстати, кратчайшее расстояние от Луны или искусственного спутника до Земли называется *перигеем*, а наибольшее — *апогеем*.

Рис. 6.11

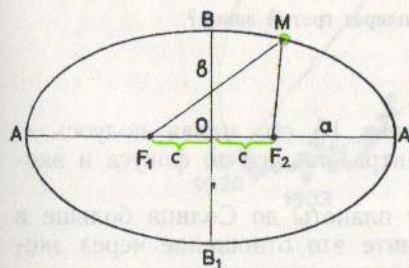
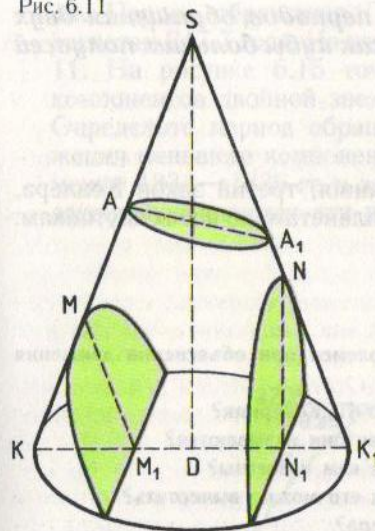


Рис. 6.12

Рис. 6.13

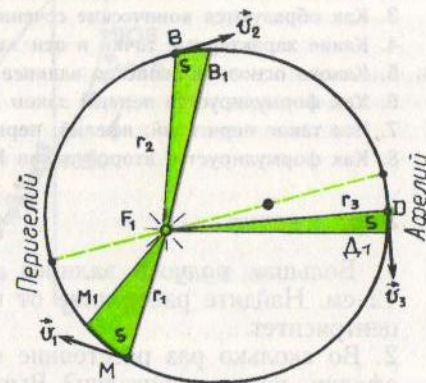
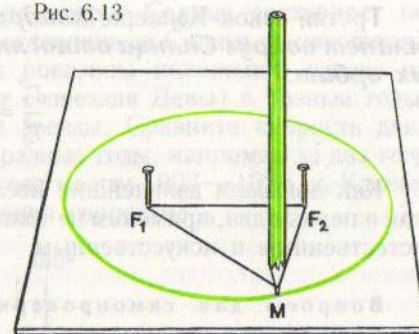


Рис. 6.14

Второй закон Кеплера: *радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.*

Это показано на рисунке 6.14. Здесь площади секторов F_1MM_1 , F_1BB_1 и F_1DD_1 равны. Чем меньше радиус-вектор r , тем больше длина дуги, следовательно, больше орбитальная скорость движения планеты \vec{v} . С наибольшей скоростью планета движется в перигелии, с наименьшей — в афелии.

Заметим, что это полностью соответствует закону сохранения энергии. При удалении планеты от Солнца ее потенциальная энергия возрастает, а кинетическая убывает, и скорость движения уменьшается. Наоборот, при приближении планеты к Солнцу ее потенциальная энергия уменьшается, соответственно растет кинетическая энергия, а значит, и скорость орбитального движения. Однако ни И. Кеплер, ни И. Ньютон знать этого не могли. Закон сохранения энергии был открыт значительно позже, в середине XIX столетия.

Третий закон Кеплера: *квадраты периодов обращения двух планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит:*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Как показали дальнейшие исследования, третий закон Кеплера, как и первые два, применим не только к планетам, но и к их спутникам: естественным и искусственным.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состояли трудности системы Птолемея при объяснении движения планет? Как он обошел эти трудности?
2. Как объяснил странное движение планет Н. Коперник?
3. Как образуются конические сечения? Как они называются?
4. Какие характерные точки и оси эллипса вам известны?
5. Каково основное свойство эллипса? Как его можно вычертить?
6. Как формулируется первый закон Кеплера?
7. Что такое перигелий; афелий; перигей; апогей?
8. Как формулируется второй закон Кеплера; третий закон?

Упражнения

1. Большая полуось эллипса равна 15 см, малая полуось — 12 см. Найдите расстояние от центра эллипса до фокуса и эксцентриситет.
2. Во сколько раз расстояние от планеты до Солнца больше в афелии, чем в перигелии? Выразите это отношение через эксцентриситет.
3. Эксцентриситет орбиты Земли равен 0,0167. Сравните расстояние от Земли до Солнца в афелии и перигелии.
4. Решите эту же задачу для Венеры, эксцентриситет орбиты у которой равен 0,0068.
5. Во сколько раз орбитальная скорость движения планеты в афелии меньше, чем в перигелии? Выразите отношение скоростей через эксцентриситет орбиты.
6. Эксцентриситет орбиты Марса равен 0,093. Найдите отношение скоростей движения Марса в афелии и перигелии.
7. За 84 земных года Уран делает один оборот вокруг Солнца. Во сколько раз он дальше от Солнца, чем Земля?
8. Расстояние от Луны до Земли составляет 384 400 км, период ее обращения вокруг Земли составляет 27,3 сут. Каков период обращения вокруг Земли искусственного спутника, находящегося на высоте 600 км от поверхности Земли?
9. Радиолокационными методами установлено, что кратчайшее расстояние между Землей и Венерой равно 0,28 а.е. Каков период обращения Венеры вокруг Солнца?

10. Период обращения Плутона вокруг Солнца составляет по расчетам 247,7 года. На каком расстоянии от Солнца он находится?

11. На рисунке 6.15 точками показаны положения одного из компонентов двойной звезды (γ созвездия Девы) в разные годы. Определите период обращения звезды. Сравните скорость движения меньшего компонента в разные годы, например за два года между 1834—1836 гг. и за 23 года между 1903—1926 гг. Какому закону подчиняются эти изменения скорости?

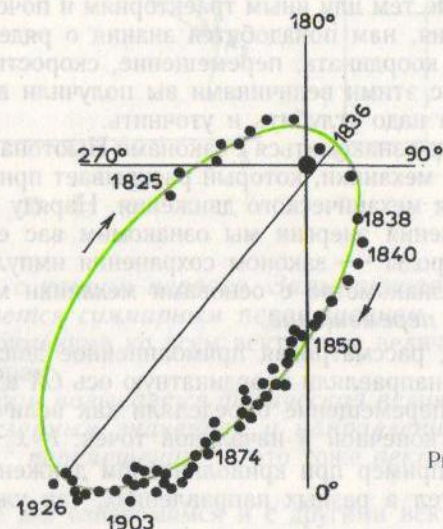


Рис. 6.15

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

6.1. В ясную ночь найдите на небесной сфере следующие созвездия: Большую Медведицу, Малую Медведицу и Полярную звезду. Зарисуйте положения звезд через каждый час и определите, когда происходит верхняя кульминация звезды, находящейся в конце хвоста Большой Медведицы.

6.2. К плоской доске размером с бумажный лист прикрепите чистый лист бумаги и в центре вбейте гвоздь длиной 20—30 мм. В ясный солнечный день расположите доску горизонтально у окна, выходящего на юг (или выйдите на улицу). На бумаге вы увидите четкую тень гвоздя.

Начиная примерно с 11 до 14 ч каждые 15—20 мин отмечайте положение и длину тени. Вы увидите, что длина тени сперва уменьшается, затем увеличивается. Минимальную длину тень имеет в момент истинного полдня, т. е. когда Солнце находится в верхней кульминации. Отметьте этот момент времени и сравните с показаниями ваших часов. Чем объясняется расхождение между показаниями часов и моментом истинного полдня?

Глава 7. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

§ 7.1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ — ВЕКТОР

I. Для того чтобы ответить на вопросы, почему тела (например, планеты) движутся по тем или иным траекториям и почему меняется скорость их движения, нам понадобятся знания о ряде физических величин, таких, как координата, перемещение, скорость, сила и др. Первое знакомство с этими величинами вы получили в VII классе, однако эти сведения надо углубить и уточнить.

Необходимо также ознакомиться с законами Ньютона, в частности с основным законом механики, который раскрывает причину любого изменения состояния механического движения. Наряду с известным вам законом сохранения энергии мы ознакомим вас еще с одним общим законом природы — законом сохранения импульса.

Более глубокое знакомство с основами механики мы начнем с обобщения понятия *перемещение*.

II. В VII классе, рассматривая прямолинейное движение материальной точки, мы направляли координатную ось Ox вдоль направления движения, а перемещение определяли как величину, равную разности координат конечной и начальной точек: $l = x_2 - x_1$. Однако в общем случае, например при криволинейном движении или движении нескольких тел в разных направлениях, так уже поступать нельзя.

В качестве примера рассмотрим движение тела (материальной точки) по *криволинейной траектории*, лежащей в плоскости HOY (рис. 7.1). Пусть в момент времени t_1 тело находилось в точке A_1 , в момент времени t_2 — в точке A_2 и в момент времени t_3 — в точке A_3 .

Перемещением за время $\tau_1 = t_2 - t_1$ называется направленный отрезок прямой $\overrightarrow{A_1A_2} = \vec{l}_1$, за время $\tau_2 = t_3 - t_2$ — отрезок $\overrightarrow{A_2A_3} = \vec{l}_2$.

Переместиться из точки A_1 в точку A_3 можно либо непосредственно по отрезку $\overrightarrow{A_1A_3}$, либо сначала из точки A_1 в точку A_2 , а затем из точки A_2 в точку A_3 . Мы можем рассматривать перемещение $\overrightarrow{A_1A_3} = \vec{l}$, за время $\tau = t_3 - t_1$ как сумму перемещений

$$\vec{l} = \vec{l}_1 + \vec{l}_2.$$

III. Видно, что перемещения складываются не так, как числа, а по другому закону — по *правилу треугольника*: чтобы сложить два перемещения, следует начало второго перемещения со-

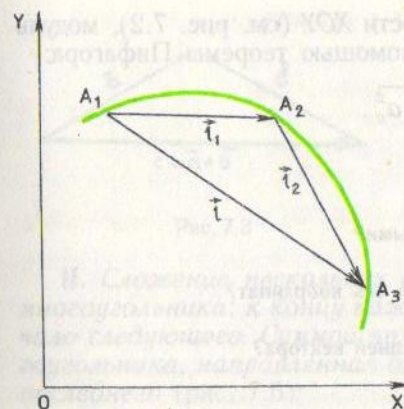


Рис. 7.1

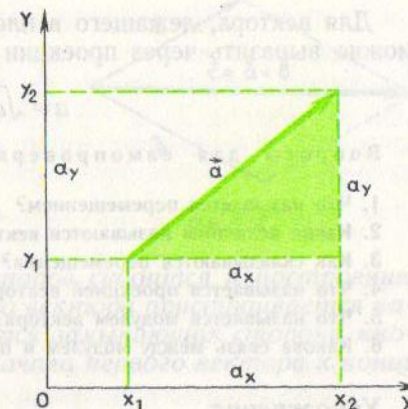


Рис. 7.2

вместить с концом первого. Замыкающая сторона треугольника является суммарным перемещением. Оказывается, что это правило применимо ко всем векторным величинам, или, короче, ко всем векторам.

Вектором называется физическая величина, характеризующаяся численным значением и направлением в пространстве. Как видно, *перемещение* — это тоже векторная физическая величина.

Дальше мы ознакомимся и с другими векторными физическими величинами.

Скаляром называется физическая величина, характеризующаяся только численным значением. Скалярами являются время, масса, плотность, температура, энергия, электрический заряд, сила тока, напряжение и др.

IV. Векторную величину в любой системе координат изображают в виде направленного отрезка (рис. 7.2). Чтобы отличить векторную физическую величину от скалярной, над ее обозначением сверху пишут стрелку, например \vec{l} , \vec{a} , \vec{b} .

Длина отрезка, изображающего вектор (в определенном масштабе), называется модулем. Обозначается модуль символом $|\vec{a}|$ или просто a . Модуль — *положительная величина*. Отрезок, определяемый разностью проекций координат конца и начала вектора на некоторую ось (см. рис. 7.2) называется *проекцией вектора на эту ось*:

$$a_x = x_2 - x_1, \\ a_y = y_2 - y_1.$$

В зависимости от направления вектора его проекция может быть как положительной, так и отрицательной.

Для вектора, лежащего в плоскости $ХОУ$ (см. рис. 7.2), модуль можно выразить через проекции с помощью теоремы Пифагора:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Что называется перемещением?
2. Какие величины называются векторными?
3. Как складываются перемещения?
4. Что называется проекцией вектора на ось координат?
5. Что называется модулем вектора?
6. Какова связь между модулем и проекцией вектора?

Упражнения

1. Лодка плывет поперек реки шириной 50 м. Течением реки лодку сносит под углом 30° к берегу. Определите перемещение лодки вдоль реки и ее результирующее перемещение с берега на берег.
2. Самолет пролетает между пунктами A и B расстояние 60 км. При этом направление его перемещения находится под углом 60° к направлению ветра, под углом 30° к направлению перемещения под действием двигателя. Определите проекции перемещения на оба указанных направления, если они перпендикулярны друг другу.
3. Каково перемещение груза над строительной площадкой, если кран перемещается с юга на север на 30 м и одновременно груз перемещается вдоль стрелы крана в направлении с востока на запад на 10 м?
4. Координаты начала вектора равны $x_1=12$ см, $y_1=5$ см, конца $x_2=4$ см, $y_2=11$ см. Постройте этот вектор и найдите его проекции на оси координат и модуль.
5. Начало вектора находится в начале координат, а координаты его конца равны $x=3$ м, $y=5$ м и $z=8$ м. Определите модуль этого вектора.

§ 7.2. ДЕЙСТВИЯ НАД ВЕКТОРАМИ

1. На примере сложения перемещений мы фактически установили правило сложения векторов — правило треугольника: к концу первого вектора прикладывается начало второго, третья сторона треугольника дает сумму векторов (рис. 7.3).

Иногда для сложения векторов пользуются правилом параллелограмма (рис. 7.4). Как видно на рисунке, слагаемые векторы являются сторонами параллелограмма. Результирующий вектор — его диагональ. Таким образом, описанные два правила сложения векторов приводят к одному и тому же результату.

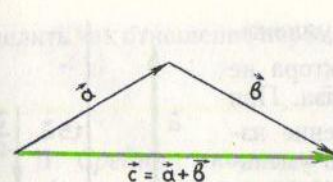


Рис. 7.3

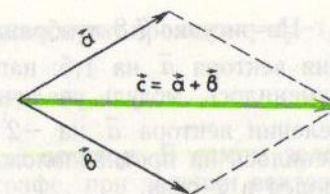


Рис. 7.4

II. Сложение нескольких векторов сводится к построению многоугольника: к концу каждого вектора приставляется начало следующего. Суммой является замыкающая сторона многоугольника, направленная от начала первого вектора к концу последнего (рис. 7.5):

$$\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3 + \vec{a}_4 + \vec{a}_5.$$

III. Вектором, противоположным вектору \vec{b} , называется вектор, у которого модуль равен модулю исходного вектора, но направление противоположное (рис. 7.6): $\vec{c} = -\vec{b}$.

Отсюда следует правило вычитания векторов (рис. 7.7): чтобы вычесть из вектора \vec{a} вектор \vec{b} , надо к вектору \vec{a} прибавить вектор, противоположный вектору \vec{b} :

$$\vec{f} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

IV. Вектор можно умножить (и разделить) на скаляр. При этом модуль вектора соответственно умножается (делится) на данное число, а направление результирующего вектора определяется знаком множителя (делителя): если множитель положительный, то направление вектора сохраняется; если множитель отрицательный, то направление вектора меняется на противоположное.

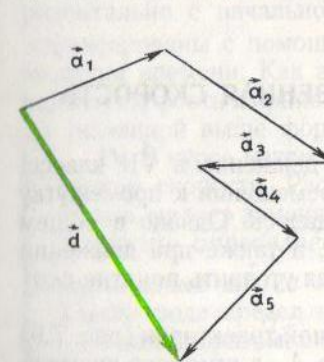


Рис. 7.5

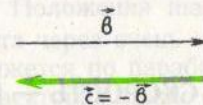


Рис. 7.6

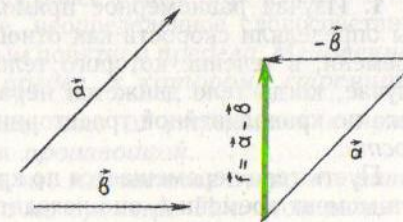
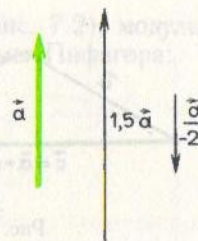


Рис. 7.7

На рисунке 7.8 изображен результат умножения вектора \vec{a} на 1,5: направление вектора не изменилось, модуль увеличился в 1,5 раза. При делении вектора \vec{a} на -2 его направление изменилось на противоположное, а модуль уменьшился в 2 раза.



Вопросы для самопроверки

1. Как складываются два вектора; несколько векторов?
2. Какой вектор называется противоположным данному?
3. Как вычесть из одного вектора другой?
4. Какой получается результат при умножении вектора на число?
5. Какой получается результат при делении вектора на число?

Рис. 7.8

Упражнения

1. Для чисел справедлив коммутативный закон сложения: от изменения порядка слагаемых сумма не меняется. Докажите, что этот закон справедлив и для векторов.
2. Докажите, что сумма вектора с противоположным ему вектором равна нулю.
3. Три равных по модулю вектора, лежащие в одной плоскости, расположены под углом 120° друг к другу. Докажите, что их сумма равна нулю.
4. Два равных по модулю вектора расположены под углом 60° друг к другу. Найдите модуль их суммы.
5. Два равных по модулю вектора расположены под углом 60° друг к другу. Докажите, что модуль их разности равен модулю каждого из них.
6. Докажите, что вектор $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ противоположен вектору $\vec{d} = \vec{b} - \vec{a}$.

§ 7.3. СКОРОСТЬ — ВЕКТОР. МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ

I. Изучая равномерное прямолинейное движение в VII классе, вы определяли скорость как отношение перемещения к промежутку времени, в течение которого тело перемещалось. Однако в общем случае, когда тело движется неравномерно, а также при движении тела по криволинейной траектории, требуется уточнить понятие *скорость*.

Пусть тело перемещается по криволинейной траектории (рис. 7.9) и в момент времени t_1 оно находится в точке A_1 , а в момент времени t_2 — в точке A_2 . Среднюю скорость на этом участке можно опре-

делить как отношение перемещения \vec{l} к промежутку времени $\tau = t_2 - t_1$:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{l}}{\tau} = \frac{\vec{l}}{t_2 - t_1}.$$

II. *Средняя скорость на участке — вектор.* В самом деле, как было показано в предыдущем параграфе, при делении вектора \vec{l}_1 на скаляр $\tau = t_2 - t_1$ мы получим вектор $\vec{v}_{1\text{ср}}$, направление которого совпадает с направлением вектора перемещения \vec{l}_1 .

Если мы вычислим среднюю скорость на другом участке, например на участке A_2A_3 , то получим другое значение средней скорости $\vec{v}_{2\text{ср}}$, которое отличается от $\vec{v}_{1\text{ср}}$ как по модулю, так и по направлению (см. рис. 7.9). Еще одно значение средней скорости как по модулю, так и по направлению мы получим на участке A_1A_3 (см. рис. 7.9).

III. До сих пор мы характеризовали движение только средней скоростью, которая равна отношению перемещения ко времени. Чтобы исследовать закономерности движения и управлять движением какого-либо тела, необходимо знать скорость его движения в каждой точке траектории, или, что то же самое, в каждый момент времени. Такая скорость называется *мгновенной*. В особенности важно уметь определять мгновенную скорость движения тела, когда скорость движения меняется как по модулю, так и по направлению.

Для определения мгновенной скорости движения тела в некоторой точке нужно измерить перемещение за такой малый промежуток времени Δt , за который можно считать скорость практически неизменной. Поэтому можно дать определение: *мгновенная скорость равна отношению очень малого перемещения к промежутку времени Δt , за которое оно совершилось*:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{l}}{\Delta t}.$$

На рисунке 7.10 представлено движение шарика, брошенного горизонтально с начальной скоростью v_0 . Положения шарика были зафиксированы с помощью вспышек света через очень малые промежутки времени. Как видим, шарик движется по параболе. Мгновенную скорость шарика в любой точке траектории можно определить по указанной выше формуле.

IV. В курсе математики дается более точное определение мгновенной скорости. Расплывчатое, неопределенное словосочетание «очень малое» заменяется точным понятием *предела*. Мгновенная скорость определяется как предел, к которому стремится отношение $\Delta \vec{l} / \Delta t$ при условии, что Δt стремится к нулю. Такого рода предел называется *производной*.

Таким образом, оказывается, что *мгновенная скорость равна производной от перемещения по времени*. При этом вводятся такие обозначения:

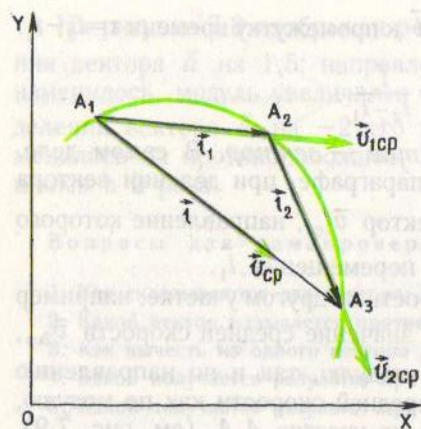


Рис. 7.9

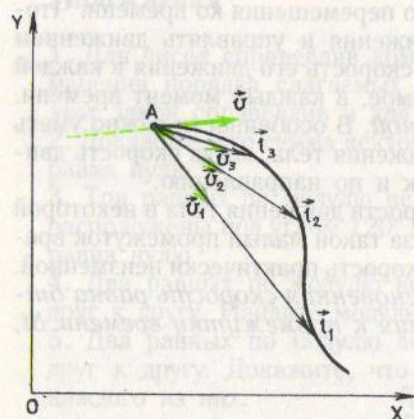


Рис. 7.11

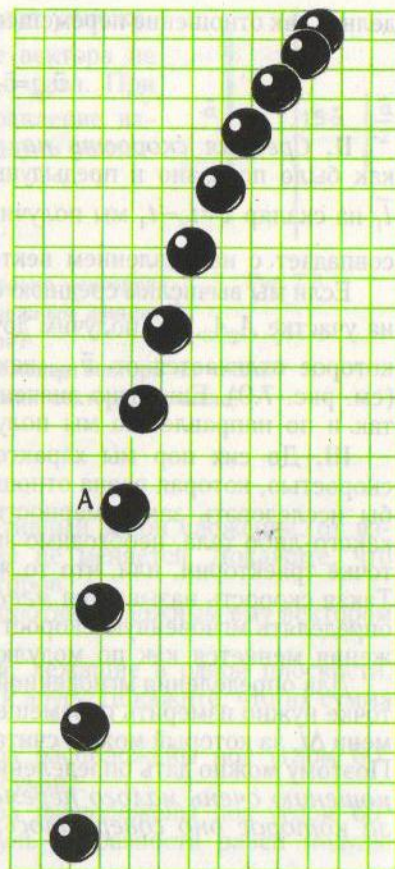


Рис. 7.10

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \vec{r}'$$

Обозначение \lim следует читать как предел. (Слово «предел» образовано от латинских слов *limes* и *limitis* — граница, предел.) В X классе вы изучите подробно понятие производной и научитесь находить производные различных функций.

V. Мгновенная скорость — величина векторная. Направление мгновенной скорости совпадает с направлением малого перемещения в данной точке. В случае прямолинейного движения вектор мгновенной скорости совпадает с траекторией движения. В случае криволинейного движения вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории в данной точке.

В этом легко убедиться, представив криволинейную траекторию

в виде суммы малых перемещений $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3$ (рис. 7.11). Если мысленно брать векторы перемещений за все более убывающие промежутки времени, то в пределе направление вектора средней скорости будет приближаться к касательной, проведенной к траектории. Так как мгновенная скорость равна отношению малого перемещения к соответствующему промежутку времени, то и она будет направлена по касательной к траектории.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется мгновенной скоростью?
2. В чем сходство и различие между средней скоростью и мгновенной?
3. Как соотносятся значения средней скорости тела и мгновенной в любой точке траектории, если движение равномерное и прямолинейное?

Упражнения

1. Определите мгновенную скорость шарика в точке A по рисунку 7.10, если вспышки следуют через 0,04 с. Масштаб 1 дел. на рисунке соответствует 4,0 см в натуре.
2. Материальная точка движется по окружности. Как направлен вектор мгновенной скорости в любой точке траектории?
3. Как направлен вектор скорости планеты в перигелии; в афелии?
4. Как направлен вектор скорости Луны в перигее; в апогее?

§ 7.4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА

1. Для того чтобы описать движение какого-либо тела, надо другое тело условно принять за неподвижное и относительно его рассматривать движение данного тела. Тело, которое принято за неподвижное, называется телом отсчета. Так, в геоцентрической системе телом отсчета является Земля, в гелиоцентрической системе — Солнце.

Для описания движения тела (а точнее, материальной точки) нам нужно ввести систему координат, а также установить систему синхронизированных часов, т. е. часов, показывающих одно и то же время. (Слово «синхронизация» образовано от греческих слов *syn* — вместе и *chronos* — время.) Синхронизация часов обычно осуществляется с помощью радиосигналов (сигналов точного времени).

Тело отсчета, связанная с ним система координат и совокупность синхронизированных часов называются системой отсчета.

Говоря в дальнейшем о движении тела, мы будем подразумевать, что система отсчета уже выбрана и относительно этой системы отсчета рассматриваются траектория и координаты движущейся точки как функции времени, а также мгновенная скорость и др.

II. Наблюдения показывают, что тело, находящееся в покое относительно системы отсчета, само собой двигаться не начнет. На него должны подействовать другие тела. Однако, когда тело приведено в состояние движения с какой-то скоростью, встает вопрос: сохранится ли эта скорость, или она изменится со временем?

На Земле трудно избавиться от действия других тел на тело, которое нас интересует. В самом деле, на тело всегда действует притяжение Земли, т. е. сила тяжести. Кроме того, действуют силы трения, сопротивления воздуха, а если на теле есть еще и электрический заряд, то будут действовать электрические и магнитные поля. Следовательно, скорость тела будет меняться и тело будет или тормозиться, или, наоборот, ускоряться.

Еще более 300 лет тому назад Г. Галилей путем рассуждений пришел к выводу, что *если на тело не действуют другие тела* (т. е. не действуют силы), *то это тело движется прямолинейно и равномерно; его скорость не меняется ни по модулю, ни по направлению.*

С этим явлением — *явлением инерции* — вы уже познакомились в VII классе. **Закон инерции** был включен И. Ньютоном в основу механики, и потому этот закон называют **первым законом Ньютона**. В своей книге «Математические начала натуральной философии» (так тогда называли физику), которую И. Ньютон издал в 1687 г., в определении III он писал: «Всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения».

В настоящее время этот закон проверен экспериментально в космическом корабле, когда наступает состояние невесомости.

III. Обращаем ваше внимание на то, что приведенная выше формулировка первого закона Ньютона не является достаточно точной. Речь идет о том, что *скорость тела не меняется*. Но говорить о скорости можно только в том случае, когда указана система отсчета, относительно которой рассматривается движение тела. Встает вопрос: во всех ли системах отсчета выполняется закон инерции?

Существуют системы отсчета, где закон инерции не выполняется. Такие системы отсчета называются *неинерциальными*. Так, допустим, вы находитесь в вагоне, который резко тормозит. В этот момент вы чувствуете, что вас бросает вперед в направлении движения вагона. Следовательно, скорость вашего движения относительно вагона изменилась, хотя нет никаких сил, которые подтолкнули вас вперед. Таким образом, система отсчета, связанная с вагоном, у которого внезапно уменьшается скорость, а следовательно, *меняется и ваша скорость*, оказывается *неинерциальной системой отсчета*, т. е. относительно этой системы отсчета закон инерции (первый закон Ньютона) не выполняется.

Вспомним, как движутся все звезды на небесной сфере. За сутки они описывают концентрические окружности с центром, находящимся в Полюсе мира (вблизи Полярной звезды). Но ведь звезды находятся друг от друга на гигантских расстояниях и практически не взаимо-

действуют друг с другом и с какими-либо другими телами. И все же оказывается, что в системе отсчета, связанной с вращающейся вокруг своей оси Землей, звезды движутся не прямолинейно, а по окружности. Значит, геоцентрическая система является неинерциальной системой и в ней закон инерции вообще не выполняется.

IV. Встает вопрос: существуют ли все же системы отсчета, в которых закон инерции выполнялся бы? Одну такую систему отсчета вы знаете: это гелиоцентрическая система Коперника. В этой системе отсчета все тела, не взаимодействующие с другими телами, либо покоятся относительно тела отсчета (Солнца), либо движутся равномерно и прямолинейно. А если тело в этой системе отсчета движется неравномерно и непрямолинейно (например, планета), то всегда можно указать другое тело, с которым оно взаимодействует. Так, планеты взаимодействуют с Солнцем, а также друг с другом. Луна взаимодействует с Землей и т. д. К этому вопросу мы еще вернемся в § 7.13—7.15.

Итак, *существуют системы отсчета, в которых закон инерции выполняется*. Такие системы называются *инерциальными системами отсчета*. Это высказывание позволяет нам дать точную формулировку **первого закона Ньютона (закона инерции)**: *существуют системы отсчета, относительно которых все тела, не взаимодействующие с другими телами, находятся в состоянии покоя или движутся равномерно и прямолинейно.*

V. Понятие инерциальной системы отсчета является идеализацией. В самом деле, невозможно указать строго инерциальную систему отсчета, потому что любая система отсчета, как правило, обязательно связана с какими-нибудь телами (например, с телом отсчета), а все тела в природе в той или иной мере обязательно взаимодействуют друг с другом.

Поэтому следует указывать системы отсчета, которые надо считать инерциальными для данного круга рассматриваемых задач.

Так, существует ряд явлений, например механические, тепловые, электромагнитные, на которые практически не влияет вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Для этой совокупности явлений геоцентрическую систему с большой степенью точности можно считать инерциальной. Однако в астрономических наблюдениях, где суточное и годичное движение Земли играет принципиальную роль, геоцентрическую систему нельзя считать инерциальной. Практически строго инерциальной является гелиоцентрическая система.

VI. Оказалось, что все законы механики, а точнее все законы физики, имеют наиболее простой вид именно в инерциальных системах отсчета. Описание движения тел в неинерциальных системах отсчета оказывается более сложной задачей, и мы этим заниматься не будем. Поэтому в дальнейшем, формулируя законы механики и решая соответствующие задачи, мы будем понимать, что все это относится к явлениям в инерциальных системах отсчета. Специально оговариваться это уже не будем.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется телом отсчета?
2. Что представляет собой система отсчета?
3. Как формулировали закон инерции Г. Галилей и И. Ньютон? В чем недостаточная точность этой формулировки?
4. Какая система отсчета называется инерциальной?
5. Какова точная формулировка первого закона Ньютона?

Упражнения

1. Поезд (электричка) трогается с места и набирает скорость. Что при этом чувствуют пассажиры в вагонах? Является ли инерциальной та система отсчета, которая связана с одним из вагонов?
2. В вагоне поезда, который набирает скорость, на полу лежит кегельный шар. Сохранит ли он свое состояние покоя? Если нет, то как будет двигаться? Выполняется ли в этом вагоне закон инерции?
3. Докажите, что геоцентрическая система в общем случае не является инерциальной системой отсчета.

§ 7.5. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

I. После того как мы установили существование инерциальных систем отсчета, надо выяснить, сколько же таких систем отсчета вообще существует: одна или множество? Оказывается, что любая система отсчета, *движущаяся равномерно и прямолинейно относительно некоторой инерциальной системы отсчета, тоже является инерциальной.*

Действительно, пусть в некоторой системе отсчета на исследуемое тело не действуют никакие силы. Следовательно, это тело движется с постоянной скоростью, т. е. скорость тела не меняется ни по модулю, ни по направлению. В другой системе отсчета, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно, исследуемое тело будет двигаться с другой скоростью, но опять же с постоянной по модулю и направлению. Таким образом, обе эти системы в одинаковой мере инерциальны.

II. Впервые это установил Г. Галилей. Вот что он писал в своей книге «Диалог о двух важнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой» (1632): «Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-либо корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими и летающими насекомыми; пусть будет у вас там большой сосуд с водой с плавающими в нем маленькими рыбками; подвесьте, далее, наверху ведро, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, поставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения: рыбы, как

вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в поставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у вас не возникает никакого сомнения в том, что, когда корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так.

Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется корабль или стоит неподвижно. Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать больших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль движется, хотя за то время, что вы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку; и, бросая какую-нибудь вещь вашему товарищу, вы не должны будете бросать ее слишком сильно, когда он будет находиться на носу, а вы на корме, чем когда ваше взаимное положение будет обратным; капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя, пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей; рыбы в воде не с большим усилием будут плыть к передней, чем к задней, части судна... И причина согласованности всех этих явлений заключается в том, что движение корабля обще всем находящимся на нем предметам, так же как и воздуху...»

Эти рассуждения Г. Галилей использовал для того, чтобы объяснить противникам теории Коперника, почему мы не ощущаем движения Земли вокруг Солнца. Но при этом он установил весьма общий принцип, названный позднее **принципом относительности Галилея: во всех инерциальных системах отсчета законы механики одинаково справедливы**, или можно сказать короче: **все инерциальные системы отсчета равноправны.**

III. Из этих рассуждений и многих иных явлений следует, что никакой механический эксперимент не позволяет обнаружить движение инерциальной системы отсчета путем наблюдений, проведенных внутри этой системы. Значит, об абсолютном покое или абсолютном движении тел не может быть и речи. Можно говорить лишь об относительном движении тела в какой-либо инерциальной системе отсчета.

Из факта равноправия всех инерциальных систем следует, что **при одинаковых начальных условиях тела движутся совершенно одинаково в любых инерциальных системах отсчета.** Это есть одна из формулировок принципа относительности Галилея.

IV. В 1905 г. А. Эйнштейн пришел к выводу, что принцип относительности является одним из самых фундаментальных законов при-

роды, который применим не только к механическим, но и к тепловым, звуковым, электромагнитным, оптическим и другим явлениям. К аналогичному выводу пришел и А. Пуанкаре. Такое совпадение выводов позволило сформулировать общий закон, который был назван **принципом относительности Эйнштейна** и имел следующую формулировку: *во всех инерциальных системах отсчета все законы природы одинаковы*.

Этот принцип явился одной из основ современного физического миропонимания.

Вопросы для самопроверки

1. Сколько инерциальных систем отсчета существует? Как они связаны между собой?
2. Какими примерами Г. Галилей обосновывал одинаковый ход явлений в неподвижном и движущемся корабле?
3. Как формулируется принцип относительности Галилея?
4. Как формулируется принцип относительности Эйнштейна?

Упражнения

1. Вы находитесь в каюте корабля, который плывет по реке. Окна каюты закрыты. Можете ли вы с помощью какого-либо опыта определить, корабль плывет или стоит на месте?
2. Вот одно из опровержений принципа относительности. Находясь в вагоне, я выпустил из рук монету, и она упала на пол, двигаясь по вертикальной прямой. Мальчик, стоявший на перроне, увидел, что монета падала по криволинейной траектории — по параболе (рис. 7.12). Вагон двигался относительно перрона равномерно и прямолинейно, однако траектории в обеих системах отсчета ока-

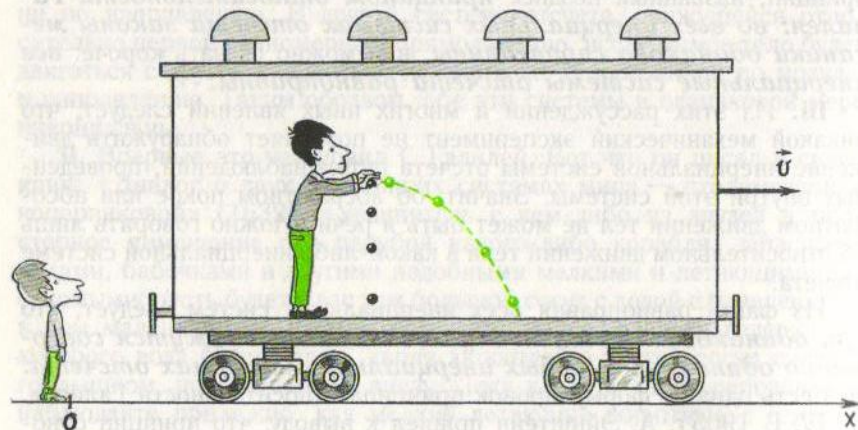


Рис. 7.12

зались разные. Выходит, что принцип относительности несправедлив. Где ошибка в данном рассуждении?

3. Скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца почти постоянная (см. § 6.7) и равна 30 км/с. Гелиоцентрическая система отсчета является инерциальной. Почему же геоцентрическая система отсчета неинерциальная?

§ 7.6. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

I. Из повседневного жизненного опыта вы знаете, что действие, которое может совершить движущееся тело, зависит от его массы и скорости. Так, например, если мяч, летящий с большой скоростью, футболист может остановить ногой или головой, то вагон, движущийся по рельсам даже очень медленно, человек не остановит. Теннисный мяч, попадая в человека, вреда не причиняет, однако пуля, которая меньше по массе, но движется с большой скоростью (600—800 м/с), оказывается смертельно опасной. Молотки разной массы могут оказать одинаковое действие на забиваемый гвоздь при условии, что скорость молотка с меньшей массой при ударе должна быть во столько раз больше, во сколько раз меньше массы другого молотка его масса. Таким образом, всякое движущееся тело можно характеризовать физической величиной, учитывающей как массу, так и скорость этого тела. Такую физическую величину назвали **импульсом тела** или **количеством движения**.

Импульсом тела называется произведение массы тела на скорость, с которой это тело движется: $\vec{p} = m\vec{v}$. Так как масса тела скалярная, а скорость — векторная величина, то импульс тела тоже является векторной величиной. Направление вектора импульса тела совпадает с направлением вектора скорости. Единица импульса тела $1 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

II. В VII классе был введен один из методов сравнения масс двух тел. Напомним его.

Пусть два тела сначала покоятся в данной инерциальной системе отсчета, а затем в результате какого-либо взаимодействия друг с другом они начинают двигаться в противоположных направлениях со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 7.13). Тогда по определению отношение их масс должно быть обратно пропорционально отношению модулей приобретенных скоростей: $m_1/m_2 = v_2/v_1$, из чего следует, что в процессе взаимодействия оба тела приобретают равные по модулю импульсы: $m_2 v_2 = m_1 v_1$ или $|\vec{p}_2| = |\vec{p}_1|$. Если же учесть, что эти импульсы как векторы направлены в противоположные стороны, то последняя запись в векторной форме будет выглядеть так: $\vec{p}_2 = -\vec{p}_1$. И следовательно $\vec{p}_2 + \vec{p}_1 = 0$. Проанализируем этот результат подробнее.

III. Прежде всего учтем, что в нашем примере мы рассмотрели взаимодействие двух тел только друг с другом. Так поступают только

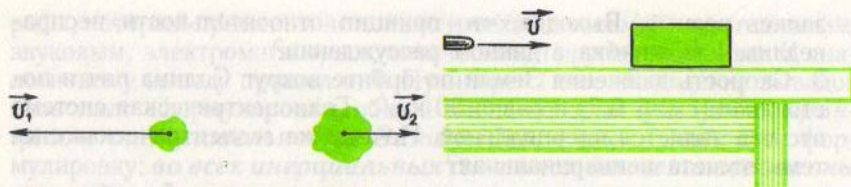


Рис. 7.13

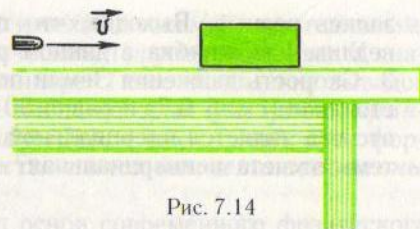


Рис. 7.14

в том случае, если можно пренебречь побочными эффектами. Кроме того, надо вспомнить понятие «замкнутая система тел».

Систему тел считают замкнутой, если внешними взаимодействиями по сравнению с внутренними в ней можно пренебречь. В опыте VII класса, который упоминается выше, система двух тел, взаимодействующих друг с другом, с хорошей степенью точности рассматривалась как замкнутая система. Надо обратить внимание и на то, что до взаимодействия оба тела покоились: импульс каждого из них был равен нулю. После взаимодействия импульсы тел изменились, но суммарный импульс всей системы все равно остался равным нулю.

Мы приходим к очень важному выводу: **суммарный импульс замкнутой системы в результате происходящих внутри системы взаимодействий не меняется.** Это один из основных законов природы, называемый **законом сохранения импульса.** Справедливость этого закона подтверждается всей совокупностью физических знаний.

IV. Сформулированный вывод получили из анализа поведения двух тел, покоившихся до взаимодействия. Оказывается, что этот вывод является совершенно общим, справедливым для любой замкнутой системы, состоящей из произвольного числа тел, взаимодействующих друг с другом произвольным образом. *Каковы бы ни были импульсы этих тел до взаимодействия и как бы они ни изменились в результате взаимодействия, их суммарный импульс при этом не меняется.*

Далее мы докажем, что закон сохранения импульса связан с законами Ньютона.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется импульсом тела?
2. Является ли импульс тела векторной или скалярной величиной?
3. Какая система тел называется замкнутой?
4. Как формулируется закон сохранения импульса?

Упражнения

1. Определите импульс спутника Земли, обращающегося вокруг нее со скоростью 8 км/с. Масса спутника равна 3 т.
2. Снаряд массой 120 кг вылетает из канала ствола со скоростью

800 м/с. С какой скоростью откатилась бы назад пушка массой 2 т, если бы у нее не было противооткатного устройства?

3. На скользком столе лежит брусок массой 600 г. Пуля массой 9,0 г, летящая со скоростью 500 м/с параллельно поверхности стола, попадает в брусок и застревает в нем (рис. 7.14). С какой скоростью станет двигаться брусок?

4. Железнодорожный вагон массой 60 т движется со скоростью 2,0 м/с и сцепляется с неподвижным вагоном, масса которого 30 т. Какова скорость вагонов после сцепки? Участок пути прямолинейный. (Трением пренебречь.)

5. Мальчик катится на скейтборде со скоростью 3,0 м/с. Масса мальчика и скейтборда равна 55 кг. Его догоняет девочка массой 30 кг, движущаяся со скоростью 5,0 м/с, и прыгает на скейтборд. Какова скорость их движения на скейтборде после прыжка девочки?

6. Хоккеист массой 50 кг движется со скоростью 8 м/с и ударяет клюшкой в направлении своего движения по шайбе массой 0,5 кг. После удара шайба движется со скоростью 100 м/с. Какова скорость хоккеиста после удара клюшкой?

§ 7.7. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

I. На основе закона сохранения импульса можно объяснить движение ракеты. Устройство ракет и реактивных двигателей мы рассмотрели в VIII классе. Выясним теперь, как ракету можно запустить, затормозить, изменить направление ее движения.

Независимо от конструкции всякая ракета состоит из двух частей: оболочки и топлива с окислителем. В твердотопливной ракете используются специальные сорта пороха, в жидкотопливной ракете в качестве топлива используются горючие жидкости (например, керосин, жидкий водород), а в качестве окислителя — чаще всего жидкий кислород. Оболочка ракеты имеет выходное сопло, представляющее собой одно или несколько отверстий специальной формы. Из этих отверстий вытекают продукты сгорания, основой которых является газ с высоким давлением и высокой температурой, вырывающийся из сопла с огромной скоростью: до 4 км/с.

На рисунке 7.15 изображена трехступенчатая космическая ракета. Здесь 1 — жидкостный реактивный двигатель; 2 — бак горючего; 3 — бак окислителя; 4 — приборный отсек с системой управления. Последняя ступень несет полезный груз 5 (космический корабль) и головной обтекатель 6. Все три ступени в принципе одинаковые, но мощности двигателей у них разные.

II. Рассмотрим, как производится запуск ракеты. В реактивный двигатель первой ступени подаются жидкое топливо и окислитель. Продукты сгорания, образующиеся после поджигания смеси, вырываются с большой скоростью из сопла. Для простоты расчета предположим, что все топливо выгорело сразу и продукты сгорания при-

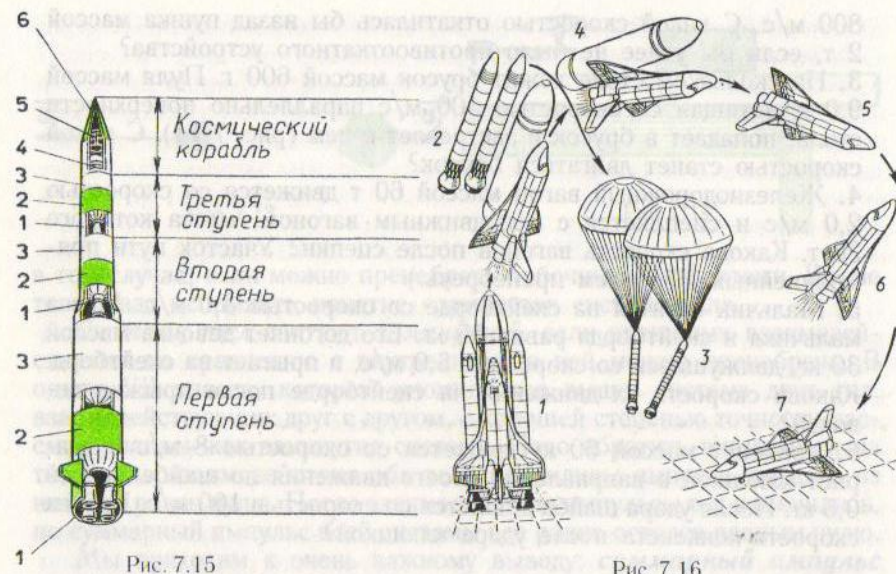


Рис. 7.15

Рис. 7.16

обрели импульс $\vec{p}_T = m\vec{u}$, где m — масса сгоревшего топлива вместе с окислителем, \vec{u} — скорость истечения газов.

Оболочка ракеты и продукты сгорания образуют практически замкнутую систему. Следовательно, оболочка вместе со второй и третьей ступенями приобретает импульс $\vec{p} = -\vec{p}_T = M\vec{v}$, где M — масса оболочки и всех остальных частей ракеты, \vec{v} — их скорость. Итак, оставшаяся часть ракеты будет двигаться со скоростью $\vec{v} = -m\vec{u}/M$ в направлении, противоположном направлению истечения продуктов сгорания.

III. После того как полностью сгорит топливо первой ступени и расходуется окислитель, баки горючего и окислителя этой ступени превращаются в лишний балласт. Поэтому они автоматически отбрасываются, и дальше разгоняется уже меньшая масса M_1 , которая равна сумме масс второй и третьей ступеней. Уменьшение массы позволяет получить существенную экономию топлива и окислителя во второй ступени и увеличить ее скорость.

Вторую ступень постигает та же участь, что и первую. После выгорания в ней топлива и окислителя она также отбрасывается. При этом оставшаяся часть ракеты, равная массе M_2 , приобретает еще большую скорость.

Если не планируется возвращение космического корабля на Землю, то третью ступень также используют для того, чтобы сообщить кораблю дополнительную скорость. Если же космический корабль должен вернуться на Землю, то перед спуском его надо затормозить (иначе он может сгореть при вхождении в атмосферу). Для тормо-

жения ракету разворачивают на 180° , сопло оказывается впереди, и вытекающие из сопла продукты сгорания сообщают космическому кораблю импульс, направленный против скорости его движения, что и приводит к уменьшению скорости, а следовательно, и к торможению ракеты.

На рисунке 7.16 изображена схема полета многоразового американского космического корабля «Спейс Шаттл», где 1 — запуск корабля; 2 — отделение ступеней (первая ступень); 3 — парашютная посадка ускорителей; 4 — отделение топливного бака; 5 — орбитальный полет; 6 — разворот и торможение корабля перед входом в атмосферу; 7 — посадка на космодром. Аналогично осуществляется полет многоразового космического корабля «Буран».

IV. Впервые идею использования ракет для космических полетов выдвинул в начале XX столетия К. Э. Циолковский. Ему же принадлежит идея использования многоступенчатых ракет и ряд других важных принципов космонавтики. Однако лишь спустя полвека удалось реализовать мечту человечества о выходе в космическое пространство. Большую роль здесь сыграли работы С. П. Королева.

В нашей стране 4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли (ИСЗ), что явилось началом развития космонавтики. Через полгода, 2 февраля 1958 г., ИСЗ был запущен в США. Затем ИСЗ стали запускать Италия, Франция, Канада, ФРГ, Япония, Китай и Великобритания. В настоящее время ежегодно запускаются сотни ИСЗ для радиосвязи, телевидения, исследования атмосферы, фотографирования поверхности Земли и т. д.

V. На космическом корабле «Восток» 12 апреля 1961 г. полет вокруг Земли впервые осуществил космонавт Ю. А. Гагарин. С помощью корабля «Аполлон-11» американские астронавты Н. Армстронг и Э. Олдрин 16 июля 1969 г. впервые высадились на поверхности Луны. В настоящее время с помощью космических кораблей успешно исследуются планеты Солнечной системы. Российские межпланетные станции «Венера», «Марс», «Вера» и американские станции «Вояджер» и «Пионер» позволили исследовать атмосферу и поверхность Венеры и Марса, получить детальные фотографии с относительно близкого расстояния всех планет и их спутников.

Исследования космического пространства позволили получить исключительно важные сведения о строении Солнечной системы. Вместе с тем они имеют очень важное практическое значение: решаются проблемы метеорологии и картографирования поверхности Земли, ведется поиск полезных ископаемых, осуществляется глобальная космическая связь, телевидение, телефония и т. д. В перспективе — полет космонавтов на Марс, полное картографирование Венеры, исследование далеких планет (Урана, Нептуна, Плутона), создание обитаемых поселений на Луне.

VI. Заметим, что по существу почти всякое изменение характера движения — это реактивное движение и происходит оно по закону сохранения импульса. В самом деле, когда человек идет или бежит,

он отталкивает ногами Землю назад. За счет этого он сам продвигается вперед. Конечно, скорость Земли при этом оказывается во столько же раз меньше скорости человека, во сколько раз масса Земли больше массы человека. Именно поэтому мы движение Земли не замечаем. А вот если вы из лодки прыгнете на берег, то откат лодки в противоположном направлении будет вполне заметен.

Вопросы для самопроверки

1. Как движется ракета?
2. Может ли ракета двигаться в вакууме?
3. С какой целью космические ракеты делают многоступенчатыми?
4. Как можно затормозить ракету?
5. Какие успехи в развитии космонавтики вам известны?

Упражнения

1. Объясните, каков механизм работы гребца на лодке.
2. Объясните, как движется моторная лодка.
3. Докажите, что движение автомобиля — это по существу реактивное движение.
4. Мальчик массой 40 кг перешел с кормы на нос лодки. Масса лодки равна 100 кг, длина 2,5 м. На какое расстояние переместится лодка назад?
5. Масса реактивного снаряда на установке «Катюша» равна 42,5 кг, а скорость 355 м/с. Продолжительность сгорания пороха в снаряде равна 0,7 с. Считая, что порох сгорает мгновенно, а скорость истечения продуктов сгорания равна 2,0 км/с, определите массу порохового заряда.
6. Ракета-носитель «Союз» состоит из трех ступеней, причем первая ступень состоит из четырех двигателей (ЖРД), вторая и третья ступени содержат по одному ЖРД. У четырехступенчатой ракеты-носителя «Протон» первая ступень содержит шесть двигателей, вторая — четыре, а третья и четвертая ступени — по одному двигателю. Объясните, почему они так сконструированы.
7. Космический корабль массой 10 т движется со скоростью 9,0 км/с. Для торможения корабль выбрасывает в направлении движения 1450 кг продуктов сгорания со скоростью 3,0 км/с относительно корпуса. Какова скорость корабля после торможения?

§ 7.8. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА — ОСНОВНОЙ ЗАКОН ДИНАМИКИ

I. Все тела в природе взаимодействуют друг с другом, в результате чего изменяются их скорости (импульсы) как по модулю, так и по направлению. Основная задача динамики может быть сформулирована следующим образом: *определите закон движения материальной точки* (т. е. выразите ее координаты в виде функций вре-

мени), если известно, как данная материальная точка взаимодействует с окружающими ее телами.

Безусловно, интерес представляет и обратная задача: *определите характер взаимодействия материальной точки с окружающими телами, если известен закон ее движения.*

Решение этих задач основано на применении законов Ньютона, в частности на **втором законе Ньютона**, который часто называют **основным законом динамики**.

II. Из опыта известно, что при действии на движущееся тело другого тела импульс первого меняется. Так, пуля, попавшая в ствол дерева, останавливается. Молот при ударе о наковальню отскакивает. Бильярдный шар при ударе о борт меняет направление скорости. При соударении двух шаров меняются их скорости как по модулю, так и по направлению, следовательно, также меняются их импульсы. При равномерном движении тела по окружности меняется лишь направление импульса, а его модуль остается постоянным. От чего же зависит изменение импульса тела? На этот вопрос отвечает второй закон Ньютона.

Но, чтобы сформулировать этот закон, необходимо вспомнить понятие «сила», которое мы ввели в VII классе. *Силой называется физическая величина, которая служит мерой (количественной характеристикой) действия на данное тело других тел.* Поэтому в дальнейшем мы будем говорить не о действии окружающих тел на данное тело, а о действии силы на данное тело.

III. В своей знаменитой книге «Математические начала натуральной философии» И. Ньютон сформулировал второй закон следующим образом: *изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.*

Упомянутое И. Ньютоном понятие «количество движения» в наше время называется *импульсом тела*: $\vec{p} = m\vec{v}$. Второй закон Ньютона формулируют следующим образом: *сила равна изменению импульса в единицу времени.*

Исходя из этого определения можно записать:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\vec{p}_2 - \vec{p}_1}{t_2 - t_1} = \frac{m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1}{t_2 - t_1}.$$

Так как и сила, и импульс — векторы, то направление изменения импульса совпадает с направлением приложенной силы.

IV. Математическая формулировка второго закона Ньютона, строго говоря, применима лишь в том случае, когда к телу приложена постоянная сила, т. е. сила, не меняющаяся ни по модулю, ни по направлению ($\vec{F} = \text{const}$). Примером может служить сила тяжести на небольших высотах над поверхностью Земли ($P = mg$) или сила сухого трения ($F_{\text{тр}} = \mu N$).

Если же сила меняется, то в данной формуле нужно взять мгновенное значение изменения импульса, т. е. перейти к пределу при условии, что промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ стремится к нулю:

$$\vec{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}.$$

Как мы уже говорили в § 7.3 при анализе понятия «мгновенная скорость», предел такого рода называется производной. Следовательно, для случая действия произвольной силы второй закон Ньютона можно сформулировать так: **сила равна производной от импульса по времени**. Итак, $\vec{F} = \vec{p}'(t)$.

V. Как быть, если на тело (материальную точку) действует не одна сила, а несколько сил? В таком случае нужно все эти силы сложить и найти их векторную сумму, которая называется **равнодействующей** (резльтирующей) **силой**. В формулировке второго закона самим Ньютоном под действующей силой и предполагается **равнодействующая всех сил, действующих на тело**:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \vec{p}'(t).$$

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается основная задача динамики?
2. Что такое сила?
3. Как формулируется второй закон Ньютона?
4. Как формулируется второй закон Ньютона, если на тело (материальную точку) действуют несколько сил?

Упражнения

1. Пуля массой 9,0 г в течение $2,0 \cdot 10^{-4}$ с пробивает деревянную доску. При этом ее скорость уменьшается с 600 до 200 м/с. Найдите силу сопротивления, которое доска оказывает пуле.
2. Автомобиль, движущийся со скоростью 60 км/ч, резко затормозил на асфальтированном шоссе. Коэффициент трения равен 0,4. Покажите, что время торможения не зависит от массы автомобиля, и определите это время. (Указание. Считайте, что

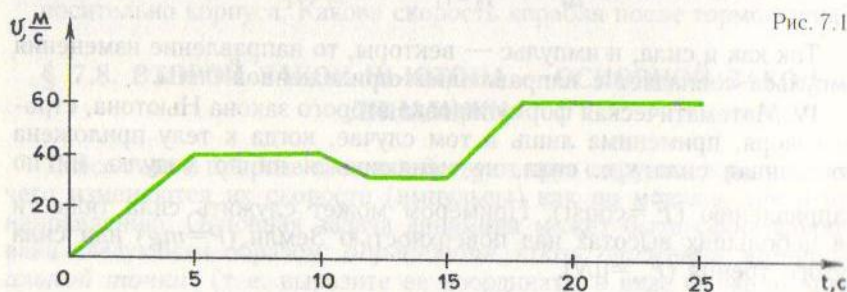


Рис. 7.17

торможение вызвано исключительно силой трения покрышек об асфальт.)

3. На тело действуют две силы под прямым углом: 40 Н и 30 Н. Масса тела равна 20 кг, начальная скорость равна нулю, время действия сил равно 4 с. Какова будет скорость тела после прекращения действия сил?

4. На графике (рис. 7.17) показан ход изменения скорости движения автомобиля. Постройте график изменения равнодействующей силы, действующей на автомобиль. Масса автомобиля равна 5 т.

§ 7.9. УСКОРЕНИЕ. РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

I. В выражении для второго закона Ньютона вынесем массу за скобки (см. § 7.8) и получим уравнение

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{t_2 - t_1} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Физическая величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, называется **ускорением**:

$$\vec{a} = \frac{(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Ускорение — это векторная физическая величина. Единицей ускорения является 1 м/с^2 . Исходя из этих двух уравнений второй закон Ньютона можно записать и так:

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

т. е. **сила равна произведению массы на ускорение**, или

$$\vec{a} = \vec{F}/m,$$

т. е. **ускорение пропорционально действующей силе (при заданной массе тела) и обратно пропорционально массе тела (при заданной силе)**.

Заметим, что все указанные формулировки второго закона Ньютона равносильны и из каждой выводятся все остальные.

II. Определение ускорения, приведенное выше, пригодно только для случая, когда ускорение постоянно как по модулю, так и по направлению. Чтобы получить **мгновенное ускорение**, следует взять изменение скорости за бесконечно малый промежуток времени, как мы это делали в § 7.3 при определении мгновенной скорости или в § 7.8 при строгой формулировке второго закона Ньютона:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{v}'(t).$$

Итак, **ускорение является производной от вектора скорости по времени**.

III. Рассмотрим случай, когда тело движется по некоторой прямой и на него действует постоянная сила, направленная по этой же прямой. Тогда и ускорение будет постоянным, а тело будет двигаться *равноускоренно*.

Пусть какая-либо ось координат направлена вдоль прямолинейной траектории. Примем момент времени t_1 , когда тело (материальная точка) находится в какой-либо точке, за начало отсчета времени: $t_1=0$. Скорость в этой точке назовем *начальной скоростью* \vec{v}_0 , ее проекцию на ось абсцисс обозначим \vec{v}_{0x} . Момент времени, когда тело находится в другой точке, обозначим $t_2=t$ (произвольный момент времени), мгновенную скорость обозначим $\vec{v}_2=\vec{v}$, а ее проекцию на ось абсцисс обозначим v_x .

Тогда вектор ускорения

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t},$$

а проекция ускорения на ось (например, на ось абсцисс)

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Отсюда следует

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Итак, при *равноускоренном движении* ($\vec{F}=\text{const}$, $\vec{a}=\vec{F}/m=\text{const}$) *мгновенная скорость является линейной функцией времени*.

График этой зависимости для проекций показан на рисунке 7.18, причем на рисунке 7.18, а изображен случай, когда сила и ускорение имеют одинаковое направление с начальной скоростью, а на рисунке 7.18, б — случай, когда сила и ускорение направлены противоположно начальной скорости.

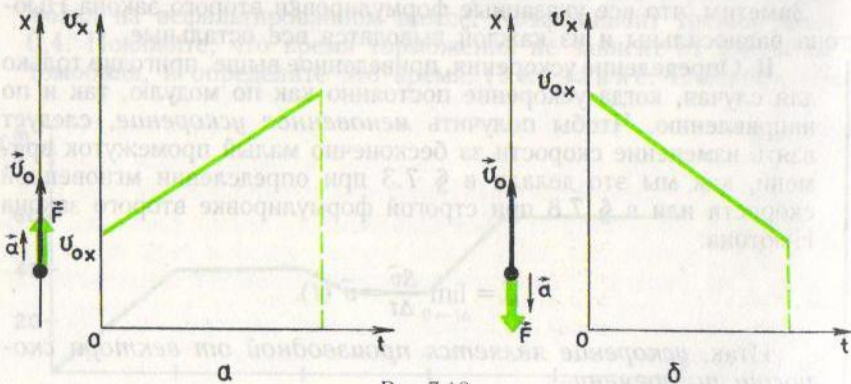


Рис. 7.18

IV. Поскольку скорость является линейной функцией времени, средняя скорость оказывается равной полусумме значений начальной и конечной скоростей. В проекциях на ось абсцисс имеем (см. рис. 7.18)

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_x + v_{0x}}{2} = \frac{v_{0x} + a_x t + v_{0x}}{2} = v_{0x} + \frac{a_x t}{2}.$$

Это позволяет нам найти перемещение:

$$l = x - x_0 = v_{\text{ср}} t = v_{0x} t + a_x t^2 / 2.$$

Отсюда следует *закон движения материальной точки под действием постоянной силы*: $x = x_0 + v_{0x} t + a_x t^2 / 2$.

Мы видим, что *при равноускоренном движении координата материальной точки является квадратичной функцией времени*.

V. В VII классе мы без вывода ввели выражение для кинетической энергии: $E_k = mv^2/2$. Этой формулой пользовались постоянно, в частности при анализе механических колебаний. Покажем, что это выражение можно вывести с помощью второго закона Ньютона.

Пусть вдоль оси абсцисс материальная точка движется под действием постоянной силы, направленной вдоль этой же оси. Пусть в некоторой точке скорость тела равна \vec{v}_1 , в другой точке скорость тела равна \vec{v}_2 и эти векторы также направлены по оси абсцисс.

Вам известно, что работа силы равна произведению силы на перемещение. Но при равноускоренном прямолинейном движении перемещение $l = v_{\text{ср}} t = \frac{v_2 + v_1}{2} t$, ускорение $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$. Тогда работа силы равна:

$$A = Fl = mal = m \frac{v_2 - v_1}{t} \cdot \frac{v_2 + v_1}{2} t = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

С другой стороны, работа силы равна изменению кинетической энергии:

$$A = E_{k2} - E_{k1}.$$

Сравнив оба выражения для работы, получим $E_k = mv^2/2$.

Вопросы для самопроверки

1. Какая величина называется вектором?
2. Является ли ускорение векторной или скалярной величиной?
3. Какая связь существует между силой и ускорением?
4. Какие формулировки второго закона Ньютона вам известны?
5. Какое движение называется равноускоренным?
6. Как определить ускорение в случае произвольного переменного движения?

7. Какой функцией времени является скорость при равноускоренном движении материальной точки?
8. Как выглядит график скорости, если на тело действует постоянная сила, имеющая одинаковое направление с начальной скоростью?
9. Как выглядит график скорости, если на тело действует постоянная сила, направленная противоположно начальной скорости?
10. Чему равна средняя скорость тела при равноускоренном движении?
11. Какой функцией времени является координата при равноускоренном движении материальной точки?

Упражнения

1. С каким ускорением движется автомобиль, если за 15 с его скорость увеличивается: была 2,0 м/с, стала 7,0 м/с?
2. По условию предыдущей задачи найдите силу, действующую на автомобиль, если его масса равна 6 т.
3. Автомобиль, движущийся со скоростью 60 км/ч, резко тормозит и останавливается в течение 2,5 с. С каким ускорением он движется? Каков смысл отрицательного значения ускорения?
4. Велосипедист спускается с горы с постоянным ускорением, равным 0,8 м/с². Какую скорость будет иметь велосипедист через 10 с, если его начальная скорость была 2,0 м/с.
5. Лыжник из состояния покоя спускается с горы с постоянным ускорением 0,5 м/с². Какова будет его скорость через 20 с? Каково перемещение лыжника за это время?
6. Через 20 с спуска (см. задачу 5) лыжник тормозит с ускорением, равным -2,0 м/с². Каково перемещение лыжника при его торможении? Сколько времени движется лыжник от момента торможения?
7. Начертите график скорости движения лыжника (см. задачи 5, 6) и ответьте на поставленные вопросы по графику, вспомнив, как определяется ускорение по графику скорости равноускоренного движения.
8. Автомобиль, двигаясь с начальной скоростью 10 м/с, тормозит с ускорением, равным -2,5 м/с². Каков его тормозной путь? Сколько времени пройдет с момента торможения до остановки?

§ 7.10. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

I. Замечательным примером равноускоренного движения в природе является *свободное падение тел*, т. е. движение тела под действием силы тяжести. Напомним, что впервые оно было исследовано Г. Галилеем. Он установил, что если на падающие тела действует только сила тяжести и не действует сопротивление воздуха, то все они движутся одинаково, т. е. с одним и тем же постоянным для данного места поверхности Земли ускорением, направленным вертикально вниз.

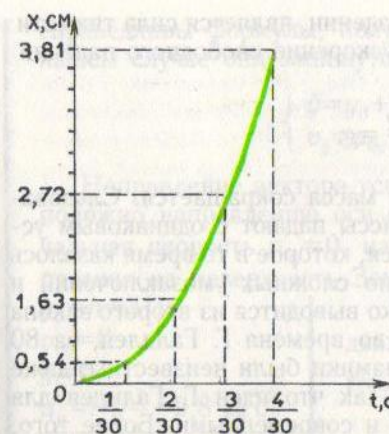


Рис. 7.19

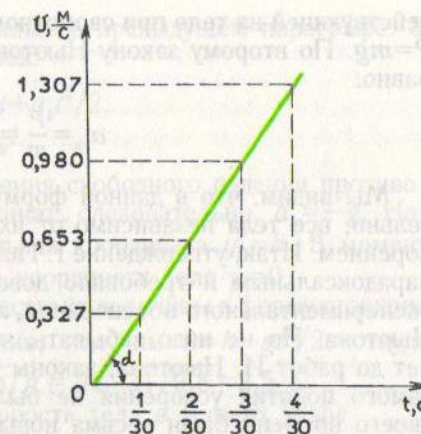


Рис. 7.20

Это утверждение не кажется очевидным, так как противоречит повседневному опыту: лист бумаги, упавший с балкона, плавно опускается вниз, а оброненный ключ или другой металлический предмет при падении набирает большую скорость. До Г. Галилея думали, что тяжелые тела падают быстрее, чем легкие, однако он с помощью опытов и рассуждений показал, что *все тела в вакууме падают одинаково*.

Убедиться в справедливости этого утверждения помогает уже известный нам опыт с вакуумной трубкой, в которой находятся различные предметы, например дробишка, пробка и птичье перо. Пока воздух из трубки не выкачан, все эти тела при падении достигают дна трубки за разное время: сначала дробишка, потом пробка, а затем птичье перо. Если же воздух из трубки выкачать при помощи насоса, то никакой разницы в движении этих тел при свободном падении не наблюдается: все они падают одновременно.

II. Каково же ускорение свободного падения? Эту величину можно определить экспериментальным путем, измерив перемещения свободно падающего тела через равные малые промежутки времени.

На рисунке 7.19 изображен график перемещения, а на рисунке 7.20 — график скорости. Экспериментальные точки фиксируются через $1/30$ с. По графику скорости свободного падения легко определить модуль ускорения свободного падения: он равен тангенсу угла наклона графика к оси времени. Вычисления показывают, что ускорение свободного падения

$$a_{\text{св}} = g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Этот результат, конечно, не случаен. Его можно было предсказать на основе второго закона Ньютона. В самом деле, единственной силой,

действующей на тело при свободном падении, является сила тяжести $P=mg$. По второму закону Ньютона ускорение свободного падения равно:

$$a_{\text{св}} = \frac{P}{m} = \frac{mg}{m} = g.$$

Мы видим, что в данной формуле масса сокращается. Следовательно, все тела независимо от их массы падают с одинаковым ускорением. Итак, утверждение Г. Галилея, которое в то время казалось парадоксальным и требовало довольно сложных умозаключений и экспериментального обоснования, легко выводится из второго закона Ньютона. Но не надо забывать, что во времена Г. Галилея, за 80 лет до работ И. Ньютона, законы динамики были неизвестны; даже самого понятия ускорения не было. Так что идеи Г. Галилея для своего времени были весьма новыми и современными. Более того, они послужили той базой, на основе которой была создана ньютоновская механика.

III. Более точные измерения показывают, что ускорение свободного падения в разных точках поверхности Земли несколько отличается; оно зависит от широты местности. Для примера укажем значения ускорения свободного падения на некоторых широтах:

0° — 9,78049 м/с ²	60° — 9,81924 м/с ²
30° — 9,79338 м/с ²	70° — 9,82614 м/с ²
40° — 9,80180 м/с ²	90° — 9,83221 м/с ²
50° — 9,81079 м/с ²	

Как видно, ускорение свободного падения больше у полюса и уменьшается к экватору. О причинах этого интересного явления вы узнаете несколько позднее.

При грубых расчетах используют приближенное значение ускорения свободного падения тел $g=9,8$ м/с².

IV. В § 7.9 мы уже познакомились с законами изменения скорости и перемещения при равноускоренном движении. Они применимы для расчета физических величин, характеризующих свободное падение тел.

Ниже предлагаются четыре очень важные типовые задачи, выделенные жирным шрифтом, которые вы вполне можете решить самостоятельно. Сделайте это и лишь после этого проверьте себя по учебнику.

Задача 1. Из окна девятого этажа ($h=31$ м) бросили камень. Определите время падения и скорость этого тела в момент приземления.

Решение. Начало координат поместим на поверхности Земли (рис. 7.21). Ось ординат OY направим вертикально вверх. Так как свободное падение является равноускоренным движением, то

справедливы формулы, полученные в предыдущем параграфе. В нашем случае они запишутся так:

$$\begin{cases} y = y_0 + v_{0y}t + a_y t^2 / 2, \\ v_y = v_{0y} + a_y t. \end{cases}$$

Направление вектора ускорения свободного падения противоположно направлению оси ординат, следовательно, $a_y = -g$. Начальная скорость $v_{0y} = 0$, начальная координата $y_0 = h$. В момент падения на поверхность Земли координата тела $y = 0$.

$$y_0 = h = 31 \text{ м}$$

$$v_{0y} = 0$$

$$y = 0$$

$$a_y = -g = -9,8 \text{ м/с}^2$$

$$t = ?$$

$$v_y = ?$$

Подставив величины в формулу закона движения, получим $0 = h - gt^2/2$, откуда $t = \sqrt{2h/g} = \sqrt{2 \cdot 31/9,8} \approx 2,5$ с.

Скорость тела в момент удара

$$v_y = -gt = -9,8 \cdot 2,5 \text{ м/с} \approx -24,5 \text{ м/с}.$$

Знак «минус» у скорости указывает, что направление вектора скорости при падении тела противоположно направлению оси ординат.

Задача 2. Из духового ружья выстрелили вертикально вверх. Начальная скорость пули равна 50 м/с. На какую высоту поднимется пуля? Сколько времени она будет в полете? (Спротивление воздуха не учитывайте.) На какой высоте будет пуля через 2 с после выстрела?

Решение. По существу, мы здесь имеем три задачи. Будем решать поочередно.

В первой задаче нас интересует максимальная высота, на которую поднимется пуля. На этой высоте пуля, естественно, остановится. Выбрав направление оси ординат, как в предыдущей задаче, запишем кратко условие, обозначив через t_1 время подъема пули.

$$v_{0y} = 50 \text{ м/с}$$

$$a_y = -g = -9,8 \text{ м/с}^2$$

$$v_y = 0$$

$$y_0 = 0$$

$$H = ?$$

$$t_1 = ?$$

Из уравнения для скорости имеем

$$v_y = v_{0y} + a_y t_1, \text{ или } 0 = v_{0y} - gt_1, \\ t_1 = v_{0y}/g = 50/9,8 \text{ с} \approx 5,1 \text{ с}.$$

Высоту подъема пули найдем из закона движения:

$$H = y_0 + v_{0y}t_1 + g_y t_1^2 / 2 = v_{0y}t_1 - gt_1^2 / 2 = \\ = v_{0y}^2 / g - v_{0y}^2 / 2g = v_{0y}^2 / 2g = \\ = 50^2 / (2 \cdot 9,8) \text{ м} \approx 128 \text{ м}.$$

Рекомендуем самостоятельно убедиться, что этот же результат можно было получить сразу, воспользовавшись законом сохранения энергии.

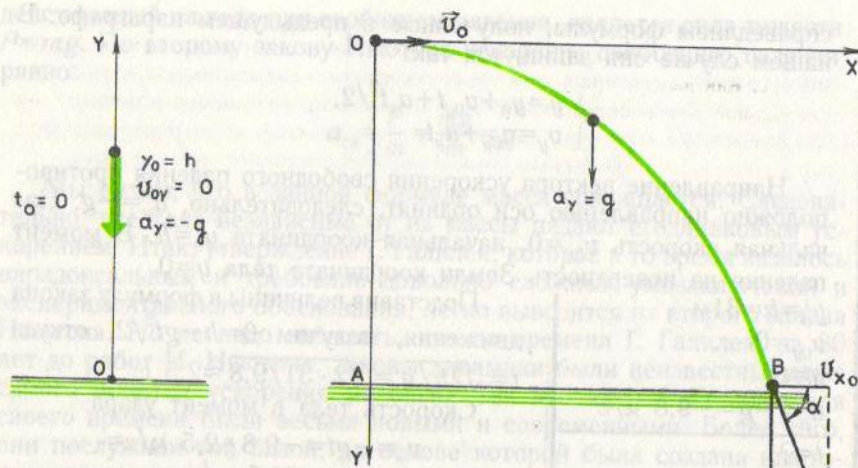


Рис. 7.21

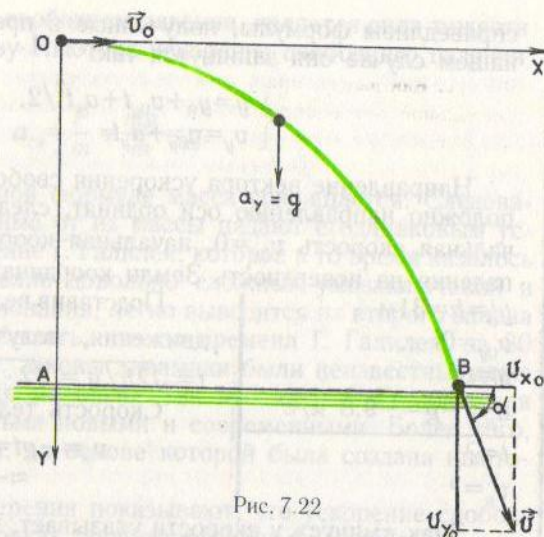


Рис. 7.22

Во второй задаче нас интересует время t_2 падения пули на поверхность Земли с максимальной высоты. Сложив это значение с временем подъема, получим искомый результат.

$$\begin{aligned} y_2 &= 0 \\ v_{0y} &= 0 \\ y_0 &= H \\ a_y &= -g \\ t_2 &= ? \end{aligned}$$

Из закона движения имеем

$$0 = H - gt_2^2/2,$$

откуда следует

$$t_2 = \sqrt{2H/g} = \sqrt{2v_{0y}^2/2g^2} = v_{0y}/g = t_1.$$

Итак, время падения пули равно времени ее подъема.

Рекомендуем самостоятельно убедиться, что модуль скорости при ударе пули о поверхность Земли равен модулю начальной скорости, но направления этих векторов противоположны.

Общее время полета пули

$$t = t_1 + t_2 = 2v_{0y}/g = 2 \cdot 50/9,8 \text{ с} = 10,2 \text{ с}.$$

Впрочем, этот результат можно было бы получить сразу из закона движения $y = y_0 + v_{0y}t - gt^2/2$, положив $y = y_0 = 0$. Тогда $0 = 0 + v_{0y}t - gt^2/2$, $t = 2v_{0y}/g$.

В третьей задаче также воспользуемся законом движения:

$$\begin{aligned} v_{0y} &= 50 \text{ м/с} \\ a_y &= -g = -9,8 \text{ м/с}^2 \\ y_0 &= 0 \\ t &= 2 \text{ с} \\ h &= ? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= y_0 + v_{0y}t - gt^2/2 = 50 \cdot 2 \text{ м} - \\ &\quad - 9,8 \cdot 4/2 \text{ м} \approx 80 \text{ м}. \end{aligned}$$

Задача 3. Стрела пущена из лука горизонтально с начальной скоростью 40 м/с. Как далеко она улетит, если лук находится на высоте 1,5 м от горизонтальной поверхности стадиона? Какова конечная скорость стрелы и под каким углом она воткнется в землю, если сопротивление воздуха пренебрежимо мало? Какова форма траектории?

Решение. Сначала задачу решим в общем виде, а затем подставим значения величин. Поместим начало координат в точку, откуда вылетает стрела (рис. 7.22). Эта точка находится на высоте $OA = h = 1,5 \text{ м}$. Направим ось абсцисс Ox параллельно поверхности Земли, а ось ординат Oy вертикально вниз.

$$\begin{aligned} x_0 &= 0 \\ v_{0x} &= 40 \text{ м/с} \\ y_0 &= 0 \\ v_{0y} &= 0 \\ y &= h = 1,5 \text{ м} \\ a_x &= 0 \\ a_y &= g = 9,8 \text{ м/с}^2 \\ AB &= l = ? \\ v &= ? \\ \alpha &= ? \end{aligned}$$

Поскольку вдоль оси абсцисс на стрелу сила не действует (сопротивлением воздуха мы пренебрегаем), то движение вдоль этой оси будет равномерным:

$$\begin{cases} v_x = v_{0x} = \text{const}, \\ x = x_0 + v_{0x}t. \end{cases}$$

Время движения вдоль оси абсцисс равно времени падения стрелы под действием силы тяжести $P = mg$, которая направлена вертикально вниз, т. е. вдоль оси ординат. А коль стрела падает под действием силы тяжести, то ее ускорение $a_y = g$.

Закон движения стрелы вдоль оси ординат запишется так:

$$\begin{cases} v_y = v_{0y} + gt, \\ y = y_0 + v_{0y}t + gt^2/2. \end{cases}$$

Отсюда следует $h = gt^2/2$, или $t = \sqrt{2h/g} = \sqrt{2 \cdot 1,5/9,8} \text{ с} = 0,55 \text{ с}$.

Вертикальная проекция скорости при падении стрелы на поверхность Земли $v_y = gt = 9,8 \cdot 0,55 \text{ м/с} = 5,4 \text{ м/с}$. Модуль скорости в момент падения стрелы на землю

$$v = \sqrt{v_y^2 + v_x^2} = \sqrt{(5,4^2 + 40^2) \text{ м}^2/\text{с}^2} = 40,4 \text{ м/с}.$$

Как видно из рисунка, угол между вектором скорости и поверхностью Земли можно найти из соотношения

$$\text{tg } \alpha = v_y/v_x = 5,4/40 = 0,135; \alpha = 7^\circ 40'.$$

Заметим, что в принципе верный обобщенный рисунок 7.22 по масштабу не соответствует условиям данной задачи.

Найдем также траекторию, по которой движется стрела. Для этого из уравнений $x=v_{0x}t$ и $y=gt^2/2$ исключим время и получим

$$y = \frac{gx^2}{2v_{0x}^2} = \frac{9,8x^2}{2 \cdot 1600} = 0,003x^2.$$

Мы получили уравнение параболы. Итак, тело, брошенное горизонтально, движется по параболе. Это, конечно, справедливо лишь в том случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь. Такие условия имеют место на Луне, где атмосфера отсутствует. На Земле сопротивлением воздуха можно пренебречь, если достаточно плотное маленькое тело, например камешек или металлический шарик, движется со скоростью, не превосходящей несколько десятков метров в секунду.

Задача 4. С поверхности Земли под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0 брошен камень. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найдите время и дальность полета, наибольшую высоту подъема тела над горизонтом, траекторию его движения. Докажите, что наибольшая дальность полета достигается при бросании тела под углом 45° .

Решение.

$$\begin{aligned} y_0 &= 0 \\ x_0 &= 0 \\ v_{0y} &= v_0 \sin \alpha \\ v_{0x} &= v_0 \cos \alpha \\ a_x &= 0 \\ a_y &= -g \\ \overline{OB} &= l - ? \\ \overline{AC} &= h - ? \end{aligned}$$

Вдоль оси абсцисс (рис. 7.23) на тело никакие силы не действуют ($F_x=0$), следовательно, тело по горизонтали движется равномерно:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_{0x}t = v_0 t \cos \alpha, \\ v_x &= v_{0x} = v_0 \cos \alpha. \end{aligned}$$

Вдоль оси ординат на тело действует сила тяжести, направленная противоположно координатной оси ($a_y=-g$), следовательно, вдоль вертикали движение равноускоренное.

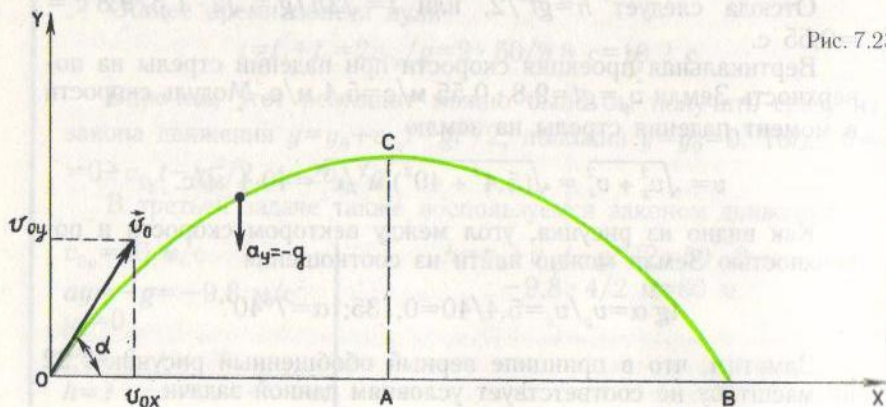


Рис. 7.23

Исходя из этого запишем уравнения

$$\begin{aligned} v_y &= v_{0y} + a_y t = v_0 \sin \alpha - gt, \\ y &= y_0 + v_{0y}t + a_y t^2/2 = y_0 t \sin \alpha - gt^2/2. \end{aligned}$$

Траекторию движения найдем, исключив время из уравнений

$$x = v_0 t \cos \alpha \text{ и } y = v_0 t \sin \alpha - gt^2/2,$$

а затем получим

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - gx^2/(2v_0^2 \cos^2 \alpha).$$

Это — уравнение параболы.

В точках O и B ордината $y_0 = y_B = 0$. Для определения дальности полета примем в уравнении параболы $y=0$ и $x=l$, а затем получим

$$0 = l \operatorname{tg} \alpha - gt^2/(2v_0^2 \cos^2 \alpha),$$

или

$$l = (2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha)/g.$$

Как известно, $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin(2\alpha)$, следовательно, $l = (v_0^2 \sin 2\alpha)/g$. Поскольку синус любого угла не превосходит единицы, то наибольшая дальность полета тела достигается, когда $\sin(2\alpha) = 1$, или $2\alpha = 90^\circ$, т. е. при бросании тела под углом $\alpha = 45^\circ$.

Максимальную высоту подъема тела найдем, если учтем, что в верхней точке траектории подъем тела прекращается, т. е. $v_y = 0$. Отсюда следует $t_{\text{под}} = (v_0 \sin \alpha)/g$. Тогда из закона движения вдоль оси ординат получим

$$\begin{aligned} h &= v_0 t_{\text{под}} \sin \alpha - gt_{\text{под}}^2/2 = (v_0^2 \sin^2 \alpha)/g - (gv_0^2 \sin^2 \alpha)/2g^2 = \\ &= (v_0^2 \sin^2 \alpha)/2g. \end{aligned}$$

Очевидно, что наибольшая высота подъема достигается, если тело бросать вертикально вверх. В этом случае $\alpha = 90^\circ$.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется свободным падением тел?
2. Каким видом движения является свободное падение тел?
3. Каково ускорение свободного падения? Зависит ли оно от массы тела?
4. Какой опыт доказывает независимость ускорения свободного падения от массы тела?
5. Как теоретически доказать независимость ускорения свободного падения от массы тела?
6. Зависит ли ускорение свободного падения от скорости тела?
7. Как ускорение свободного падения зависит от широты места?

Упражнения

1. Стрела, пущенная из лука вертикально вверх, вернулась обратно через 5,6 с. На какую высоту поднялась стрела? С какой скоростью она была пущена? (Сопротивление воздуха не учитывайте.)
2. С дерева высотой 6,0 м упало яблоко. Сколько времени оно падало? Какова скорость в момент приземления? (Сопротивление воздуха не учитывайте.)
3. С какой скоростью нужно бросить вертикально вверх аркан, чтобы он долетел до выступа, высота которого 8,0 м?
4. С крутого берега реки, высота которого 12,0 м над уровнем воды, мальчик бросает камень с горизонтальной скоростью 15,0 м/с. Как долго летит камень? На каком расстоянии по горизонтали упадет камень? Под каким углом к горизонту камень войдет в воду?
5. Докажите, что если тело бросать с одинаковой по модулю начальной скоростью, но под дополнительными углами α и $\beta = 90^\circ - \alpha$, то дальность полета окажется одинаковой.
6. Постройте траектории движения двух тел, брошенных с одинаковой по модулю начальной скоростью под дополнительными углами к горизонту, например $\alpha = 30^\circ$ и $\beta = 60^\circ$.
7. Найдите отношение максимальных высот подъема при бросании тела под дополнительными углами к горизонту при одинаковой по модулю начальной скорости. Сделайте расчет для $\alpha = 30^\circ$ и $\beta = 60^\circ$.
8. Определите широту места, если период колебания маятника длиной 1 м равен 2,006 с (см. § 1.5).

§ 7.11. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Когда мы говорим о том, что на тело действует сила, то всегда подразумеваем, что данное тело взаимодействует с каким-то другим телом, которое нас не интересует. А раз не интересует, то мы его заменяем понятием *сила*. Например, чтобы определить ускорение повозки, необязательно знать, кто действует на повозку. Важно знать силу — величину, характеризующую это действие.

Но вместе с тем из опытов известно, что одностороннего действия не бывает, а бывает всегда взаимодействие. Когда мы тянем санки, то ощущаем действие веревки на свою руку. Взвешивая груз при помощи динамометра, мы не только поднимаем этот груз, но и видим, что пружина динамометра растягивается, т. е. не только пружина динамометра действует на груз, но и груз действует на пружину динамометра. Значит, при всяком взаимодействии приложенные к телам силы направлены в противоположные стороны. Когда мы тянем тележку, то ускорение направлено в сторону силы тяги. Что же касается нашей руки, то она испытывает действие со стороны тележки в противоположном направлении. При взвешивании груз поднимается

вверх, а пружина растягивается. При ударе молотка по шляпке гвоздя молоток действует на гвоздь с некоторой силой, в результате чего гвоздь входит в древесину. Но и гвоздь действует на молоток противоположно направленной силой, и в результате движущийся молоток останавливается. Таким образом, если взаимодействуют два тела, то это значит, что имеются всегда две силы: сила действия и сила противодействия, которые приложены к двум взаимодействующим телам и направлены в противоположные стороны.

II. Однако встает вопрос: равны ли эти силы по модулю? Ответ на этот вопрос дал И. Ньютон в формулировке третьего закона динамики: *«Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны (по модулю) и направлены в противоположные стороны»*. Это записывается так:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}.$$

Силы действия и противодействия не уравниваются, поскольку они приложены всегда не к одному телу, а к разным телам. Поэтому их нельзя заменить равнодействующей.

III. И. Ньютон пришел к этому закону первоначально путем следующих рассуждений. Представим себе, что магнит и кусок железа, положенные на пробки, плавают в воде. Притягиваясь друг к другу, они сливаются в одно целое. Если бы действие и противодействие при этом не были бы равны, то в силу второго закона динамики соединившиеся вместе магнит и железо двигались бы равноускоренно в направлении большей силы. Но это противоречило бы первому закону динамики. Следовательно, это невозможно.

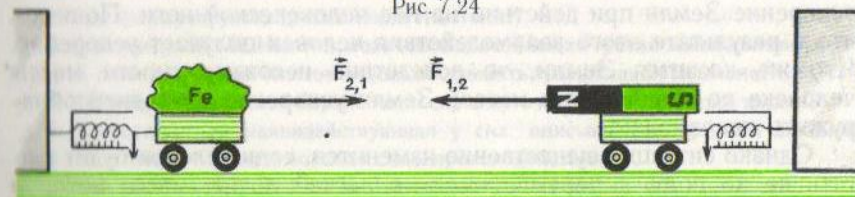
Этот мысленный вывод И. Ньютона можно проверить и подтвердить на опыте. Пусть магнит и кусок железа расположены на двух легких тележках, каждая из которых с помощью динамометра прикреплена к стене (рис. 7.24). Опыт показывает, что оба динамометра фиксируют равные по модулю силы $F_{1,2} = F_{2,1}$, что подтверждает справедливость третьего закона Ньютона.

IV. Пользуясь вторым законом Ньютона и законом сохранения импульса, можно вывести третий закон Ньютона.

Пусть два тела массами m и M в момент времени t_1 движутся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{u}_1 . Их суммарный импульс

$$\vec{p}_1 = m\vec{v}_1 + M\vec{u}_1.$$

Рис. 7.24



В результате взаимодействия друг с другом скорости этих тел меняются и в момент времени t_2 их скорости будут уже равны \vec{v}_2 и \vec{u}_2 . Следовательно, их суммарный импульс в этот момент

$$\vec{p}_2 = m \vec{v}_2 + M \vec{u}_2.$$

Если действием внешних сил можно пренебречь, т. е. если система этих тел замкнутая, то импульс сохраняется: $\vec{p}_2 = \vec{p}_1$, или $m \vec{v}_2 + M \vec{u}_2 = m \vec{v}_1 + M \vec{u}_1$.

Это равенство можно записать и так:

$$m \vec{v}_2 - m \vec{v}_1 = -(M \vec{u}_2 - M \vec{u}_1).$$

Разделив его на промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, получим

$$\frac{m \vec{v}_2 - m \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = - \frac{M \vec{u}_2 - M \vec{u}_1}{t_2 - t_1}.$$

Но по второму закону Ньютона (см. § 7.8) в левой части равенства стоит сила $\vec{F}_{1,2} = \frac{m \vec{v}_2 - m \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$, которой второе тело действует на первое, а в первой части равенства — сила $\vec{F}_{2,1} = \frac{M \vec{u}_2 - M \vec{u}_1}{t_2 - t_1}$, которой первое тело действует на второе. Итак, $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$, т. е. **два тела взаимодействуют силами, равными по модулю и противоположными по направлению.** Это и есть **третий закон Ньютона.**

V. Третий закон Ньютона имеет жизненно важное значение. В самом деле, для изменения скорости движения необходимо действие силы. Это изменение происходит в соответствии со вторым законом Ньютона. Но действие силы возможно лишь в результате взаимодействия, которое определяется третьим законом Ньютона. Например, шагая, мы за счет силы трения действуем на пол, что вызывает противодействие со стороны пола. В результате мы получаем необходимое ускорение для перехода из состояния покоя в состояние движения. По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$ или $m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2$, где $\vec{F}_{1,2}$ — действие пола на человека при движении его ноги; $\vec{F}_{2,1}$ — действие ноги человека на пол; m_1 — масса человека; \vec{a}_1 — его ускорение; m_2 — масса Земли, с которой связан пол; \vec{a}_2 — ускорение Земли при действии на нее человеческой ноги. Понятно, что в результате этого взаимодействия человек получает ускорение. Что же касается Земли, то вследствие несоразмерности массы человека по сравнению с массой Земли ускорение последней обнаружить невозможно.

Однако ситуация существенно изменится, если человек будет шагать не по полу, а перемещаться в легкой лодке, масса которой

соизмерима с массой человека. Для того чтобы он смог выбраться из лодки на берег, ее следует каким-то образом привязать, т. е. удерживать у берега. Иначе при выходе человека из лодки она получит ускорение в противоположном направлении, а человек шагнет в воду вместо берега.

И совсем по-другому все происходит на льду. При силе трения, почти равной нулю, никакого взаимодействия не получается. Движение ног не приводит к привычному шагу. Но при этом можно потерять равновесие и упасть.

VI. С третьим законом Ньютона нередко связываются кажущиеся парадоксы. В самом деле, если всякая сила характеризует взаимодействие тел и при этом тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению, то как объяснить действие разного рода движителей. Например, когда лошадь везет воз сена, то по третьему закону Ньютона сила тяги со стороны лошади должна быть в точности равна по модулю силе, действующей со стороны воза. Так почему же происходит движение в сторону лошади, а не наоборот — в сторону воза? Такие же вопросы можно задать о причинах движения тележки, которую мы везем, вагонов под действием тяги со стороны локомотива и т. д.

Парадокс этот кажущийся. Воз сена относительно лошади не перемещается. Однако и воз, и лошадь как одно целое перемещаются относительно поверхности Земли. Когда лошадь упирается копытами в почву, то происходит взаимодействие двух тел, а именно лошади вместе с возом сена и Земли. При взаимодействии оба эти тела получают ускорения, и в соответствии с третьим законом Ньютона $m \vec{a}_1 = -M \vec{a}_2$, где m — масса лошади и воза; \vec{a}_1 — их ускорение; M — масса Земли; \vec{a}_2 — ее ускорение. Но так как масса Земли несоизмеримо велика по сравнению с массой лошади и воза, то ускорение Земли при этом столь ничтожно, что его не удастся заметить.

Хотя, точнее, нужно говорить не о всей Земле, а лишь о ее поверхности, т. е. о почве или каком-либо покрытии, которые под воздействием сил со стороны идущего транспорта разрушаются. Все мы наблюдали, как оторвавшиеся комья грязи летят в противоположную сторону от колес движущегося автомобиля. Разрушаются бетонные, асфальтовые покрытия дорог, разрушаются стальные рельсы железных дорог. Время от времени дороги приходится ремонтировать: это — следствие третьего закона Ньютона.

Вопросы для самопроверки

1. Как формулируется третий закон Ньютона?
2. Как рассуждал И. Ньютон, логически обосновывая третий закон динамики?
3. С помощью каких опытов можно обосновать третий закон Ньютона?
4. Почему из массивной баржи легко спрыгнуть на берег, а из лодки трудно?
5. Существует ли равнодействующая у сил, описываемых третьим законом Ньютона, — силы действия и силы противодействия?
6. Как выводится третий закон Ньютона из закона сохранения импульса?

Упражнения

1. Рыбак, сидя в лодке, отталкивается от бревна, которое при этом начинает двигаться со скоростью 2 м/с. Какую скорость при этом приобретает лодка, если ее масса вместе с рыбаком в 4 раза больше массы бревна?
2. Девочка массой 30 кг стоит на льду и бросает своей подруге мяч массой 0,5 кг. Какое максимальное ускорение она может сообщить мячу, оставаясь в покое? Коэффициент трения о лед равен 0,015. (Указание. Для того чтобы девочка оставалась на месте после броска, сила, возникающая за счет отдачи, должна быть меньше силы трения.)
3. Докажите, что из второго и третьего законов Ньютона вытекает закон сохранения импульса. Для простоты вывода рассмотрите замкнутую систему, состоящую из двух взаимодействующих тел.
4. Из сопла ракеты вырываются продукты сгорания со скоростью $u=2$ км/с относительно корпуса ракеты. Расход топлива составляет $\mu=500$ кг/с. Определите силу, действующую на ракету (силу реактивной тяги).

§7.12. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ

I. Одним из простейших видов криволинейного движения является равномерное движение материальной точки по окружности, когда модуль ее скорости v не меняется, а траекторией движения оказывается окружность радиусом R .

Время одного оборота точки по окружности называется периодом (T). Величина, обратная периоду, называется частотой ($\nu=1/T$).

Частота равна числу оборотов точки при ее равномерном круговом движении, совершаемых за одну секунду. Выражается частота в с^{-1} .

Через эти величины легко выразить модуль скорости точки:

$$v=2\pi R/T=2\pi R\nu.$$

II. Хотя при равномерном движении точки по окружности модуль скорости не меняется, все-таки вектор скорости не является постоянным — он меняется по направлению. Следовательно, это движение является движением с ускорением. Рассмотрим, чему равно это ускорение и как оно направлено. Для решения этой задачи вспомним, что при криволинейном движении вектор скорости всегда направлен по касательной к траектории.

Равномерное движение тела по окружности показано на рисунке 7.25. Например, это может быть девочка, катающаяся на карусели, или велосипедист, равномерно едущий по круговому треку. В самом общем случае это может быть любая материальная точка. Положение

точки в некоторый момент времени t_1 обозначено буквой A_1 , а через какой-то промежуток времени $\Delta t=t_2-t_1$ — буквой A_2 . В обеих точках вектор скорости направлен по касательной к окружности, а длина его одинаковая, так как модуль скорости в данном движении не меняется. И тем не менее ускорение материальной точки не равно нулю.

Вычтем из вектора скорости \vec{v}_2 в точке A_2 вектор скорости \vec{v}_1 в точке A_1 по правилу, сформулированному в § 7.2. Получим вектор скорости $\Delta \vec{v}=\vec{v}_2-\vec{v}_1 \neq 0$. По определению ускорения можно записать:

$$\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}=\frac{\vec{v}_2-\vec{v}_1}{t_2-t_1}=\vec{a}_{\text{ср}}.$$

Однако нас интересует не среднее, а мгновенное ускорение. Как же его найти?

III. Опять воспользуемся известным методом аппроксимации. (Слово «аппроксимация» образовано от латинского слова *approximare* — приближаться.) Мысленно будем уменьшать промежуток времени Δt . При этом модуль вектора перемещения $\Delta l=A_1A_2$ будет все ближе совпадать с траекторией движения, т. е. с дугой A_1A_2 . По направлению скорость меняться будет все меньше, угол между векторами \vec{v}_1 и \vec{v}_2 будет приближаться к нулю, а вектор $\Delta \vec{v}$ по направлению будет все больше приближаться к радиусу окружности. Поскольку промежуток времени можно брать каким угодно малым, то мы можем утверждать, что в данном пределе мгновенное ускорение в каждой точке траектории при равномерном движении материальной точки по окружности направлено внутрь окружности по ее радиусу к центру. Поэтому это ускорение называется *центростремительным (нормальным) ускорением*.

Методом аппроксимации мы можем определить не только направление, но и модуль вектора центростремительного ускорения.

Из подобия треугольников A_1OA_2 и A_2MN (см. рис. 7.25) следует, что модуль приращения скорости Δv относится к модулю скорости v так же, как модуль перемещения Δl относится к радиусу окружности $\Delta v/v=\Delta l/R$.

Для очень малого промежутка времени $\Delta l=v\Delta t$, а $\Delta v=a\Delta t$, следовательно, $a/v=v/R$, откуда следует

$$a_{\text{ц}}=v^2/R.$$

Итак, модуль центростремительного ускорения равен отношению квадрата модуля скорости к радиусу окружности, по которой происходит равномерное движение материальной точки.

IV. Хотя модуль ускорения при равномерном движении по окружности не меняется, направления ускорений \vec{a}_1 и \vec{a}_2 в разных точках траектории разные, но они всегда направлены по радиусу к

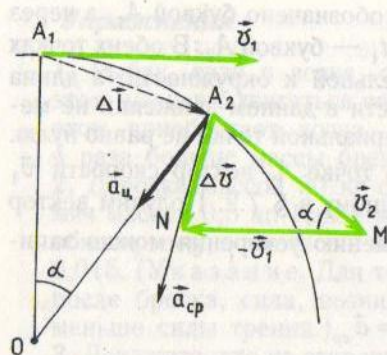


Рис. 7.25

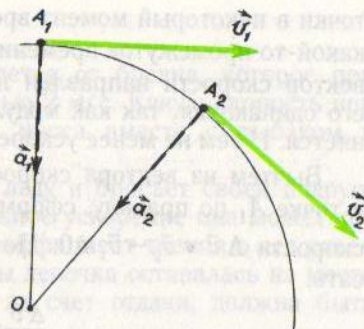


Рис. 7.26

центру окружности O перпендикулярно векторам скоростей \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 7.26). Поэтому, говоря о центростремительном ускорении в некоторой точке круговой траектории, мы всегда имеем в виду мгновенное ускорение.

V. Формулу центростремительного ускорения можно преобразовать, выразив скорость через период или частоту:

$$a_{\text{ц}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 \nu^2 R.$$

VI. Равномерное движение материальной точки по окружности не является инерциальным, так как точка движется с ускорением. Согласно второму закону Ньютона движение по окружности возможно лишь в том случае, если на эту точку действует сила, направленная к центру окружности:

$$F = ma_{\text{ц}} = mv^2/R.$$

Иногда, следуя И. Ньютону и Х. Гюйгенсу, эту силу называют *центростремительной*. Однако надо помнить, что это не какая-то особая сила. Она вызвана взаимодействием материальной точки с каким-то другим телом, которое удерживает эту точку на окружности и не дает ей двигаться прямолинейно. Такое тело называется *связью*.

Рассмотрим несколько примеров. Допустим, что вы вращаете камень на веревке. Когда камень начинает вращаться, веревка натягивается. Возникшая сила упругости сообщает камню центростремительное ускорение. Кстати, если веревка оборвется, то камень станет двигаться прямолинейно по касательной к траектории, т. е. по направлению скорости, с которой он двигался в тот момент, когда веревка оборвалась.

В качестве второго примера рассмотрим движение грузика, лежащего на вращающемся диске (рис. 7.27). Здесь силой, которая удерживает грузик и заставляет его вместе с диском двигаться по

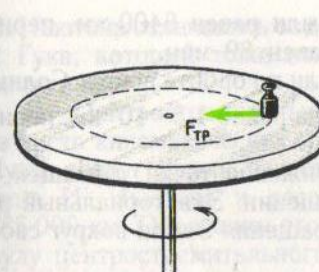


Рис. 7.27

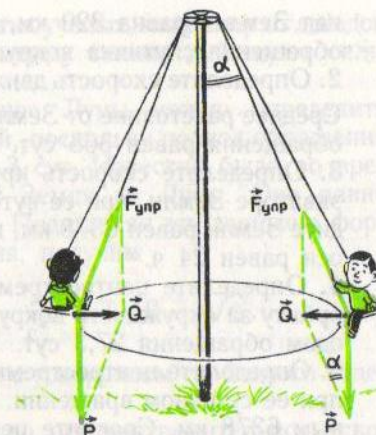


Рис. 7.28

окружности, является сила трения, направленная к центру. Она и сообщает грузику центростремительное ускорение. Если же частоту вращения диска все время увеличивать, то наступит момент, когда сила трения окажется недостаточной ($F_{\text{тр}} < mv^2/R$) и грузик соскользнет с диска.

Наконец, рассмотрим движение школьника на карусели (рис. 7.28).

На школьника действуют две силы: сила тяжести \vec{P} и сила натяжения троса $\vec{F}_{\text{упр}}$. Равнодействующая этих сил \vec{Q} направлена к центру окружности. Эта равнодействующая и сообщает движущемуся по окружности школьнику центростремительное ускорение.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называется равномерным движением по окружности?
2. Что называется периодом; частотой? В каких единицах выражаются эти физические величины? Каково соотношение между периодом и частотой?
3. Почему при равномерном движении по окружности, характеризуя ускорение движения тела в какой-то точке траектории, говорят о мгновенном ускорении? Как направлен вектор ускорения?
4. Как вывести формулу зависимости центростремительного ускорения от скорости материальной точки и радиуса окружности?
5. Как выразить зависимость центростремительного ускорения от периода и частоты обращения при равномерном движении материальной точки по окружности?
6. Какие силы могут сообщить телу центростремительное ускорение?

Упражнения

1. Определите центростремительное ускорение искусственного спутника Земли, приняв его орбиту за круговую. Высота спутника

над Землей равна 320 км, радиус Земли равен 6400 км, период обращения спутника вокруг Земли равен 89 мин.

2. Определите скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца.

Среднее расстояние от Земли до Солнца равно $1,5 \cdot 10^8$ км, период обращения равен 365 сут.

3. Определите скорость кругового движения точки, лежащей на экваторе Земли, при ее суточном вращении. Экваториальный радиус Земли равен 6378 км, период обращения Земли вокруг своей оси равен 24 ч.

4. Определите центростремительное ускорение Луны, приняв ее орбиту за окружность вокруг Земли радиусом 385 000 км и периодом обращения 27,3 сут.

5. Определите центростремительное ускорение на экваторе Земли при ее суточном вращении. Примите экваториальный радиус равным 6378 км. Сравните центростремительное ускорение с ускорением свободного падения.

6. Бечевка длиной 0,6 м выдерживает натяжение не более 1800 Н. На бечевке вращается камень массой 3 кг. С какой наибольшей частотой можно вращать камень в горизонтальной плоскости, чтобы бечевка не оборвалась?

7. На деревянный диск, вращающийся с частотой $0,8 \text{ с}^{-1}$, кладут металлический груз. Коэффициент трения металла о дерево равен 0,5. На каком максимальном расстоянии от центра диска груз не соскользнет?

8. Период вращения карусели равен 2,8 с. Определите угол между тросом, на котором укреплено сиденье, и вертикалью (см. рис. 7.28). Длина троса равна 2,2 м.

§7.13. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

1. После открытия Н. Коперником гелиоцентрической системы мира начались поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет вокруг Солнца. Как вы уже знаете, такие закономерности были найдены И. Кеплером. Но причину, определяющую эти общие для всех планет закономерности, И. Кеплеру найти не удалось.

Существует легенда, что, постоянно думая над этим вопросом и наблюдая за падением яблока с ветки дерева, И. Ньютон выдвинул гипотезу (предположение) о том, что движение планет по орбитам вокруг Солнца и падение тел на Землю вызваны одной и той же причиной — тяготением, которое существует между всеми телами. Теперь исследования историков показывают, что такая догадка высказывалась учеными и до И. Ньютона. Однако именно он из этой гипотезы сделал частный, но очень важный вывод: *между центростремительным ускорением Луны и ускорением свободного падения на Земле должна существовать связь*. Эту связь нужно было установить численно и проверить. Именно этим соображения

И. Ньютона отличались от догадок других ученых, например от догадок Р. Гука, который тоже считал, что между телами действуют силы тяготения.

II. Центростремительное ускорение Луны можно определить из чисто кинематических соображений, поскольку период обращения Луны вокруг Земли известен: $T=27,3$ сут. Известно было во времена И. Ньютона и расстояние от Земли до Луны. Оно равно 385 000 км. Обозначим его буквой R . Подставляя эти данные в формулу центростремительного ускорения, получим

$$a_{\text{л}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 3,85 \cdot 10^6}{(27,3 \cdot 24 \cdot 3600)^2} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Но как сопоставить это ускорение с ускорением свободного падения на поверхности Земли?

Если природа тяготения общая, то центростремительное ускорение Луны можно определить и из динамических соображений, используя общую закономерность для движения всех планет, найденную И. Кеплером, следующим образом.

Силу, удерживающую Луну на орбите, можно определить по второму закону Ньютона: $F=ma_{\text{л}}=4\pi^2 mR/T^2$. Но по третьему закону Кеплера $T^2=R^3/K$, где K — некоторая постоянная, которую надо определить. Значит, $F=4\pi^2 mK/R^2$, где m — масса Луны; R — расстояние от Земли до Луны.

Следовательно, сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния. Значит, отношение центростремительного ускорения Луны к ускорению свободного падения на поверхности Земли должно быть равно отношению квадрата радиуса Земли R_3 к квадрату расстояния от центра Земли до Луны, т. е.

$$\frac{a_{\text{л}}}{g} = \frac{R_3^2}{R^2}.$$

Поскольку И. Ньютон знал, что расстояние от Земли до Луны равно приблизительно шестидесяти земным радиусам, то он получил тот же результат: $a_{\text{л}} \approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$.

Гипотеза была доказана, поскольку теоретический вывод совпал с результатом, полученным из наблюдений. Говорят, что И. Ньютон был так взволнован своим открытием, что был не в силах довести вычисления до конца и поручил это сделать своим ученикам.

Сам И. Ньютон писал о своем открытии так: «И в тот же год (ему было всего 24 года!) я начал думать о притяжении, как о чем-то относящемся к орбите Луны и, ...пользуясь правилом Кеплера, нашел, что силы, которые удерживают планеты на их орбитах, должны меняться обратно пропорционально квадратам расстояний от центров, вокруг которых они вращаются; и в связи с этим я сравнил силу, требуемую для того чтобы удержать Луну на ее орбите, с силой тяготения на поверхности Земли и нашел, что они весьма близки».

III. Однако И. Ньютон установил не только существование всемирного тяготения и обратную пропорциональность силы тяготения квадрату расстояний между телами, но и зависимость этой силы от масс тяготеющих тел. Однако из полученной формулы $F = \frac{4\pi^2 K m}{R^2}$ не-

ясно, от чего зависит величина K . Тогда И. Ньютон сделал предположение, что она пропорциональна массе второго тяготеющего тела. Заметим, что это вытекает из третьего закона Ньютона. В самом деле, по третьему закону сила, с которой Луна притягивает Землю, равна по модулю силе, с которой Земля притягивает Луну: $F_L = F_3$, или $4\pi^2 K_3 m_3 / R^2 = 4\pi^2 K_L m_L / R^2$. Отсюда следует $K_3 m_3 = K_L m_L$, или $\frac{K_3}{m_L} = \frac{K_L}{m_3} = G$, где G — некая постоянная величина. Подставив $K_3 = G m_L$, или $K_L = G m_3$ в формулу, определяющую силу притяжения между Луной и Землей, получим $F = G \frac{m_L m_3}{R^2}$.

Очевидно, что такой же результат окажется справедливым для взаимодействия всех планет с Солнцем и, более того, для взаимодействия любых тел.

Окончательно закон всемирного тяготения формулируется так: *два тела притягиваются друг к другу силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Дальнейший ход астрономических наблюдений и лабораторных измерений подтвердил найденное выражение для силы взаимного притяжения тел. Оказалось, что G — это универсальная константа, названная гравитационной постоянной. Она численно равна силе притяжения двух тел массой по 1 кг, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга. Лабораторные измерения дали результат:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Следует обратить внимание на то, что сформулированный закон всемирного тяготения справедлив лишь для материальных точек. И. Ньютон также доказал, что закон справедлив для шаров, плотность которых распределена симметрично относительно их центров. В этом случае R — это расстояние между центрами шаров. Для тел более сложной формы расчет силы взаимодействия достаточно сложен. Мы эту проблему рассматривать не будем.

IV. В лабораторных условиях закон всемирного тяготения удалось проверить лишь сто лет спустя после его открытия. Это сделал лорд Г. Кавендиш в 1798 г. Опыты проводились при помощи крутильных

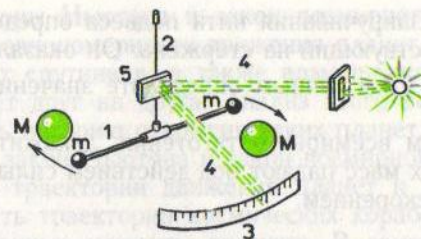


Рис. 7.29

весов (рис. 7.29). На длинном стержне 1 уравнивались два маленьких шарика одинаковой массы m . Стержень был подвешен на тонкой проволоке 2. К маленьким шарикам с противоположных сторон стержня подставлялись на близком расстоянии большие свинцовые шары. Масса каждого большого шара была равна M . При сближении шаров проволока закручивалась. Угол закручивания проволоки регистрировался на шкале 3 по повороту светового пучка 4, отраженного от зеркальца 5. По углу закручивания проволоки определялся момент силы упругости, равный моменту пары сил, возникающих при притяжении маленьких шариков к большим.

Результаты опыта позволили определить гравитационную постоянную по формуле

$$G = FR^2 / mM.$$

Получилось очень маленькое значение этой величины (см. п. III), которое удалось измерить только благодаря большой чувствительности крутильных весов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие соображения позволили И. Ньютону выдвинуть гипотезу закона всемирного тяготения?
2. Почему ускорение, с которым Луна обращается вокруг Земли, значительно меньше ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли?
3. Как формулируется закон всемирного тяготения?
4. Как Г. Кавендиш определил гравитационную постоянную?
5. Что характеризует гравитационная постоянная?

Упражнения

1. Определите силу, с которой два однородных шара массой по 100 кг каждый притягиваются друг к другу, если расстояние между их центрами равно 50 см.
2. В одной из установок по определению гравитационной постоянной (см. рис. 7.29) на стержне длиной 20 см укреплены шарики массой по 0,20 кг каждый. Когда к ним поднесли два свинцовых шара массой по 40 кг каждый, стержень повернулся так, что расстояние между центрами большого и малого шаров оказалось рав-

ным 15 см. По углу закручивания нити подвеса определили вращающий момент, действующий на стержень. Он оказался равным $2,20 \cdot 10^{-9}$ Н·м. По этим данным определите значение гравитационной постоянной.

3. Пользуясь законом всемирного тяготения, докажите, что все тела независимо от их масс падают под действием силы тяготения с одним и тем же ускорением.

§ 7.14. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

I. Открытие закона всемирного тяготения позволило объяснить закономерности движения планет вокруг Солнца, открытые И. Кеплером, в частности третий закон (см. § 6.7).

Для простоты будем рассматривать орбиты движения планет как круговые (на самом деле они эллиптические, но близкие к круговым). Если обозначить массу планеты через m , массу Солнца через M , расстояние между ними через R , то очевидно, что закон всемирного тяготения $F = GmM/R^2$ определит силу, которая удерживает планету на орбите и сообщает ей центростремительное ускорение. Итак,

$F = \frac{mv^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}$, где v — скорость движения планеты по орбите. Мы

уже знаем, что $v = 2\pi R/T$. Подставив значение скорости планеты в уравнение для сил и сократив общий множитель (масса планеты), получим $4\pi^2 R/T^2 = GM/R^2$, или $T^2/R^3 = 4\pi^2/GM$. Это и есть третий закон Кеплера. Поскольку правая часть уравнения есть величина постоянная, то для любых двух планет можно написать:

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3}.$$

II. В § 7.13 мы пользовались третьим законом Кеплера для обоснования гипотезы Ньютона о законе тяготения. Здесь же мы показали, как третий закон Кеплера можно вывести на основе второго закона Ньютона и закона всемирного тяготения. И никакого порочного круга в наших рассуждениях нет. Дело в том, что после опытов Г. Кавендиша, экспериментально подтвердивших справедливость закона всемирного тяготения, этот закон мы можем рассматривать в качестве эмпирического, вытекающего из эксперимента, независимо от того, какими догадками пользовался И. Ньютон при поисках этой закономерности. Поэтому вывод третьего закона Кеплера из закона всемирного тяготения можно закономерно рассматривать как одно из подтверждений правильности законов динамики.

Заметим также, что на основе законов Ньютона и закона тяготения можно вывести также первый и второй законы Кеплера. Это служит еще одним веским доводом в пользу справедливости изучаемых вами законов динамики.

III. Законы Ньютона и закон всемирного тяготения позволили рассчитать закономерности движения планет, их естественных и искусственных спутников, а также возмущения, вызванные воздействием планет друг на друга. Анализ этого вопроса позволит и нам рассмотреть историю открытия таких планет, как Нептун и Плутон.

Второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения позволяют предвидеть траектории движения планет и их спутников, а также рассчитывать траектории космических кораблей и их координаты в любые заданные моменты времени. В самом деле, если известны массы двух тяготеющих тел и расстояния между ними, то можно вычислить силу взаимного притяжения, а следовательно, и ускорения этих тел. По ускорениям взаимодействующих космических тел и расстояниям между ними можно определить периоды обращения и другие параметры. Понятно, что это сравнительно легко сделать для двух тяготеющих тел, т. е. когда другие тела находятся на больших расстояниях и их притяжением можно пренебречь.

Приближенное решение задачи о движении планет Солнечной системы возможно благодаря счастливому стечению обстоятельств. А именно орбиты планет мало отличаются от окружностей, движение всех планет происходит почти в одной плоскости, массы планет малы по сравнению с массой Солнца, расстояния между планетами очень велики по сравнению с их размерами.

IV. Однако реально оказывается, что наблюдаются отклонения параметров движения космических тел, в том числе и планет, от расчетных. Такие отклонения называются возмущениями. Во всех расчетах движения космических тел (планет, астероидов, комет, космических кораблей) приходится учитывать взаимодействие не только с центральным телом (например, с Солнцем), но и с другими телами.

Нередко в физике случается так, что несовпадение расчетного параметра с наблюдаемым в действительности приводит к открытию. Так случилось и при изучении движения планет и расчете их координат в заданные моменты времени.

Путем наблюдений в 1781 г. английский астроном У. Гершель открыл новую планету. Ее назвали Уран. Она оказалась более удаленной от Солнца, чем Сатурн. До этого считалось, что Сатурн является самой удаленной планетой Солнечной системы.

Астрономы разных стран, в том числе и России, обратили внимание на то, что Уран движется не так, как ему следовало бы двигаться по законам динамики. Возмущение движения Урана позволило предсказать существование за ним еще одной невидимой планеты.

Вычисления Дж. Адамса (Англия) и У. Леверье (Франция) позволили определить координаты возмущающей планеты. У. Леверье сообщил в Берлинскую обсерваторию координаты предполагаемой планеты. Получив сообщение 23 сентября 1846 г., немецкий астроном И. Галле в первый же вечер увидел в телескоп возмущающую планету. Ее координаты на небе всего лишь на один градус не совпали с предсказаниями У. Леверье. Новую планету назвали Нептун. Это

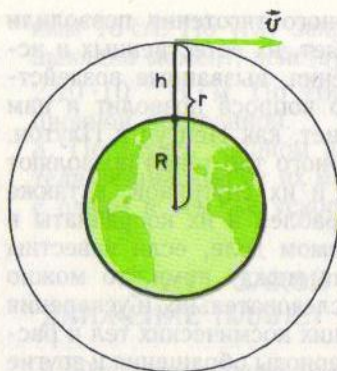


Рис. 7.30

был триумф небесной механики. Говорили, что открытие сделано «на кончике пера».

V. Дальнейшие наблюдения за движением планет показали, что возмущения наблюдаются в движении не только Урана, но и Нептуна. Эти возмущения привели американского астронома П. Ловелла к мысли, что за Нептуном есть еще одна, девятая планета. В 1930 г. ее увидел в телескоп К. Томбо. Эту планету назвали Плутон.

VI. Закон тяготения и второй закон Ньютона позволили определить *первую космическую скорость*. Так на-

зывается скорость, которую надо сообщить ракете, чтобы она обращалась по круговой орбите вокруг Земли. Поскольку запуск ракеты осуществляется с поверхности Земли, то сила тяготения равна силе тяжести: $F = P = mg$. Сила тяготения сообщает ракете центростремительное ускорение $a_{ц} = v^2/r$, где $r = R + h$ (рис. 7.30). Обычно высота h много меньше радиуса Земли $R = 6370$ км, а космические корабли обращаются вокруг Земли на высотах, приблизительно равных 300—400 км. Поэтому полагают, что расстояние $r \approx R$, следовательно, центростремительное ускорение космического корабля $a_{ц} = v^2/R$. Из равенства $F = P$ следует $ma_{ц} = mg$. Сократив массы и подставив $a_{ц} = v^2/R$, получим $v^2/R = g$. Преобразовав это выражение, найдем *первую космическую скорость*:

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,81 \cdot 6,37 \cdot 10^6 \text{ м/с}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

С учетом сопротивления воздуха и некоторых других соображений полагают, что первая космическая скорость на Земле равна 8 км/с.

Сложнее вычислить *вторую космическую скорость*, т. е. ту скорость, которую надо сообщить ракете, чтобы она преодолела силу тяготения Земли и улетела в космос (например, на Луну, Марс или Венеру). Значение второй космической скорости мы приведем без вывода: $v_2 = \sqrt{2gR} = 11,2$ км/с.

Именно из-за больших значений этих двух космических скоростей космические корабли приходится делать многоступенчатыми. Одноступенчатому кораблю с нужным полезным грузом невозможно сообщить первую, а тем более вторую космическую скорость.

Вопросы для самопроверки

1. Как формулируется третий закон Кеплера?
2. Какая сила сообщает телу центростремительное ускорение при движении планет вокруг Солнца?

3. Как из второго закона Ньютона и закона всемирного тяготения теоретически вывести третий закон Кеплера?

4. Как были открыты планеты Нептун и Плутон?

Упражнения

1. Пользуясь законом Кеплера и зная период обращения Луны вокруг Земли ($T_L = 27$ сут), рассчитайте радиус орбиты искусственного спутника Земли, который бы «висел фонарем» над некоторым пунктом поверхности Земли, т. е. обращался бы вокруг Земли синхронно по отношению к ее суточному вращению ($T = 1$ сут).
2. Поскольку среднее расстояние от Земли до Солнца равно 1 а.е., а период обращения Земли вокруг Солнца равен 1 г., то для планет Солнечной системы $R^3/T^2 = 1$. Определите расстояние от Марса до Солнца (в астрономических единицах). Период обращения Марса вокруг Солнца равен 1,88 земных лет.
3. Выведите формулу третьего закона Кеплера из закона всемирного тяготения.
4. Определите первую и вторую космические скорости на Луне, если ускорение свободного падения там в 6 раз меньше, чем на Земле, а радиус Луны равен 0,272 радиуса Земли.
5. Определите первую и вторую космические скорости на Марсе, если ускорение свободного падения на нем $3,76 \text{ м/с}^2$, а радиус равен $3,39 \cdot 10^6 \text{ м}$.

§ 7.15. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ И ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИРОДЫ

I. Открытие закона всемирного тяготения позволило понять строение Солнечной системы, определить массы планет и Солнца, предсказать существование не видимых невооруженным глазом планет, объяснить многие явления природы, например такие, как *приливы* и *отливы* в океанах. Этот закон позволил ответить на вопросы: почему Земля, планеты и Солнце имеют форму шара, несколько сплюснутого у полюсов? Почему у некоторых планет есть атмосфера, в частности у Земли, а у других планет нет? Казалось бы, это совсем не связанные между собой вопросы. Однако в их основе лежит одна и та же причина — явление всемирного тяготения.

II. Приливы и отливы наблюдаются у берегов океана. Дважды в сутки вода приливает на берег и дважды в сутки отступает. В некоторых странах во время прилива там, где берег пологий, вода подходит, а при отливе отходит на несколько километров от берега.

Приливы и отливы относятся к числу возобновляемых экологически чистых источников энергии. В 1967 г. во Франции пущена приливная электростанция. Опытная приливная электростанция в России пущена в 1968 г. вблизи Мурманска.

Чем же объясняется это явление? Покажем, что приливная волна в океане связана с тяготением со стороны Луны. Вследствие тяготения со стороны того полушария Земли, которое ближе к Луне, вода океана притягивается с большей силой, чем сама Земля. Вода с противоположной стороны Земли тоже притягивается к Луне, но слабее, чем сама Земля. На рисунке 7.31 показаны силы F_1 и F_2 , действующие со стороны Луны на слой воды, и сила \vec{F} , действующая на Землю. Здесь же обозначены соответствующие ускорения \vec{a}_1 , \vec{a}_2 и \vec{a} .

Все эти силы и ускорения показаны в системе отсчета XOY , связанной с Луной. Однако мы живем на Земле, и нас интересуют соответствующие ускорения в системе отсчета $X'O'Y'$, связанной с Землей. Они показаны на рисунке 7.32. Очевидно, что ускорение Земли в этой системе отсчета равно нулю. Проекция ускорения слоя A_1 , который ближе к Луне, равна $a'_1 = a_1 - a > 0$, а проекция ускорения слоя воды A_2 , расположенного на обратной стороне Земли, $a'_2 = a_2 - a < 0$. Как видно, относительно Земли эти ускорения направлены в разные стороны: слева вода смещается относительно Земли, а справа Земля смещается относительно воды.

Если бы Земля была равномерно покрыта водой, то в точках A_1 и A_2 уровень воды повысился бы (прилив), а в точках B_1 и B_2 снизился бы (отлив). Через 6 ч, когда Земля поворачивается на 90° , прилив наблюдался бы в точках B_1 и B_2 , а отлив — в точках A_1 и A_2 . Далее процесс повторялся бы с такой же периодичностью (см. рис. 7.32). Однако наличие континентов существенно искажает эту картину. И все же даже наша упрощенная модель позволяет понять суть явления.

III. Форма Земли, планет Солнца и других космических тел несколько отличается от шарообразной. Выясним, в чем тут дело. Земля совершает суточное вращение вокруг своей оси. Вследствие этого ускорение свободного падения на разных широтах Земли оказывается различным. У полюсов сила тяжести $P = mg$, и ускорение свободного падения у полюсов $g_{\text{пол}}$ определяется строго по закону всемирного тяготения:

$$P_{\text{пол}} = F,$$

или

$$mg = GMm/R^2,$$

откуда

$$g_{\text{пол}} = GM/R_{\text{пол}}^2.$$

На экваторе тело вместе с Землей совершает круговое движение. Сила тяготения сообщает телу не только ускорение сво-

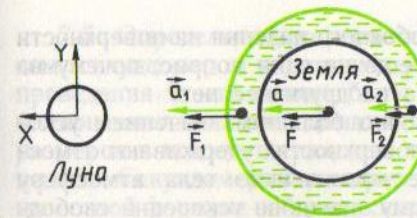


Рис. 7.31

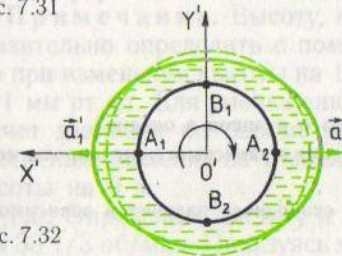


Рис. 7.32

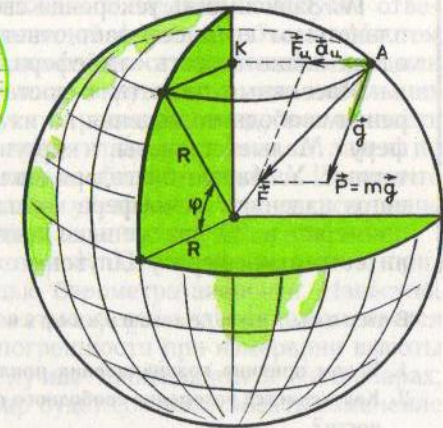


Рис. 7.33

бодного падения $g_{\text{экр}}$, но и центростремительное ускорение $a_{\text{ц}} = 4\pi R/T^2$. По второму закону Ньютона имеем

$$F = m(g_{\text{экр}} + a_{\text{ц}}),$$

или

$$GM/R_{\text{экр}}^2 = m(g_{\text{экр}} + 4\pi^2 R_{\text{экр}}/T^2).$$

Следовательно, на экваторе ускорение свободного падения равно:

$$g_{\text{экр}} = GM/R_{\text{экр}}^2 - 4\pi^2 R_{\text{экр}}/T^2 \approx g_{\text{пол}} - 4\pi^2 R/T^2.$$

Труднее найти ускорение свободного падения в местности на произвольной широте. Мы не станем делать расчет, а покажем лишь направления сил и ускорения по рисунку 7.33. Здесь точка A движется по окружности с центром в точке K и радиусом $r = R \cos \varphi$, где φ — широта местности. Как видно, сила тяготения, \vec{F} , направленная к центру Земли, может быть разложена на две составляющие: силу тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$ и силу $\vec{F}_{\text{ц}} = ma_{\text{ц}}$, модуль которой равен $F_{\text{ц}} = 4\pi^2 mr/T^2$.

Центростремительное ускорение при одном и том же периоде обращения зависит от широты местности. Соответствующим образом от широты местности зависит и ускорение свободного падения.

Поскольку от полюса к экватору сила тяжести и ускорение свободного падения несколько уменьшаются, то происходит сплюсывание планеты у полюсов и расплывание в сторону у экватора.

IV. Зависимость ускорения свободного падения на поверхности планеты от ее массы дает ответ еще на один вопрос: почему на одних планетах есть атмосфера, а на других ее нет?

Массивные планеты с достаточно большим значением ускорения свободного падения на их поверхностях удерживают атмосферу. Малые планеты и другие космические тела атмосферу теряют. У Марса, благодаря малому значению ускорения свободного падения, атмосфера весьма разреженная: ее плотность примерно в 20 раз меньше плотности земной атмосферы. Вряд ли есть атмосфера у Плутона.

Вопросы для самопроверки

1. В чем причина возникновения приливов и отливов в океане?
2. Как меняется ускорение свободного падения в зависимости от широты местности?
3. Какова причина изменения ускорения свободного падения в зависимости от широты местности?
4. Почему Солнце и все планеты несколько сплюснуты у полюсов?
5. Почему на одних планетах есть атмосфера, а на других ее нет или она очень разрежена?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

7.1. С помощью рулетки или сантиметровой измерительной ленты определите координаты точки подвеса комнатного светильника по отношению к системе отсчета, связанной с одним из нижних углов комнаты. Координатные оси направьте вдоль стен комнаты.

7.2. Изобразите траекторию движения иголки звукоснимателя электрофона относительно грампластинки и относительно корпуса электрофона.

7.3. Прodelайте опыт Г. Галилея: убедитесь в том, что пути, проходимые в последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательный ряд нечетных чисел. Для постановки опыта используйте в качестве наклонного желоба логарифмическую линейку без движка или две дощечки, сбитые так, чтобы движущийся между ними шарик не проваливался. Наклонная плоскость должна составлять малый угол с плоскостью стола, для того чтобы шарик скатывался медленно. Положив шарик сверху желоба, отпустите его и карандашом отметьте местоположение шарика под счет трехзначных чисел (время произношения трехзначного числа примерно равно 1 с). Пути, проходимые при равноускоренном движении за последовательные равные промежутки времени, определите по миллиметровой шкале на линейке.

7.4. Выпустите одновременно с одной и той же высоты вначале два пустых, а затем пустой и полный коробки спичек. Какой из них упадет раньше? Объясните наблюдаемые явления.

7.5. Определите ускорение свободного падения, пользуясь отвесом, секундомером и камнями различной формы и объема. Местом проведения опыта может быть высокий мост, глубокий овраг или балкон многоэтажного дома. Возьмите округлый камень небольших размеров и под счет «раз, два, пуск» предоставьте ему возможность падать. Секундомером измерьте время падения камня, а затем по известной формуле найдите ускорение свободного падения. Повторите опыт несколько раз с разными телами и убедитесь в том, что ускорение свободного падения не зависит от массы падающего тела.

Примечание. Высоту, с которой падает камень, можно приблизительно определить с помощью барометра-анероида. Известно, что при изменении высоты на 12 м атмосферное давление изменяется на 1 мм рт. ст. Для уменьшения погрешности при измерении высоты отсчет давления по барометру лучше производить в миллибарах; изменению давления на 1 миллибар будет соответствовать изменение высоты на 9 м.

7.6. Определите частоту и период обращения диска электрофона при 33 1/3 об/мин. Пользуясь миллиметровой линейкой и зная период обращения диска электрофона, определите скорость иглы относительно грампластинки в крайних точках диска.

7.7. Пользуясь миллиметровой линейкой и зная период обращения диска электрофона, найдите центростремительное ускорение крайних точек диска.

7.8. Определите скорость точки на ободе колеса велосипеда при медленном вращении педали с периодом 5 с. Предварительно определите по отношению числа зубьев большой и малой шестерен передаточное число и измерьте радиус обода.

7.9. Поместите между спицами колеса велосипеда полоски из бумаги с заголовками газет около втулки и обода. Вращая колесо, убедитесь в том, что скорость движения бумажек зависит от радиуса, т. е. от расстояния до оси вращения.

7.10. Смочите шину колеса водой и по отрывающимся каплям жидкости определите, как направлен вектор скорости в каждой точке траектории.

7.11. Пользуясь качелями или «гигантскими шагами» в детском парке, шестом или канатом на школьной спортивной площадке и часами с секундной стрелкой, определите период колебания человека, его скорость, центростремительное ускорение. Радиус вращения или амплитуду измерьте сантиметровой лентой.

7.12. На диск электрофона положите шарик, включите электрофон и наблюдайте за поведением шарика в зависимости от того, на каком расстоянии от оси вращения он расположен, а также в зависимости от частоты вращения диска (если электрофон рассчитан на две частоты).

7.13. Определите, как изменяются импульсы двух шариков в результате взаимодействия. Для постановки опыта возьмите два одинаковых стальных шарика и положите их на желоб, например на логарифмическую линейку с выдвинутым движком. Сообщите одному

из шариков скорость и проследите за поведением шариков после взаимодействия. Сообщите обоим шарикам скорости, но такие, чтобы второй догонял первый, и снова проследите за изменением скоростей шариков после взаимодействия. Опишите, как в этих опытах изменяются импульсы шариков.

7.14. Определите начальную скорость камня, мяча или другого спортивного снаряда, брошенного под углом к горизонту. Для этого измерьте дальность и время полета снаряда.

7.15. Положите на край стола небольшой предмет, например ластик или коробок спичек. Столкните предмет со стола и зафиксируйте место, где он ударился о пол. Измерив высоту стола над полом и дальность полета, найдите скорость, которую вы сообщили телу при толчке.

7.16. К веревке длиной около 0,5 м привяжите крепко небольшое тело массой около 200—300 г. Вращая это тело на веревке в горизонтальной плоскости над головой, оцените по мускульному усилию, как меняется натяжение веревки при изменении частоты вращения, изменение натяжения при той же частоте, но от массы вращающегося тела. Сопоставьте результат опыта с известной вам формулой.

Примечание. Опыт следует проделать не в квартире, а во дворе.

7.17. Слепите из пластилина два шарика разной массы и подвесьте их на нитях одинаковой длины на гвоздике в дверном проеме. Отведите меньший шарик на некоторую высоту h_1 и измерьте ее. Отпустив шарик, дайте ему столкнуться неупруго с большим шариком. Измерьте высоту h_2 , на которую поднялись оба слипшихся шарика. Пользуясь законом сохранения энергии, определите по высотам h_1 и h_2 скорость v_1 меньшего шарика в момент соударения и скорость v_2 двух слипшихся шариков после соударения. Затем, используя закон сохранения импульса, определите отношение масс большего и меньшего шариков.

При проведении опыта проследите, чтобы шарики сталкивались «в лоб». Полученный результат можно проверить, взвесив шарики.

Глава 8. АТОМНОЕ ЯДРО. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

§ 8.1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

I. В 1896 г. А. Беккерель обнаружил, что уран самопроизвольно испускает какое-то неизвестное невидимое излучение, проникающее сквозь картон и бумагу и действующее на фотопластинку. В 1898 г. П. Кюри и М. Склодовская-Кюри выделили из урановой смоляной руды два новых химических элемента, названные ими *радий* (слово «радий» образовано от латинского слова *radiare* — излучать, испускать лучи) и *полоний* (в честь Польши, откуда родом была М. Склодовская). Оказалось, что эти вещества тоже самопроизвольно испускают невидимое излучение, как и уран, но их активность в несколько тысяч раз больше.

Годом позже, в 1899 г., Э. Резерфорд, пропустив излучение радия через сильное магнитное поле, обнаружил, что оно разделяется на два компонента: положительно заряженный, названный *альфа-излучением*, и отрицательно заряженный, названный *бета-излучением*.

В 1900 г. обнаружили, что существует еще третий нейтральный компонент, названный *гамма-излучением*. На рисунке 8.1 показана схема установки, с помощью которой были открыты три компонента радиоактивного излучения. Крупинка радия помещалась в свинцовый контейнер 1, из отверстия которого испускалось исследуемое излучение 2. Проходя между полюсами сильного магнита, заряженные альфа- и бета-частицы отклонялись в противоположных направлениях, а на нейтральное гамма-излучение магнитное поле не действовало. Излучение попадало на фотопластинку 3 и вызывало почернение фотоэмульсии в трех областях.

II. Дальнейшие исследования показали, что альфа-частицы — это дважды ионизованные атомы гелия, иными словами, ядра гелия.

Было также доказано, что бета-частицы — это очень быстрые электроны, кинетическая энергия которых в зависимости от вещества, испускающего их, принимает значения от нескольких мегаэлектрон-вольт до десятков килоэлектрон-вольт. Гамма-излучение — это кванты электромагнитного излучения (фотоны) с аналогичными значениями энергии.

Самопроизвольное превращение атомного ядра, сопровождающееся испусканием заряженных частиц, нейтронов и фотонов называется *радиоактивностью*.

III. Радиоактивный распад происходит самопроизвольно, без внешних воздействий. Взаимодействием между атомными ядрами также можно пренебречь, поскольку расстояние между атомами в ве-

Рис. 8.1

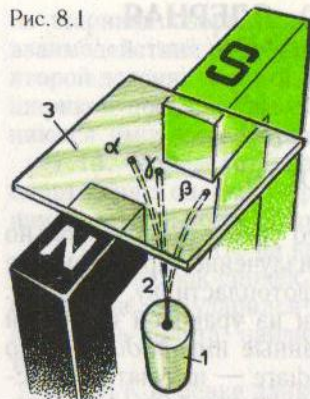
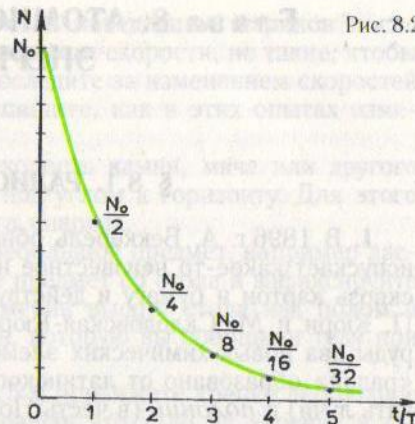


Рис. 8.2



естве не меньше 10^{-10} м, а радиус действия ядерных сил равен 10^{-15} м, т. е. в сто тысяч раз меньше (см. § 8.5).

В результате скорость распада конкретного радиоактивного изотопа не зависит от массы вещества, т. е. от числа ядер. Для каждого радиоактивного изотопа существует определенное время, называемое *периодом полураспада* $T_{1/2}$, в течение которого распадается половина от наличного числа ядер.

Если в некоторый момент времени $t_0=0$, которое мы называем начальным, изотоп состоит из большого числа N_0 ядер, то через время $t_1=T_{1/2}$ останется нераспавшимся число $N_1=N_0/2$ ядер. Через время $t_2=2T_{1/2}$ останется нераспавшимся число $N_2=N_1/2=N_0/4$ ядер, через время $t_3=3T_{1/2}$ останется число $N_3=N_2/2=N_0/8$ нераспавшихся ядер и т. д. Через время $t_n=nT_{1/2}$ останется нераспавшихся ядер

$$N=N_0 2^{-n}=N_0 2^{-t/T_{1/2}}.$$

Данное выражение называется *законом радиоактивного распада*. Он был открыт Э. Резерфордом и Ф. Содди в 1902 г. График этой зависимости изображен на рисунке 8.2.

Активностью радиоактивного препарата называется число распадов, происходящих за единицу времени, иными словами, *скорость радиоактивного распада*. Активность пропорциональна числу ядер (т. е. массе препарата) и обратно пропорциональна периоду полураспада.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется радиоактивностью? Как она была обнаружена?
2. Какие виды радиоактивных излучений вам известны? Как они были обнаружены?

3. Что называется периодом полураспада?

4. Как записывается закон радиоактивного распада? Постройте его график.

§ 8.2. АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

I. Вы знаете, что атом — мельчайшая частица вещества (микрочастица), являющаяся наименьшей частью химического элемента и носителем его химических свойств. Вспомним его основные характеристики и свойства, изученные в VIII классе.

Серию опытов по рассеянию α -частиц в тонкой металлической фольге провели в 1911 г. Э. Резерфорд и его сотрудники Г. Гейгер и Э. Марсен. Эти опыты доказали: атом состоит из маленького массивного положительно заряженного ядра, окруженного оболочкой, состоящей из отрицательно заряженных элементов.

II. Дальнейшие исследования, в особенности одного из учеников Э. Резерфорда — Г. Мозли, позволили выяснить, что заряд атомного ядра $q_{\text{я}}$ равен произведению порядкового номера Z элемента в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева на элементарный электрический заряд e :

$$q_{\text{я}}=Ze,$$

где $e=1,60217733 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд, равный модулю заряда электрона.

Таким образом, оказалось, что порядковый номер химического элемента имеет глубокий физический смысл: он определяет заряд атомного ядра и тем самым число электронов, окружающих ядро. Поэтому число Z называют *зарядовым числом*.

III. Так как химические свойства того или иного элемента определяются числом электронов, расположенных на внешней электронной оболочке и способных принять участие в создании химических связей, зарядовое число является важнейшей характеристикой химического элемента. Зарядовым числом определяется распределение электронов на электронных оболочках атома и, следовательно, все химические свойства того или иного химического элемента.

IV. Размер ядра атома значительно (на несколько порядков) меньше размера самого атома. Размер атома мы можем найти, учитывая, что в металлах атомы достаточно плотно упакованы. Так, масса количества вещества 1 кмоль алюминия равна 27 кг, плотность алюминия равна $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Следовательно, объем количества вещества 1 кмоль алюминия равен 0,01 м³. Так как такое количество вещества содержит $6,02 \cdot 10^{26}$ частиц, то объем и радиус одного атома алюминия равны:

$$V_{\text{ат}} = \frac{0,01 \text{ м}^3}{6,02 \cdot 10^{26}} = 1,67 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3,$$

$$R_{\text{ат}} \approx \sqrt[3]{1,67 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3} = 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Таковы размеры любых других атомов (примерно 10^{-10} м).

Радиус ядра, согласно опытам Э. Резерфорда, составляет 10^{-14} м, например для алюминия $R_{\text{яд}} = 4,5 \cdot 10^{-15}$ м. Следовательно, радиус атома больше радиуса ядра примерно в 10^4 – 10^5 раз. Так, для алюминия

$$\frac{R_{\text{ат}}}{R_{\text{яд}}} = \frac{2,6 \cdot 10^{-10}}{4,5 \cdot 10^{-15}} = 5,8 \cdot 10^4.$$

Чтобы оценить этот масштаб, представим себе, что мы строим модель атома, взяв в качестве модели ядра булавочную головку диаметром около 1 мм. Тогда моделью электронной оболочки атома окажется пустая сфера диаметром около $6 \cdot 10^4$ мм = 60 м. Это высота шестнадцатизэтажного здания! Вот как наглядно выглядит соотношение размеров атома и его ядра в данной модели.

Вопросы для самопроверки

1. Как определить заряд атомного ядра?
2. Как определить число электронов в атоме?
3. Во сколько раз приблизительно размер атома больше размера атомного ядра?

Упражнения

1. Определите заряд атомов водорода, гелия, железа, урана.
2. Определите число электронов в электронной оболочке атомов водорода, гелия, железа, урана.
3. Сколько электронов содержит однократно ионизованный ион натрия; двукратно ионизованный ион меди? (У к а з а н и е. Учтите, что металлы образуют положительно заряженные ионы.)
4. Сколько электронов содержит однократно ионизованный ион хлора; трехкратно ионизованный ион фосфора? (У к а з а н и е. Учтите, что неметаллы, как правило, образуют отрицательно заряженные ионы.)

§ 8.3. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

I. Очевидно, что в ядерной физике, как и во всех других разделах — механике, электродинамике, термодинамике, все величины могут быть выражены в единицах Международной системы единиц (СИ). Однако оказалось более удобным пользоваться в ядерной физике некоторыми специальными единицами. Это относится к единицам длины, массы и энергии.

В качестве единицы длины в ядерной физике используется *фемтометр* (фм):

$$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}.$$

Часто вместо фемтометра используют термин *ферми* — в честь Э. Ферми, известного ученого, много сделавшего для развития современной физики.

II. В качестве единицы массы в атомной и ядерной физике используется *атомная единица массы* (а.е.м.):

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Атомная единица массы равна 1/12 массы атома изотопа углерода атомной массой 12.

Постоянной Авогадро называется число частиц (атомов, ионов, молекул), содержащихся в одном моле вещества. По современным данным, постоянная Авогадро

$$N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 6,0221367 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}.$$

Легко убедиться, что численное значение 1 а.е.м. равно единице, деленной на постоянную Авогадро:

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{N_A} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} = \frac{1}{6,0221367 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

III. В качестве единиц энергии в атомной физике применяются *электрон-вольт* (эВ), *килоэлектрон-вольт* (кэВ) и *мегаэлектрон-вольт* (МэВ). *Электрон-вольт* равен кинетической энергии, которую приобретает в электрическом поле напряжением, равным 1 В, частица, несущая на себе элементарный электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл: $1 \text{ эВ} = eU = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

IV. Как показал в 1905 г. А. Эйнштейн, между массой m системы частиц и ее энергией покоя (т. е. внутренней энергией E_0) существует прямая пропорциональная зависимость:

$$E_0 = mc^2,$$

где $c \approx 3,00 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. А это означает, что если за счет каких-либо процессов внутренняя энергия системы изменится на величину ΔE_0 , то соответственно и масса системы изменится на величину

$$\Delta m = \Delta E_0 / c^2, \text{ или } \Delta E_0 = \Delta mc^2.$$

Заметим, что в этих формулах масса выражена в килограммах, а энергия — в джоулях. Однако в ядерной физике, как указывалось

выше, массу принято выражать в атомных единицах массы, а энергию — в мегаэлектрон-вольтах.

Чтобы найти соответствующее соотношение, представим себе, что масса системы изменилась на величину, равную одной атомной единице массы, т. е. $\Delta m = 1$ а.е.м. На сколько же изменится ее внутренняя энергия? Оказывается, что

$$\frac{\Delta E_0}{\Delta m} = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$$

Чтобы получить результат с точностью до четырех значащих цифр, следует исходные данные записать с точностью до пяти значащих цифр, тогда $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $1 \text{ МэВ} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

Следовательно, имеем

$$\begin{aligned} \Delta E_0 &= \Delta mc^2 = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 2,9979^2 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = \\ &= 14,924 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = \frac{14,924 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}}{1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ}} = 931,5 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Итак, изменение массы системы на 1 а.е.м. равносильно изменению ее внутренней энергии на 931 МэВ. Это позволяет выражать массу частиц в микромире в единицах энергии. Так, масса электрона $m_e = 9,10939 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.} = 0,511 \text{ МэВ}$, а масса протона — ядра атома водорода $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,0073 \text{ а.е.м.} = 938,27 \text{ МэВ}$.

V. Почему же мы не обнаруживаем изменения массы системы при тепловых и химических реакциях, хотя внутренняя энергия системы при этих реакциях изменяется? Оказывается, что изменения массы при этих реакциях столь малы, что ими можно пренебречь.

Так, при конденсации пара массой 1 кг выделяется энергия, равная $2,256 \cdot 10^6 \text{ Дж}$. Соответствующее изменение массы $\Delta m = \Delta E_0/c^2 = 2,256 \cdot 10^6 : 9 \cdot 10^{16} \text{ кг} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ кг}$. Никакой прибор такое малое изменение массы обнаружить не может!

Аналогично при химической реакции во время сгорания керосина массой 1 кг выделяется энергия, равная $4,31 \cdot 10^7 \text{ Дж}$. Изменение массы $\Delta m = 4,31 \cdot 10^7 : 9 \cdot 10^{16} \text{ кг} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$. И это изменение массы экспериментально обнаружить невозможно.

Именно поэтому при описании тепловых и химических реакций можно пользоваться **законом сохранения массы вещества: при любых тепловых и химических явлениях суммарная масса реагирующих веществ остается неизменной (закон Ломоносова — Лавуазье)**. И только в ядерных реакциях изменение энергии системы столь велико, что изменение массы ядер оказывается вполне заметным и измеримым.

К этому вопросу мы вернемся в § 8.5.

Вопросы для самопроверки

1. Что принято за единицу длины в ядерной физике? Каково ее соотношение с метром?
2. Что принято за единицу массы в атомной и ядерной физике?
3. Каково соотношение между постоянной Авогадро и атомной единицей массы?
4. Что принято в качестве единицы энергии в атомной и ядерной физике?
5. Каково соотношение между изменением массы и внутренней энергии системы частиц?

Упражнения

1. Для плавления льда массой 1 кг при температуре 0°C необходимо ему сообщить количество теплоты, равное 332,4 кДж. На сколько при этом возрастет масса воды?
2. При испарении пара массой 1 кг при температуре 100°C поглощается количество теплоты, равное 2,256 МДж. На сколько при этом меняется масса воды?
3. Можно ли путем взвешивания определить изменение массы при плавлении льда массой 1 кг или при конденсации пара массой 1 кг, если чувствительность весов не превосходит 0,1 мг?
4. Масса электрона равна $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, масса протона равна $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Выразите эти величины в атомных единицах массы и в мегаэлектрон-вольтах.
5. При переходе атома водорода со второго на первый энергетический уровень испускается квант, соответствующий первой линии в серии Лаймана (лайман-альфа). Определите частоту этого излучения, энергию кванта и уменьшение массы атома водорода при этом процессе. Какую часть массы атома водорода составит найденное вами значение изменения массы? Масса атома водорода равна $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

§ 8.4. СТРОЕНИЕ ЯДРА

I. В 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул идею, согласно которой ядро атома водорода представляет собой элементарную частицу — протон, — входящую в состав других атомных ядер. В 1919 г. эта идея была подтверждена экспериментально. Были получены протоны при бомбардировке ядер азота альфа-частицами.

Однако из одних протонов ядро состоять не может. Действительно, заряд протона равен элементарному заряду e , так как зарядовое число протона равно единице ($Z=1$). Атомная масса протона равна 1,0073 а.е.м., т. е. приблизительно одной атомной единице массы. Следовательно, если бы ядро любого элемента состояло из Z протонов, то заряд ядра равнялся бы Ze , что правильно. Но тогда масса ядра должна была бы быть приблизительно равна Z атомных

единиц, однако на самом деле массы ядер всех элементов гораздо больше.

Так, например, у гелия зарядовое число $Z=2$, а масса атома $M=4,0026$ а.е.м., у кислорода зарядовое число $Z=8$, а масса $M=15,999$ а.е.м., у железа зарядовое число $Z=26$, а масса $M=55,847$ а.е.м. и т.д.

II. В 1930 г. было обнаружено, что при облучении бериллия альфа-частицами возникает особое излучение. Оно не отклоняется ни в электрическом, ни в магнитном поле, следовательно, оно является электрически нейтральным. В 1932 г. один из учеников Э. Резерфорда — Дж. Чэдвик доказал, что это излучение представляет собой поток нейтральных частиц, масса которых близка к массе протона. Существование такой частицы было предсказано еще в 1920 г. самим Э. Резерфордом. Эта частица была названа *нейтроном*.

Масса свободного нейтрона оказалась немного больше массы протона: $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,0087 а.е.м. = 939,57 МэВ.

В том же году Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра*. Эта модель была затем полностью подтверждена всеми последующими исследованиями ядерных превращений.

Согласно этой модели любое атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, связанных между собой ядерными силами (сильными взаимодействиями). Обе частицы оказались абсолютно идентичными относительно ядерных взаимодействий, поэтому они получили общее название — *нуклоны*.

III. Нетрудно убедиться, что число протонов в ядре равно зарядовому числу Z (т. е. порядковому номеру элемента в таблице Менделеева). Тем самым обеспечивается заряд ядра $q_{\text{я}} = Ze$, а в нейтральном атоме на его оболочках располагается Z электронов.

Число нейтронов в ядре обозначим N . Так как массы протона и нейтрона приблизительно равны 1 а.е.м., то сумма числа протонов и числа нейтронов приблизительно равна массе ядра M , выраженной в тех же атомных единицах массы:

$$M \approx (Z+N) \text{ а.е.м.}$$

IV. Суммарное число протонов и нейтронов называют *массовым числом* A :

$$A = Z + N.$$

Обобщенно ядра атомов часто называют нуклидами. Нуклид обозначают символом A_ZX , где X — символ химического элемента. Для обозначения конкретного ядра используется символ атома с указанием сверху конкретного значения массового числа A , а снизу — зарядового числа Z : ${}^4_2\text{He}$, ${}^{80}_{35}\text{Br}$, ${}^{108}_{47}\text{Ag}$ и т. д.

V. В ядрах одного и того же химического элемента (например, углерода) число нейтронов может быть различным, а число протонов

всегда одно и то же. Например, в ядрах углеродов число протонов всегда равно 6, а число нейтронов может быть равно 5, 6, 7, 8, 9, 10, следовательно, можно записать: ${}^{11}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{15}_6\text{C}$, ${}^{16}_6\text{C}$, т. е. верхняя запись указывает сумму протонов и нейтронов.

Химические свойства атома всецело связаны с числом электронов в атоме, следовательно, с зарядом ядра (числом протонов) и не зависят от массового числа и количества нейтронов в ядре. *Нуклиды (ядра), имеющие одинаковое число протонов и разное число нейтронов, называют изотопами*. Изотопы занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов. Отсюда и понятие «изотоп». (Слово «изотоп» образовано от греческих слов *isos* — одинаковый и *topos* — место.)

VI. В таблице 8.1 приведены массы трех элементарных частиц и массы нейтральных атомов изотопов некоторых химических элементов.

Таблица 8.1

Частица Химический элемент	Масса		Химический элемент	Масса	
	а.е.м.	МэВ		а.е.м.	ГэВ
Электрон ${}^0_{-1}e$	0,0005486	0,5110209	Углерод ${}^{12}_6\text{C}$	12,000000	11,177932
Протон 1_1p	1,0072765	938,27805	Углерод ${}^{13}_6\text{C}$	13,003354	12,112550
Нейтрон 1_0n	1,008665	939,5714	Уран ${}^{235}_{92}\text{U}$	235,04418	21,894232
Водород ${}^1_1\text{H}$	1,007825	938,78898	Уран ${}^{238}_{92}\text{U}$	238,05113	22,174328
Дейтерий ${}^2_1\text{H}$	2,014102	1876,136	Нептуний ${}^{239}_{93}\text{Np}$	239,05320	22,267670
Тритий ${}^3_1\text{H}$	3,016062	2809,4617	Плутоний ${}^{239}_{94}\text{Pu}$	239,05242	22,267597
Гелий ${}^4_2\text{He}$	4,002603	3728,4246			
${}^3_2\text{He}$	3,016042	2809,4431			

Вопросы для самопроверки

1. Какая частица называется протоном? Каковы его электрический заряд и примерная масса (в атомных единицах массы)?
2. Какая частица называется нейтроном? Каковы его электрический заряд и примерная масса (в атомных единицах массы)?
3. Из каких частиц состоит атомное ядро?
4. Сколько в ядре содержится протонов; нейтронов?
5. Что называется массовым числом? Каково соотношение между массовым числом и массой ядра, выраженной в атомных единицах массы?
6. Что такое изотопы? Отличаются ли по химическим свойствам изотопы одного и того же химического элемента?
7. Как обозначается нуклид некоторого химического элемента? Приведите примеры.

Упражнения

1. Определите число протонов и нейтронов в ядрах химических элементов: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{32}_{16}\text{S}$, ${}^{184}_{74}\text{W}$, ${}^{207}_{82}\text{Pb}$.
2. Чем отличаются составы ядер трех изотопов водорода: наиболее распространенного протия ${}^1_1\text{H}$, дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$?
3. Чем отличаются атомы и ядра сверхтяжелого изотопа водорода — трития ${}^3_1\text{H}$ и легкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$? Одинаковы ли их химические свойства?
4. Чем отличаются составы ядер изотопов урана: ${}^{235}_{92}\text{U}$ и ${}^{238}_{92}\text{U}$? Одинаковы ли их химические свойства?
5. Природный хлор состоит в основном из двух изотопов с массовыми числами 35 и 37, содержание других изотопов ничтожно мало. Атомная масса природного хлора равна 35,453 а.е.м. Определите процентное содержание обоих изотопов, если их атомные массы равны 34,969 а.е.м. и 36,966 а.е.м.
6. Природный магний состоит в основном из смеси трех изотопов с массами ядер 23,985 а.е.м. (78,6%), 24,986 а.е.м. (10,1%) и 25,983 а.е.м. (11,3%). Определите атомную массу природного магния.

§ 8.5. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

I. Итак, атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и электрически незаряженных нейтронов. Очевидно, что между протонами действуют значительные электрические силы отталкивания. Однако ядра огромного числа атомов, за очень редким исключением, весьма устойчивы.

Это приводит нас к выводу, что, кроме электрических сил отталкивания, в ядре действуют и значительные силы притяжения между нуклонами. Эти силы не являются гравитационными. Простой расчет показывает, что силы гравитационного взаимодействия между двумя протонами в 10^{36} раз меньше электрических. Это не могут быть и магнитные силы, которые также существенно меньше электрических.

Силы, связывающие нуклоны в ядре, называются ядерными. Они имеют особую природу. Ядерные силы рассматриваются как одно из проявлений так называемого сильного взаимодействия. Из опытов были получены важные сведения о свойствах ядерных сил.

II. Ядерные силы являются короткодействующими в отличие от дальнедействующих электромагнитных и гравитационных сил. Радиус действия ядерных сил примерно равен размеру нуклона ($1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$). На этих расстояниях ядерные силы в сотни раз превышают электромагнитные (кулоновские) силы взаимодействия. Это, образно говоря, «богатырь с очень короткими руками».

Ядерные силы обладают зарядовой независимостью. Это значит, что два протона или протон и нейтрон взаимодействуют между собой одинаково.

Ядерные силы обладают свойствами насыщения, что является следствием их короткодействия, т. е. каждый нуклон ядра взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему других нуклонов. В этом отношении ядерные силы очень напоминают молекулярные силы, которые тоже действуют только между соседними молекулами, т. е. обладают относительно малым радиусом действия.

По характеру взаимодействия нуклоны похожи на твердые шарики, окутанные мягкой и очень клейкой оболочкой. Частицы, составляющие эту оболочку, называются *глюонами*. (Слово «глюон» образовано от английского слова glue — клей.)

Вопросы для самопроверки

1. Каково действие электрических сил между протонами в ядре?
2. Что наводит нас на мысль, что в ядре, кроме электрических сил, действуют ядерные силы?
3. Каковы свойства ядерных сил?

Упражнения

1. Зная, что расстояние между протонами в ядре составляет около 10^{-15} м , найдите силу кулоновского отталкивания между двумя протонами.
2. По данным предыдущей задачи определите силу гравитационного притяжения между двумя соседними нуклонами. Примите массу нуклона равной примерно $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.
3. Во сколько раз сила гравитационного притяжения между соседними нуклонами меньше силы кулоновского отталкивания?

§ 8.6. ДЕФЕКТ МАССЫ. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

I. В ядерной физике для оценки взаимодействия нуклонов чаще всего используется метод описания не через силу, а через энергию взаимодействия, потому что ядерные силы измерить весьма сложно, в то время как энергию взаимодействия можно весьма точно измерить. Здесь на помощь приходит соотношение Эйнштейна $\Delta E = \Delta m c^2$, или, если энергию выразить в мегаэлектрон-вольтах, а массу в атомных единицах массы (см. § 8.3), $\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МэВ}$.

II. Можно было бы предположить, что так как все атомные ядра составлены из одних и тех же частиц — протонов и нейтронов, то масса каждого ядра должна быть равна сумме масс содержащихся в нем нуклонов. Однако эксперимент — беспристрастный судья всякой теории — показывает другое: *массы ядер всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых ядро состоит*. Существует дефект масс,

или, проще говоря, *недостаток массы ядра по сравнению с массами составляющих его нуклонов*.

Обозначим массу ядра через $M_{\text{я}}$, массы протонов и нейтронов соответственно через m_p и m_n и учтем, что в каждом ядре содержится Z протонов и N нейтронов. Сформулированное выше положение можно записать в виде неравенства

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Дефект массы Δm для данного ядра можно вычислить, если из суммы масс свободных протонов и нейтронов, составляющих это ядро, вычесть массу ядра, измеренную в эксперименте:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}).$$

III. Для примера вычислим дефект масс ядра гелия ${}^4_2\text{He}$, состоящего, как легко подсчитать, из двух протонов и двух нейтронов. Сложим массы его составных частей. При этом учтем, что атом гелия содержит два электрона, следовательно, при расчете масс нужно учитывать не массу свободного протона, а массу атома водорода, содержащего протон и электрон. Его масса равна 1,0078 а.е.м. Итак, масса свободных частиц $M = 2 \cdot 1,0078 \text{ а.е.м.} + 2 \cdot 1,0087 \text{ а.е.м.} = 4,0330 \text{ а.е.м.}$ Табличное значение массы атома гелия (см. табл. 8.1) равна 4,0026 а.е.м. Дефект массы составляет $\Delta m = 4,0330 - 4,0026 = 0,0304 \text{ а.е.м.}$

А это означает, что внутренняя энергия атома гелия меньше энергии системы, состоящей из двух атомов водорода и двух свободных нейтронов: $\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 0,0304 \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 28,3 \text{ МэВ.}$

Очевидно, что эта энергия должна выделяться при образовании атома гелия из двух атомов водорода и двух свободных нейтронов или при образовании ядра гелия (альфа-частицы) из двух свободных протонов и двух свободных нейтронов.

IV. Итак, масса атома (ядра) меньше суммы масс составляющих его субатомных частиц. Данное явление находит простое объяснение. Ядра атомов являются сложными объектами, образующимися в процессе формирования Вселенной путем самопроизвольного слияния отдельных элементарных частиц: протонов и нейтронов. Как и в большинстве самопроизвольно протекающих процессов, слияние частиц сопровождается переходом от состояний с более высокой энергией к состояниям с меньшей энергией. При этом разность энергий высвобождается, превращаясь в энергию других частиц, чаще всего в энергию квантов излучения (фотонов).

Если бы масса ядра ${}^4_2\text{He}$ была в точности равна массе двух протонов и двух нейтронов, то за счет кулоновских сил отталкивания ядро распалось бы самопроизвольно без сообщения ему дополнительной энергии. Итак, для обеспечения стабильности ядра его масса (энергия) должна быть меньше массы (энергии) составляющих его нуклонов.

V. Энергией связи ядра называется энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Так как каждой частице массой m соответствует определенная энергия E , то можно вычислить энергию связи $E_{\text{св}}$ для любого ядра по его дефекту массы Δm :

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2 = (Zm_{\text{H}} + Nm_n - M_{\text{ат}})c^2,$$

или, если вести расчет в мегаэлектрон-вольтах, то

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \cdot 931,5 \text{ МэВ} = (Zm_{\text{H}} + Nm_n - M_{\text{ат}}) \cdot 931,5 \text{ МэВ.}$$

О том, как велика энергия связи, можно судить по следующему примеру: образование гелия массой 4 г из водорода сопровождается выделением такой же энергии, что и при сгорании 1,5—2 вагонов каменного угля.

На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что *энергия связи ядра равна той энергии, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны*.

Из курса химии вы знаете, что при объединении атомов в молекулы или в других процессах, происходящих в атомных электронных оболочках, выделяется энергия. Если мы сравним эту энергию с энергией связи, то увидим, что последняя в миллионы раз превышает энергию химических процессов. Именно поэтому дефекты масс в химических или тепловых процессах настолько малы, что их невозможно измерить.

VI. Устойчивость ядер характеризует физическая величина, называемая *удельной энергией связи*. Она равна энергии связи, приходящейся на один нуклон: $E_{\text{уд}} = E_{\text{св}}/A$. Результаты вычислений удельной энергии связи для всех химических элементов представлены на графике (рис. 8.3). По оси абсцисс отложены массовые числа элементов, по оси ординат — удельные энергии связи ядер (нуклидов) в мегаэлектрон-вольтах на нуклон.

В начале графика с увеличением массового числа A удельная энергия связи резко возрастает: для дейтерия ${}^2_1\text{H}$ она приблизительно равна 1 МэВ/нуклон, а уже для ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ — более 7 МэВ/нуклон. У ядра водорода ${}^1_1\text{H}$ удельная энергия связи равна нулю, что вполне понятно: в этом ядре один протон и его не с кем разобщать.

Далее кривая удельной энергии связи имеет слабовыраженный максимум, порядка 8,7 МэВ/нуклон. Наибольшее значение имеет удельная энергия связи для ядер атомов, расположенных в средней части периодической системы элементов, — от ${}^{28}_{14}\text{Si}$ до ${}^{138}_{56}\text{Ba}$, т. е. для ядер с массовыми числами $28 \leq A \leq 138$. С дальнейшим ростом массового числа A энергия связи убывает. Для ядер, расположенных в конце периодической системы, например для урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, удельная энергия связи составляет примерно 7,6 МэВ/нуклон.

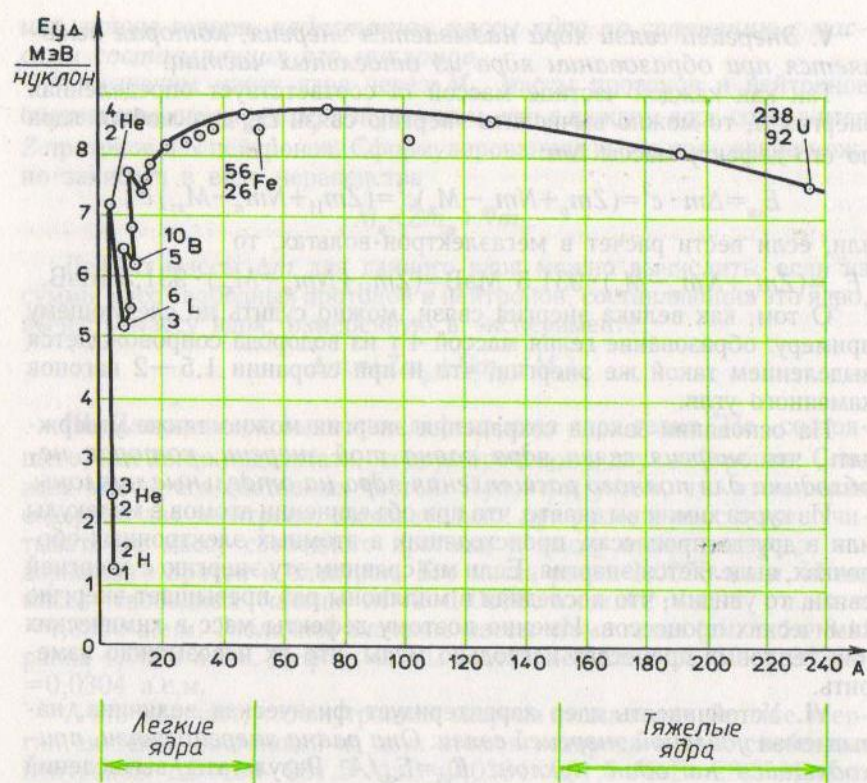


Рис. 8.3

Такая зависимость энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса: первый — деление массивных, перегруженных нейтронами ядер на несколько более легких с выделением большой энергии, второй — слияние (синтез) легких ядер в одно ядро со средним массовым числом и также с выделением большой энергии.

VII. Опыт показывает, что альфа-частицы испускают изотопы химических элементов с массовыми числами более 200, т. е. элементов, которые расположены в конце периодической системы. Как известно, у этих нуклидов удельная энергия связи несколько меньше, чем у элементов с массовыми числами около 100 (см. рис. 8.2), и они обладают избытком внутренней энергии. Поэтому энергетически выгодно, чтобы массивное ядро разделилось на осколки с большей энергией связи. В частности, энергетически выгодно, если одним из осколков окажется альфа-частица, у которой энергия связи весьма велика. Однако делению ядра препятствуют мощные ядерные силы. Поэтому самопроизвольный распад ядра на альфа-частицу и дочернее ядро происходит сравнительно редко.

Реакция альфа-распада может быть записана следующим образом:



Заметим, что при этом выполняется закон сохранения электрического заряда (равенство суммы нижних индексов) и закон сохранения массового числа, т. е. числа нуклонов (равенство суммы верхних индексов).

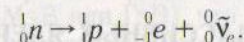
VIII. После выбрасывания альфа-частицы дочернее ядро обычно оказывается возбужденным, т. е. у него сохраняется избыток энергии. Эта энергия испускается в виде гамма-кванта.

Этот процесс совершенно аналогичен испусканию энергии возбужденным атомом при переходе с более высокого энергетического уровня на более низкий уровень. Разница заключается лишь в том, что разность между энергетическими уровнями атомов составляет от десятков электрон-вольт до десятых долей электрон-вольта, а в ядре эта разность составляет мегаэлектрон-вольты. Поэтому частоты электромагнитных волн, испускаемых атомами, лежат в пределах $10^{15} - 10^{13}$ Гц (длины волн от сотен нанометров до десятков микрометров), а частоты гамма-квантов лежат в пределах $10^{20} - 10^{18}$ Гц (длины волн от десятых до тысячных долей нанометра).

IX. Наиболее трудно оказалось объяснить происхождение бета-частиц. В самом деле, ведь в ядре электронов нет. Так откуда же они берутся? Оказалось, что при бета-распаде происходит превращение нейтрона в протон.

Так, В. Паули в 1931 г. высказал предположение, что при бета-распаде из ядра вылетают две частицы — электрон и нейтральная частица с нулевой массой, которую Э. Ферми назвал *нейтрино* (по-итальянски это означает маленький нейтрон, нейтрончик). Поскольку нейтрино не обладает ни электрическим зарядом, ни массой, оно очень слабо поглощается веществом, и его трудно обнаружить. Лишь в 1953—1954 гг. Ф. Рейнес и К. Коуэн экспериментально обнаружили нейтрино.

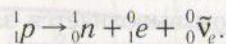
X. В настоящее время доказано, что существует несколько различных типов нейтрино. В частности, при превращении нейтрона в протон выделяется *электронное антинейтрино* $^0_{-1}\bar{\nu}_e$. Реакция записывается следующим образом:



Свободный нейтрон действительно распадается на такие три частицы. При этом выделяется энергия, равная 782 кэВ. Именно с такой энергией были обнаружены бета-частицы при распаде свободных нейтронов.

Свободный протон не может превратиться в нейтрон, поскольку для этого не хватает энергии. Ведь масса протона меньше массы нейтрона. Однако в возбужденных ядрах такая реакция возможна.

При этом из ядра вылетают позитрон 0_1e и электронное нейтрино:



Позитрон, иначе называемый антивключеном, представляет собой частицу, масса которой точно равна массе электрона, а ее положительный заряд равен элементарному заряду, т. е. модулю заряда электрона. Существование позитрона теоретически предсказал П. Дирак в 1929 г. Экспериментально позитроны обнаружил в 1932 г. К. Андерсон.

Вопросы для самопроверки

1. Равна ли масса ядра сумме масс протонов и нейтронов, из которых ядро состоит? Приведите примеры.
2. Что называется дефектом массы?
3. Как вычислить дефект массы?
4. Что называется энергией связи?
5. Каково соотношение между дефектом массы и энергией связи?
6. Что называется удельной энергией связи? Начертите график зависимости удельной энергии связи от массового числа.
7. Какие два процесса могут привести к выделению энергии при ядерных реакциях?

Упражнения

1. Найдите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи атома дейтерия. Данные возьмите из таблицы 8.1.
2. Решите аналогичную задачу для сверхтяжелого водорода — трития ${}^3_1\text{H}$.
3. Решите аналогичную задачу для легкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$.
4. Определите удельную энергию связи атома изотопа железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, атомная масса которого равна 55,9355 а.е.м.
5. Определите удельную энергию связи атомов изотопов урана ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$.

§ 8.7. ДЕЛЕНИЕ МАССИВНЫХ ЯДЕР. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

1. После того как стало известно строение ядра и получены данные о зависимости энергии связи от массового числа, ученые стали исследовать явления, происходящие с ядрами, которые подвергаются бомбардировке быстрыми частицами — протонами, альфа-частицами (ядрами гелия) и нейтронами.

Впервые деление ядер урана при их бомбардировке нейтронами удалось наблюдать О. Гану и его ассистенту Ф. Штрассману 18 де-

кабря 1938 г. Эта дата ознаменовала собой начало эры ядерной энергетики.

Узнав о результатах опытов О. Гана и Ф. Штрассмана, Л. Мейтнер и О. Фриш тут же предложили теорию деления ядер урана, указав при этом на особую роль изотопа ${}^{235}_{92}\text{U}$. В этом же году Я. И. Френкель и независимо от него Н. Бор и Дж. Уилер разработали теорию цепной ядерной реакции. Однако предстоял еще длительный и сложный путь реализации теоретических идей на практике.

II. Рассмотрим более детально явление деления ядер урана. Как мы уже знаем, массивные ядра являются неустойчивыми. Это объясняется меньшей удельной энергией связи массивных ядер по сравнению с удельной энергией связи средних ядер. Делением ядер называют процесс распада массивного ядра (например, урана) на две приблизительно равные части и другие частицы. На рисунке 8.4 представлена схема одного из вариантов деления ядра урана после попадания в него нейтрона. В таком случае ядро урана распадается на два дочерних ядра, например ${}^{87}_{35}\text{Br}$ и ${}^{147}_{57}\text{La}$. Обратите внимание на то, что при этом из ядра вылетают два (а иногда и три) вторичных нейтрона, вследствие чего реакция может самопроизвольно продолжаться, если на пути этих нейтронов окажутся другие ядра урана.

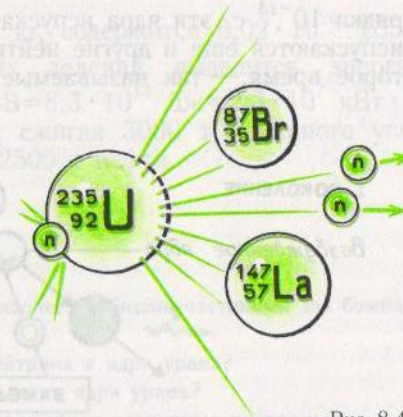


Рис. 8.4

Почему же именно нейтроны оказались наиболее эффективными снарядами для осуществления этой реакции? Дело в том, что электроны с трудом пробивают электронную оболочку атома. И даже попав в ядро, вносят в него слишком мало энергии. Протоны или альфа-частицы, несущие положительный электрический заряд, отталкиваются от положительно заряженного ядра. Поэтому проникнуть в ядро протоны или альфа-частицы могут лишь при наличии очень большой кинетической энергии, порядка миллионов или даже миллиардов электрон-вольт (МэВ или ГэВ), что достигается с помощью мощных ускорителей — циклотронов или синхрофазотронов. Нейтроны же наиболее пригодны для возбуждения ядерных реакций: они не имеют электрического заряда и поэтому не отталкиваются положительно заряженными ядрами, как альфа-частицы и протоны. Следовательно, вероятность того, что нейтрон попадет в ядро и вызовет ядерную реакцию, гораздо выше, чем для положительно заряженных частиц.

III. Три важных для практики ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$ и ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, т. е. два

изотопа урана и плутоний, обладают тем свойством, что они легко претерпевают деление под действием медленных (или тепловых) нейтронов с энергией около 0,1 эВ, т. е. нейтронов с пренебрежимо малой кинетической энергией.

IV. Рассмотрим теперь общую схему деления тяжелых ядер, представленную на рисунке 8.5, например ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$, захватившего нейтрон ^1_0n . Энергия захваченного нейтрона распределяется между нуклонами ядра. Подобно жидкой капле, ядро начинает сильно деформироваться до тех пор, пока кулоновское отталкивание протонов не разорвет это ядро на две части, как это показано на рисунке.

Дочерние ядра имеют избыточное число нейтронов и являются нестабильными. По прошествии короткого промежутка времени, порядка 10^{-13} с, эти ядра испускают быстрые нейтроны. Кроме того, испускаются еще и другие нейтроны, образовавшиеся спустя некоторое время, — так называемые запаздывающие нейтроны. Они,

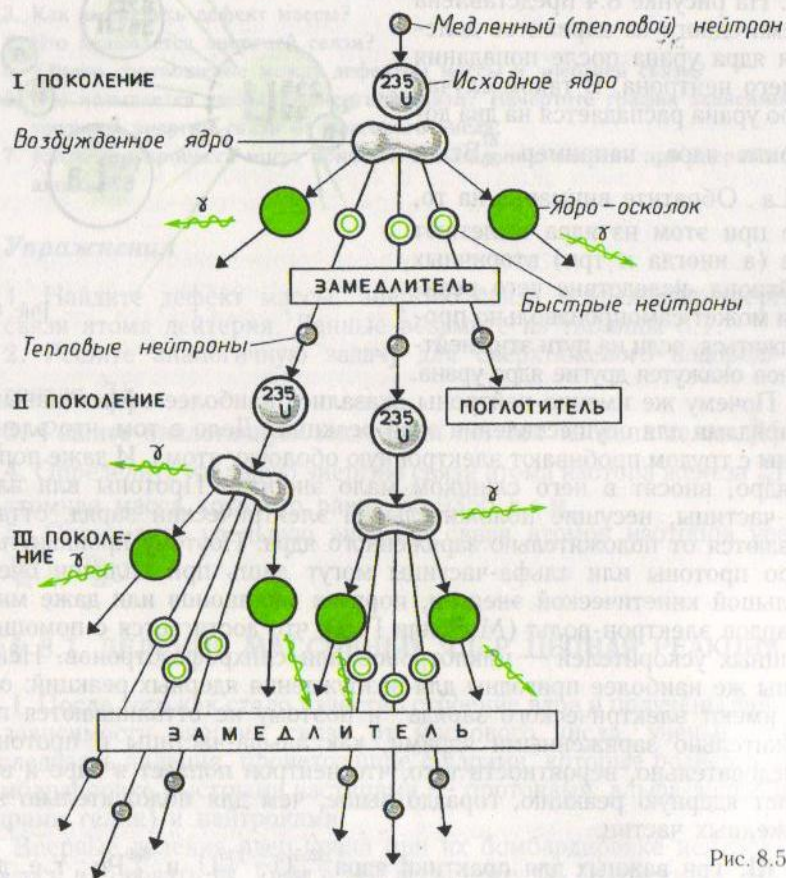


Рис. 8.5

как будет видно позже, очень важны для регулирования реакций, происходящих в ядерном реакторе.

V. В результате реакции деления высвобождается огромная энергия. Действительно, масса ядра $^{235}_{92}\text{U}$ значительно больше суммарной массы осколков деления. В этом нетрудно убедиться, если обратиться к кривой удельной энергии связи (см. рис. 8.3). Для урана удельная энергия связи составляет примерно 7,6 МэВ/нуклон, а у осколков деления, у которых масса почти вдвое меньше, она составляет примерно 8,5 МэВ/нуклон. Разность энергий между материнским ядром и осколками деления составляет примерно $8,5 - 7,6 = 0,9$ МэВ/нуклон. Так как в каждом процессе деления участвуют 236 нуклонов, то выделяющаяся при делении одного ядра урана энергия равна $0,9 \text{ МэВ} \cdot 236 \approx 200 \text{ МэВ}$.

В массе урана-235, равной 1 кг, содержится $6,02 \cdot 10^{26} : 235 \approx 2,6 \cdot 10^{24}$ ядер. Тогда при их делении выделится энергия $200 \cdot 2,6 \cdot 10^{24} \text{ МэВ} = 5,2 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 8,3 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Такую энергию можно получить, сжигая 3000 т каменного угля (т. е. состав из 60 вагонов) или 2500 т нефти.

Вопросы для самопроверки

1. Почему нейтроны оказываются наиболее удобными частицами для бомбардировки атомных ядер?
2. Что происходит при попадании нейтрона в ядро урана?
3. Какие частицы образуются при делении ядра урана?
4. Почему при делении ядра урана возникают вторичные нейтроны?
5. Почему при делении ядер урана выделяется энергия?

Упражнения

1. Ядро урана-235 под действием нейтрона разделилось на осколки с зарядовыми числами 36 и 56. Что это за элементы? Каковы их примерные массовые числа?
2. По данным предыдущей задачи сравните массовые числа полученных изотопов и соответствующих стабильных изотопов. Избыток каких частиц наблюдается в осколках? Каков их избыток в каждом из осколков?
3. Мощность реактора подводной атомной лодки равна 60 МВт. Сколько урана-235 распадается в этом реакторе за 10 ч ходового времени? КПД реактора равен 30%.
4. По условию предыдущей задачи подсчитайте, сколько дизельного топлива надо сжечь, если заменить на подводной лодке атомный реактор дизельными двигателями. Удельная теплота сгорания дизельного топлива равна 40 МДж/кг.

§ 8.8. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

I. Как мы видели выше, при делении ядер урана и некоторых других массивных ядер освобождается два-три нейтрона. Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может, в свою очередь, вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. Число делящихся ядер и свободных нейтронов в этом случае лавинообразно нарастает. Возникает самоподдерживающаяся *цепная реакция*, названная так по аналогии с цепными химическими реакциями, продукты которых могут вновь вступать в реакции с исходными веществами.

II. Вторичные нейтроны, возникающие при делении ядра урана-235, обладают значительной энергией, порядка 1 МэВ. Сами же ядра $^{235}_{92}\text{U}$, а также ядра $^{233}_{92}\text{U}$ и $^{239}_{94}\text{Pu}$ лучше поглощают тепловые нейтроны с энергией порядка 0,3—1 эВ и делятся под их действием.

В связи с этим возникает проблема замедления вторичных нейтронов. Это происходит при упругих соударениях нейтронов с ядрами атомов углерода $^{12}_6\text{C}$ или с молекулами тяжелой воды D_2O . При ударах с ядрами атомов углерода или дейтерия быстрые нейтроны передают им энергию до тех пор, пока их кинетическая энергия не станет равна средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Именно поэтому данные нейтроны называют *тепловыми*.

Вещества, используемые для уменьшения кинетической энергии вторичных нейтронов до средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества, называются *замедлителями*.

III. Схематически модель цепной реакции уже представлена на рисунке 8.5. Каждое исходное ядро урана при поглощении нейтрона распадается на два дочерних ядра, испуская два-три быстрых нейтрона, т. е. исходных продуктов реакции. Если их замедлить, то они способны возбудить последующие деления. Возможно и поглощение части выделяющихся нейтронов. Это, условно говоря, второе поколение делящихся ядер. Аналогично происходит реакция деления третьего и последующих поколений.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии — это кинетическая энергия продуктов деления (ядер-осколков), энергия фотонов и нейтронов.

Для стационарного (стабильного) течения ядерной реакции деления нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деления ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

IV. Цепная ядерная реакция деления может осуществляться на

изотопах $^{235}_{92}\text{U}$, $^{233}_{92}\text{U}$ и $^{239}_{94}\text{Pu}$. Эти вещества получили название *ядерное горючее* или *расщепляющиеся материалы*.

Только один из расщепляющихся материалов $^{235}_{92}\text{U}$ имеется в природе, но его содержание в природном уране составляет всего около 0,7%. Два других расщепляющихся материала получают искусственно из так называемого ядерного сырья, коим являются торий и природный уран.

V. Для каждого типа ядерного горючего существует *критическая масса*, при которой поддерживается цепная реакция деления. При меньшей массе большая доля нейтронов вылетает в окружающую среду и реакция не идет.

Превышение критической массы в одном куске приводит к ядерному взрыву, т. е. нерегулируемой цепной реакции. На этом основан принцип действия ядерной бомбы. Она состоит из двух (трех) кусков расщепляющегося материала, каждый из которых имеет массу меньше критической, но их масса вместе превышает критическую.

Для осуществления ядерного взрыва куски очень быстро сближаются с помощью специального взрывателя, и происходит ядерный взрыв — нерегулируемая цепная реакция.

Первую урановую бомбу американцы сбросили на японский город Хиросиму 6 августа 1945 г., вторую (плутониевую) — 9 августа 1945 г. на город Нагасаки. Это вызвало огромные разрушения и многочисленные жертвы — более 200 тыс. мирных жителей погибли или получили тяжелые травмы и заболели неизлечимой лучевой болезнью.

VI. *Ядерными реакторами называются устройства, в которых осуществляются управляемые цепные ядерные реакции.* Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. в США под руководством Э. Ферми. Первый европейский реактор был создан в Москве под руководством И. В. Курчатова. Сейчас в мире действует множество ядерных реакторов различных типов.

Основной частью любого ядерного реактора является его *активная зона* (рис. 8.6). Она состоит из блоков замедлителя (на-

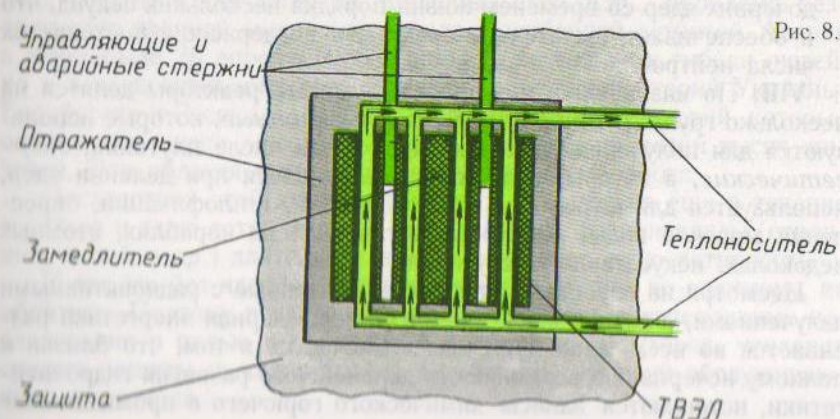


Рис. 8.6

пример, графита), в котором просверлены вертикальные отверстия. В эти отверстия вставлены металлические трубки, где размещают ядерное горючее в виде тепловыделяющих элементов (сокращенно ТВЭЛы). Трубки с тепловыделяющими элементами омываются циркулирующим *теплоносителем*. Им может служить в зависимости от конструкции реактора вода или жидкий металл, например натрий.

Для снижения вылета нейтронов активную зону окружают *отражателем нейтронов*. За отражателем располагаются стальной кожух и бетонная *биологическая защита*, которая предохраняет окружающее пространство от опасного ионизирующего излучения реактора.

Управление цепной реакцией в активной зоне осуществляют с помощью *управляющих стержней*. Их изготавливают из бора или кадмия — веществ, хорошо поглощающих нейтроны. Стержни с помощью специальной системы автоматики удерживаются в таком положении, чтобы число нейтронов сохранялось постоянным. При аварии стержни быстро погружаются в активную зону, число нейтронов резко уменьшается и цепная реакция обрывается.

VII. В первичном контуре циркулирует теплоноситель, нагревая и превращая в рабочий пар воду вторичного контура энергетических реакторов. Пар вращает турбину, вырабатывающую с помощью электрогенератора электрический ток, а затем охлаждается в конденсаторе. На рисунке 8.7 показаны два циркуляционных контура. В первичном контуре, связанном с реактором, циркулирует теплоноситель, который радиоактивен из-за прохождения через активную зону, где он облучается нейтронами. Вторичный контур, где образуется пар, нерadioактивен.

Образование нейтронов и последующие деления происходят так быстро, что манипулировать управляющими стержнями для поддержания постоянного числа нейтронов было бы невозможно, если бы небольшой процент высвобождающихся нейтронов не запаздывал. Эти запаздывающие нейтроны образуются при распаде дочерних ядер со временем жизни порядка нескольких секунд, что и обеспечивает достаточное время для поддержания постоянства числа нейтронов.

VIII. По назначению и мощности ядерные реакторы делятся на несколько групп: *исследовательские, изотопные*, которые используются для получения радионуклидов, в том числе плутония, *энергетические*, в которых энергия, выделяющаяся при делении ядер, используется для выработки электроэнергии, теплофикации, опреснения морской воды, в силовых установках на кораблях, атомных ледоколах, искусственных спутниках и др.

Несмотря на известные опасности, связанные с радиоактивными излучениями, а также опасностью взрывов, ядерная энергетика развивается во всем мире. Причина заключается в том, что близки к полному исчерпанию возможности дальнейшего развития гидроэнергетики, истощаются запасы химического горючего в промышленно

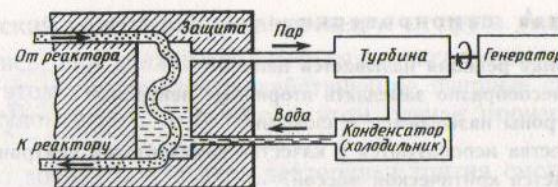


Рис. 8.7

развитых странах. К тому же важным фактом, определяющим перспективность направлений развития энергетики, является степень отрицательного влияния различных видов энергетических установок на окружающую среду. Тепловые электростанции нередко приносят больший вред, чем ядерные.

Атомные электростанции не загрязняют атмосферу дымом и пылью, как тепловые станции, не требуют создания крупных водохранилищ, занимающих большие площади плодородных земель, как при строительстве гидроэлектростанций. Однако при использовании энергии ядер в мирных целях возникают другие проблемы.

Первая заключается в необходимости защиты людей, обслуживающих ядерные энергетические установки, от вредного действия гамма-излучения и потоков нейтронов, возникающих в активной зоне реактора. Для этого ядерный реактор необходимо окружить толстым слоем бетона и другими материалами, хорошо поглощающими гамма-излучение и нейтроны (см. рис. 8.7).

Вторая проблема связана с тем, что при работе реактора в его активной зоне накапливается большое количество искусственных радиоактивных веществ. Для предотвращения их случайного выброса из реактора разработаны автоматические противоаварийные системы, ведется непрерывный автоматический контроль за состоянием чистоты воздуха, воды, почвы вокруг атомных станций.

После аварий на некоторых АЭС, в частности на Три-Майл-Айленд (США) и особенно на Чернобыльской АЭС, проблема безопасности ядерной энергетики встала с особенной остротой. Авария в Чернобыле 26 апреля 1986 г. привела не только к гибели людей, но и к радиоактивному заражению обширных территорий Украины, Белоруссии и России. С наиболее загрязненных территорий, которые опасны для жизни людей, пришлось эвакуировать сотни тысяч жителей. Эти области выпали из хозяйственного оборота.

Последствия этой катастрофы будут сказываться еще в течение десятков и даже сотен лет, так как некоторые радионуклиды (стронций, цезий и др.) длительное время сохраняют свою активность.

И все же без ядерной энергетики человечеству, по-видимому, не обойтись. Поэтому в настоящее время проводятся интенсивные исследования с целью повышения безопасности реакторов, усиления средств защиты, в частности, от ошибочных действий обслуживающего персонала.

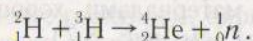
Вопросы для самопроверки

1. Какая ядерная реакция называется цепной?
2. Почему целесообразно замедлять вторичные нейтроны?
3. Какие нейтроны называются тепловыми?
4. Какие вещества используются в качестве замедлителей нейтронов?
5. Что называется критической массой?
6. Как устроен ядерный реактор?
7. Как осуществляется процесс управления ядерным реактором; остановка реактора?
8. Каковы перспективы ядерной энергетики? В чем опасность ядерных реакторов?

§ 8.9. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА И ЗВЕЗД

I. Анализ графика удельной энергии связи (см. рис. 8.3) показывает, что энергию можно получить не только за счет деления массивных ядер, но и за счет синтеза, т. е. слияния ядер сo средними массовыми числами из более легких ядер. (Слово «синтез» образовано от греческого слова *synthesis* — соединение, сочетание.)

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим баланс энергии ядерной реакции синтеза гелия при слиянии ядер дейтерия и трития. Ядерная реакция запишется так:



Заметим, что при этом выполняется **закон сохранения зарядового числа**, т. е. закон сохранения электрического заряда, а также выполняется **закон сохранения массового числа**, т. е. закон сохранения числа нуклонов.

Оценим баланс энергии.

Массы атомов дейтерия, трития, гелия известны (см. табл. 8.1). Масса системы до реакции равна 5,030164 а.е.м., после реакции — 5,0112679 а.е.м. Итак, масса системы уменьшилась на $\Delta m = 0,0189$ а.е.м., а ее внутренняя энергия уменьшилась на $\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 17,6 \text{ МэВ}$. Следовательно, при этой ядерной реакции выделяется огромная энергия: 3,52 МэВ/нуклон. Это в 3,5 раза больше энергии, выделяющейся на один нуклон при реакции деления ядер урана.

II. Дейтерия на Земле очень много. В каждом килограмме обычной воды содержится примерно 0,1 г тяжелой воды D_2O . Но общее количество воды в океане примерно 10^{18} т, следовательно, дейтерия на Земле около 10^{14} т — фактически неисчерпаемый источник энергии. Почему же мы до сих пор не используем столь выгодный источник энергии?

Оказывается, реализовать реакцию ядерного синтеза довольно трудно. Дело в том, что ядра всех атомов имеют положительный

электрический заряд и отталкиваются друг от друга. А для того чтобы ядра слились, они должны сблизиться на расстояние около 10^{-15} м. Только в этом случае короткодействующие ядерные силы окажутся сильнее кулоновских, и только в этом случае произойдет реакция синтеза.

Можно доказать, что ядра дейтерия и трития смогут сблизиться до расстояния действия ядерных сил, если их кинетическая энергия составит не менее 0,1 МэВ. Как же сообщить ядрам такую кинетическую энергию? Очевидно, что одним из наиболее эффективных способов является повышение температуры газа, состоящего из атомов дейтерия и трития. С ростом температуры возрастает средняя кинетическая энергия частиц вещества, и наиболее быстрые из них при соударении преодолевают кулоновские силы отталкивания и вступают в реакцию синтеза. Именно потому, что *реакция синтеза ядер возможна только при очень высокой температуре, данные ядерные реакции называются термоядерными*.

III. Расчеты показывают, что температура дейтериевой плазмы, при которой начнутся реакции синтеза, должна быть около 100 млн градусов. В земных условиях такие температуры не встречаются, однако такие условия имеются в недрах Солнца и звезд.

Температура Солнца и других звезд очень высока. В центре Солнца она достигает примерно 13 млн градусов. При такой температуре атомы полностью ионизованы и вещество представляет собой плазму, содержащую голые ядра, т. е. ядра без электронной оболочки, а также свободные электроны. Ядра движутся с достаточно большой скоростью, так что при столкновении наиболее быстро движущихся частиц может произойти ядерный синтез. Высвобождающаяся энергия поддерживает высокую температуру плазмы и тем самым создает условия для непрерывного продолжения ядерного синтеза. Иначе говоря, Солнце и звезды представляют собой самоподдерживающиеся термоядерные реакторы.

IV. Температуры порядка сотен миллионов градусов бывают при взрыве ядерных бомб (урановых или плутониевых). Это может быть использовано для зажигания термоядерной реакции в дейтерии, т. е. для взрыва водородной бомбы.

В настоящее время идет интенсивный процесс ликвидации стратегических наступательных ядерных вооружений СНВ-1 и СНВ-2. Большинство стран мира подписали договор о нераспространении ядерных вооружений. Все это позволяет надеяться, что ядерное вооружение будет ликвидировано и человечество избежит страшной опасности самоуничтожения в результате ядерной войны.

V. Большие трудности возникают при решении проблемы реализации управляемой термоядерной реакции. Для этой цели необходимо создать, а затем поддерживать хотя бы в течение сотых долей секунды дейтериевую плазму с температурой около 100 млн градусов и концентрацией около 10^{22} частиц в 1 м^3 .

Очевидно, что никакой сосуд не сможет удержать столь высо-

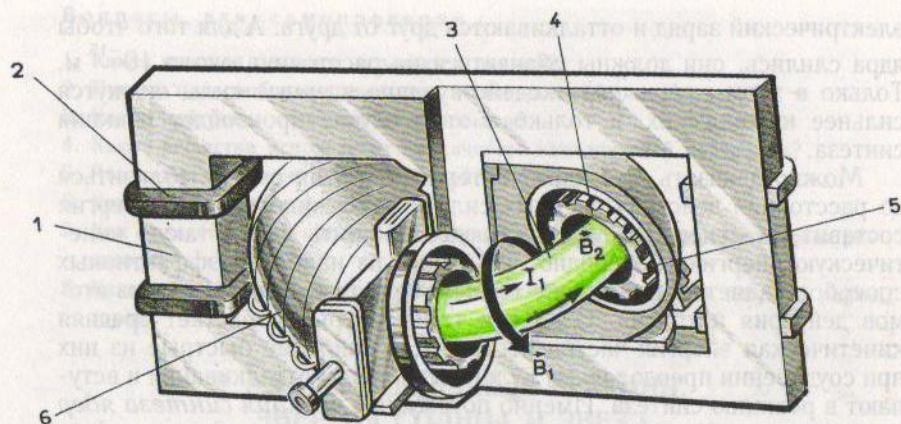


Рис. 8.8

котемпературную плазму. Его стенки расплавятся мгновенно, и плазма охладится. Один из методов удержания термоядерной плазмы предложили А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм в 1950 г. — изолировать (подвесить) горячую плазму в сильном магнитном поле. На основе этой идеи было создано несколько различных экспериментальных установок. Наиболее удачной оказалась конструкция, названная «Токамак» — от первых букв слов «ток», «камера», «магнитные катушки».

Схема устройства установки показана на рисунке 8.8. Это по существу своеобразный трансформатор, состоящий из стального сердечника 1 и первичной обмотки 2, по которой протекает переменный ток. Вторичной обмоткой является виток плазмы 3, находящийся в камере 4 в виде тора из тонкой нержавеющей стали, покрытого кожухом 5 из толстой меди. Для стабилизации плазмы используется продольное магнитное поле с индукцией B_2 , создаваемое катушкой 6, намотанной на тор.

Импульс тока в первичной обмотке индуцирует внутри тора вихревое электрическое поле, вызывающее ионизацию дейтериевой плазмы, в которой возникает газовый разряд силой тока I_1 , около 1 млн ампер, в результате чего плазма разогревается до нужной температуры и происходит термоядерная реакция.

Опыты показали, что для исследовательских целей «Токамак» является наилучшей из известных пока установок. Что касается создания промышленного управляемого термоядерного реактора, то здесь имеется еще масса нерешенных проблем. Однако ученые надеются в начале XXI в. построить такой реактор. Это во многом решит проблемы энергетики.

Вопросы для самопроверки

1. При каких реакциях ядерного синтеза выделяется энергия? Приведите примеры.

2. Какие трудности возникают при реакциях ядерного синтеза?
3. Почему реакции ядерного синтеза называются термоядерными?
4. На каком принципе основана водородная бомба?
5. За счет чего Солнце и звезды в течение миллиардов лет излучают энергию в космическое пространство?

Упражнения

1. Рассчитайте энергию, которая выделится при образовании ядра гелия от слияния двух ядер дейтерия. Определите выход энергии на один нуклон.
2. Сколько энергии выделится, если четыре протона и два электрона сольются, образуя ядро гелия?
3. Солнце испускает каждую секунду электромагнитное излучение мощностью $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт. На сколько уменьшается масса Солнца за 1 с?
4. Сколько лет может излучать Солнце с данной интенсивностью, считая, что при этом теряется 1% его массы? Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{30}$ кг. Считайте, что один год равен $3,15 \cdot 10^7$ с.
5. По современным данным, Солнце существует около 10 млрд лет. Принимая, что интенсивность излучения энергии Солнцем постоянна, определите, какую массу оно потеряло за это время в результате излучения. Какую часть массы Солнца это составляет?

§ 8.10. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

I. Согласно современным идеям планетной космогонии, с которыми вы познакомились в VIII классе, планеты и их спутники образовались из холодных твердых частиц — метеоритов и пыли. (Слово «космогония» образовано от греческого слова *kosmogonia* — происхождение мира, в данном случае происхождение и развитие планет и их спутников.)

II. После образования первичной холодной планеты важную роль начинает играть явление радиоактивности. В первичном газопылевом облаке имелись радиоактивные изотопы с большим периодом полураспада, в частности бета-радиоактивный калий-40 ($1,3 \cdot 10^9$ лет), рубидий-87 ($6,2 \cdot 10^{10}$ лет), индий-115 ($6 \cdot 10^{14}$ лет), цезий-135 ($3 \cdot 10^6$ лет) и альфа-радиоактивные платина-190 ($9,6 \cdot 10^{11}$ лет), висмут-209 ($2 \cdot 10^{17}$ лет), торий-232 ($1,4 \cdot 10^{10}$ лет), уран-235 ($7 \cdot 10^8$ лет) и уран-238 ($4,5 \cdot 10^9$ лет) и др.

За счет радиоактивного распада выделялось очень много энергии и внутренние области планеты сильно разогревались. Вещество планеты становилось вязким, частично плавилось и за счет сил тяготения в нем возникали конвективные потоки, приводившие к дифференциации вещества. В центральном ядре концентрировались более плот-

ное вещество (железо, никель) и более тяжелые химические элементы и их соединения. Более легкие химические элементы и их соединения образовали мантию, а кремний и его соединения — земную кору.

За счет конвективных потоков происходило перемещение континентальных плит, в результате чего образовались континенты и огромные впадины, заполненные водой, — моря и океаны. Наполнение плит друг на друга является причиной горообразования.

III. По этой же причине образуются вулканы. В тех местах, где происходит сильный разогрев вещества, возрастает давление. Происходит разрыв земной коры, и через кратер вулкана извергаются газы, вулканическая пыль и пепел, камни, вытекает лава.

Вулканическая деятельность характерна не только для Земли. Кратеры вулканического происхождения с потоками затвердевшей лавы имеются на Луне и Марсе, хотя действующих вулканов теперь на них нет. Грандиозные кратеры потухших вулканов обнаружены на Венере, однако до сих пор неясно, есть ли на ней действующие вулканы.

Космические аппараты «Вояджер» обнаружили более десятка действующих вулканов на спутнике Ио планеты Юпитер, а также гейзеры жидкого азота на спутнике Тритон планеты Нептун. На поверхности многих спутников планет-гигантов заметны тектонические разломы и другие следы геологической активности.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы современные представления о происхождении планетных систем?
2. Какую роль сыграли радиоактивные процессы в образовании ядра планеты, ее мантии и коры?
3. За счет каких процессов образуются континенты, горы, океанические впадины?
4. Что является причиной вулканической деятельности?

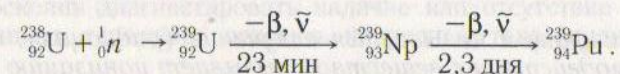
§ 8.11. ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. АКТИНОИДЫ

I. При рассмотрении явлений в ядерном реакторе мы обращали внимание только на процесс деления легкого изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$. Но в природном уране содержание этого изотопа составляет всего около 0,7%. В реакторах используется уран, обогащенный искусственно за счет добавки легкого изотопа, но и тогда его содержание не превышает нескольких процентов. Что же происходит с изотопом урана-238?

Мы уже говорили, что вторичные нейтроны, сталкиваясь с ядрами замедлителя, растрачивают свою кинетическую энергию и превращаются в тепловые нейтроны. Ядра урана-238 очень хорошо поглощают тепловые нейтроны, но при этом они не делятся, а превращаются в изотоп урана-239. Это изотоп β -радиоактивен с периодом полураспада 23 мин. При вылете β -частицы и электронного анти-

нейтрино возникает трансурановый (заурановый) элемент нептуний-239.

II. Нептуний-239 также β -радиоактивен с периодом полураспада 2,3 дня. За счет β -распада возникает еще один трансурановый элемент плутоний-239. Он является альфа-радиоактивным с огромным периодом полураспада 24 000 лет. Реакция превращения урана-238 в плутоний выглядит так:



Возникающий при этой реакции изотоп плутония является хорошим ядерным горючим, так как он делится под действием тепловых нейтронов. Поэтому он может применяться для обогащения природного урана с целью использования его в ядерных реакторах, а также в ядерных и термоядерных бомбах.

III. Получение трансурановых элементов и изучение их свойств показало, что все они вместе с актинием, торием, протактинием и ураном образуют одну группу элементов, аналогичную лантаноидам. На ускорителях удалось синтезировать все остальные элементы этой группы, называемой *актиноидами*: америций $^{243}_{95}\text{Am}$, кюрий $^{247}_{96}\text{Cm}$, берклий $^{247}_{97}\text{Bk}$, калифорний $^{251}_{98}\text{Cf}$, эйнштейний $^{254}_{99}\text{Es}$, фермий $^{257}_{100}\text{Fm}$, менделевий $^{258}_{101}\text{Md}$, нобелий $^{255}_{102}\text{No}$ и лоуренсий $^{256}_{103}\text{Lr}$. Элементы кюрий, эйнштейний, фермий, менделевий и лоуренсий были названы в честь великих ученых: Лоуренс построил в 1930 г. первый ускоритель заряженных частиц — циклотрон, нобелий назван в честь А. Нобеля — учредителя Нобелевских премий в области науки, литературы и борьбы за мир.

Большой вклад в синтез актиноидов внесли ученые Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне под Москвой под руководством Г. Н. Флерова. Ими были синтезированы изотопы нобелия $^{262}_{105}\text{No}$, лоуренсия $^{256}_{103}\text{Lr}$, а также элементов, уже не входящих в группу актиноидов. Это изотопы курчатовия $^{260}_{104}\text{Cv}$ и $^{264}_{104}\text{Cv}$, нильсбория $^{262}_{105}\text{Ns}$ и изотопы с зарядовыми числами 106 и 107, не получившие еще названий. Курчатовий и нильсборий названы в честь И. В. Курчатова и Н. Бора.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются реакции ядер урана-235 и урана-238 при поглощении тепловых нейтронов?
2. Как образуется нептуний?
3. Как образуется плутоний?
4. Почему получение плутония представляет интерес? Каковы его свойства?

5. Какую группу составляют актиний, уран и трансураниевые элементы? На что похожа эта группа?
6. Входят ли курчатовий и нильсборий в группу актиноидов?

§ 8.12. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИОНИЗУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

I. *Ионизирующим называется излучение (радиация), которое при взаимодействии с веществом вызывает ионизацию составляющих его атомов и молекул, т. е. превращает нейтральные атомы или молекулы в ионы.*

Ионизирующее излучение — это потоки заряженных частиц (электронов, альфа-частиц и т. д.), нейтронов и фотонов (квантов электромагнитного излучения). Заряженные частицы ионизируют вещество непосредственно при столкновениях с его атомами и молекулами. Это так называемая первичная ионизация. Выбываемые при этом электроны, если они обладают достаточной энергией, также могут ионизовать вещество — это вторичная ионизация. Ионизируют среду и быстрые нейтроны, соударяясь с ядрами.

Ионизация фотонами (гамма-квантами и квантами рентгеновского излучения) происходит за счет вырывания электронов с верхних электронных оболочек атомов (фотоионизация), а также в результате некоторых других процессов.

II. С процесса ионизации начинается негативное воздействие радиации на вещество, на живую клетку.

Живая клетка — это сложный механизм; она не способна продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях ее участков. Повреждение клеток живого организма ухудшает состояние нервной системы, обмен веществ, нарушает процесс деления клеток, изменяет вещество наследственности. От вида излучения, типа и энергии частиц, а также свойств вещества зависит, в какой части организма происходит ионизация и каков характер лучевых повреждений.

III. *Альфа-частицы* задерживаются, например, листом бумаги. Практически они не способны проникнуть через наружный слой кожи человека. Поэтому альфа-частицы не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные нуклиды, испускающие эти частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или с вдыхаемым воздухом. Тогда они становятся чрезвычайно опасными.

Бета-частицы (электроны и позитроны) обладают большей проникающей способностью. Они проходят в ткани организма человека на глубину один-два сантиметра. Однако слой алюминия толщиной в несколько миллиметров полностью поглощает бета-излучение.

Проникающая способность *гамма-излучения* (в том числе и рентгеновского) достаточно велика. Его может задержать лишь толстая свинцовая или бетонная плита. Рентгеновское излучение, пронизывая

тело человека, вызывает потемнение фотоэмульсии (рентгенография — рентгеновские снимки внутренних органов тела) или свечение экрана, поставленного на пути рентгеновских лучей за человеком (рентгеноскопия). При этом через мягкие ткани рентгеновское излучение проходит относительно свободно. Опухоли, кости и посторонние предметы сильнее поглощают рентгеновское излучение. Это позволяет врачам по рентгеновским снимкам или с помощью рентгеноскопии диагностировать наличие или отсутствие опухолей, обнаруживать переломы, находить инородные тела (пули, осколки и т. п.).

IV. Ионизирующее излучение опасно тем, что оно не фиксируется органами человека. Повреждение клеток, вызванное в живом организме радиацией, будет тем больше, чем больше энергии ионизирующее излучение передаст тканям. *Количество переданной организму энергии называют дозой излучения.* Дозу излучения, т. е. определенное количество энергии, организм может получить от любого радионуклида (источника) или от их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри его в результате попадания с пищей, водой или воздухом.

Поглощенная доза излучения измеряется отношением поглощенной организмом энергии E к его массе m :

$$D = E/m.$$

Единицей СИ поглощенной дозы излучения служит *грэй* (Гр). Один грэй (1 Гр) равен поглощенной дозе излучения, при котором облученному веществу массой 1 кг передается энергия излучения в 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Устаревшая единица — рад: $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$.

Естественный фон радиации (космическое излучение, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за один год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$ на человека.

Для лиц, работающих с источниками излучения, установлена предельно допустимая доза (ПДД), равная 0,05 Гр в год. Доза излучения, полученная за короткое время и равная 3—10 Гр, смертельна. Для населения предельно допустимая доза излучения составляет 0,1 от профессиональной и равна $5 \cdot 10^{-3} \text{ Гр} = 5 \text{ мГр}$.

На практике часто в качестве единицы дозы излучения используется *рентген* (Р). Приближенно можно считать, что $1 \text{ Р} \approx 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гр} = 8,4 \text{ мГр}$. Следовательно, ПДД для населения составляет около 0,6 Р, ПДД для профессионалов — около 6 Р.

V. Радиоактивные изотопы, получаемые с помощью ядерных реакторов и ускорителей элементарных частиц, находят применение в науке, медицине, сельском хозяйстве и промышленности. Наибольшее применение имеет метод меченых атомов. Дело в том, что химические

свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов. Таким образом, радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за распространением некоторого химического элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ. Этот метод нашел широкое применение в биологии, физиологии, медицине, промышленности.

Широко применяются ионизирующие излучения для изменения физико-химических свойств вещества (твердости, хрупкости и др.) путем его облучения. Ионизирующие излучения применяются также для ускорения химических реакций. Разрушая молекулы, эти излучения создают в веществе свободные радикалы, которые химически весьма активны.

С помощью ионизирующих излучений диагностируют и лечат злокачественные опухоли.

По степени поглощения ионизирующих излучений можно при известной плотности вещества определить толщину металлических пластин, например толщину корпуса морского судна. Наоборот, зная толщину слоя вещества, можно определить его плотность, а также наличие в нем внутренних дефектов. На этих принципах основаны гамма- и бета-толщинометры, плотнометры, дефектоскопы, приборы для контроля сварных швов при электросварке труб, корпусов кораблей и всевозможных других деталей.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется ионизирующим излучением? Какие виды ионизирующих излучений вам известны?
2. Каков механизм ионизации атомов и молекул?
3. Каково биологическое действие ионизирующих излучений?
4. Как отличаются ионизирующие способности альфа-, бета- и гамма-излучений? Как от них можно защититься?
5. Что называется поглощенной дозой излучения?
6. Чему равна единица СИ поглощенной дозы?
7. Где применяются ионизирующие излучения?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

8.1. Из плотной цветной бумаги или картона, окрашенных с одной стороны, нарежьте 100—120 квадратиков размером примерно 1×1 см. Насыпав их в стакан, встряхните интенсивно несколько раз и высыпьте на пол. Все квадратик, выпавшие окрашенной стороной, отодвиньте в одну сторону, остальные — в другую. Подсчитайте и запишите число цветных квадратиков; насыпьте их вновь в стакан. Повторяйте эту процедуру до тех пор, пока у вас не останется ни одного цветного квадратика. Результаты эксперимента занесите в таблицу.

Номер опыта, n	0	1	2	3	4	5	6	7	...
Число цветных квадратиков, N_n	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	...

Прodelайте эксперимент 3—4 раза и найдите среднее значение числа цветных квадратиков после каждого бросания. Постройте график функции $N_{\text{ср}} = f(n)$, откладывая на оси абсцисс номер опыта n , на оси ординат — среднее число цветных квадратиков $N_{\text{ср}}$ после каждого бросания. На график какого закона похожа полученная вами кривая?

8.2. Вероятность выпадения квадратика белой или окрашенной стороной одинакова и равна 1/2. Следовательно, число цветных квадратиков после первого бросания должно быть равно $N_1 = N_0/2$, после второго бросания $N_2 = N_1/2 = N_0/2^2$, после третьего бросания $N_3 = N_2/2 = N_0/2^3$ и т. д. Насколько близки результаты вашего эксперимента к предсказаниям теории? Когда расхождений больше — при большом или малом числе квадратиков?

8.3. Будем рассуждать по аналогии. Квадратик, выпавший окрашенной стороной, аналогичен нераспавшемуся ядру, выпавший белой стороной — распавшемуся ядру. Тогда закон распределения числа нераспавшихся ядер от времени (закон радиоактивного распада) должен быть аналогичным закону распределения цветных квадратиков от числа бросаний. Подтверждает ли ваш эксперимент эту аналогию?

Глава 9. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 9.1. МИР ЗВЕЗД

I. В VIII классе вы познакомились с природой одной из звезд — Солнца. Часто говорят, что звезды — это тела, состоящие из горячей плазмы. Если иметь в виду наше Солнце, то такое краткое определение окажется правильным. Но среди многообразия мира звезд есть немало таких объектов, которые очень значительно отличаются по своим физическим характеристикам от Солнца. Чтобы определить эти физические характеристики, необходимо прежде всего узнать, на каких расстояниях от нас находятся звезды.

В первой половине XIX в. удалось измерить годовые параллаксы ближайших звезд и вычислить расстояние до них.

Другой метод определения расстояний до звезд — определение светимости звезд. Светимостью звезды называется мощность ее излучения, т. е. энергия, излучаемая поверхностью звезды в единицу времени. Обозначается светимость буквой L . В ряде случаев узнать расстояние до звезды можно, определив по каким-либо косвенным признакам светимость звезды.

Точнее всего можно определить светимость некоторых типов звезд, которые называются *нестационарными* или *переменными*. В числе подобных звезд нужно прежде всего отметить те звезды, которые строго периодически меняют свой блеск, причем период изменения блеска зависит от светимости звезды: чем больше светимость звезды, тем больше этот период. Этот класс переменных звезд называют *цефеидами* (потому что первой из открытых звезд этого типа была звезда δ Цефея). Именно благодаря наличию зависимости период — светимость цефеиды называют *маяками Вселенной*. Действительно, определив по наблюдениям, с каким периодом меняется блеск звезды, можно установить ее светимость, а значит, и расстояние не только до самой цефеиды, но и до той группы или скопления звезд, к которой она принадлежит.

II. Способ определения расстояний по цефеидам особенно важен потому, что это звезды-гиганты, имеющие высокую светимость. Они видны на больших расстояниях, что позволяет определить расстояния до весьма удаленных объектов. Между тем по измерениям параллакса можно определить расстояния только до близких звезд, удаленных от нас не более чем на 200 пк (парсек).

Периодические изменения блеска цефеид и некоторых других типов переменных звезд объясняются их *пульсацией* — ритмическим процессом расширения и сжатия верхних слоев звезды, в результате чего меняется не только площадь ее излучающей поверхности, но и температура этих слоев.

III. Изучая спектры звезд, астрономы выделили десять основных спектральных классов: O, B, A, F, G, K, M.

Сопоставляя светимость звезд и их спектральные классы, можно построить диаграмму светимость — спектр, которая покажет, что существует несколько последовательностей звезд (рис. 9.1): *сверхгиганты*, *гиганты*, *главная последовательность* (к звездам этой последовательности относится Солнце), *белые карлики* и др.

Звезды каждой из этих последовательностей имеют характерные особенности в спектре, по которым и можно установить их светимость.

IV. По светимости звезды отличаются друг от друга наиболее значительно. Звезды наибольшей светимости излучают в

несколько миллионов раз больше энергии, чем Солнце, а другие, светимость которых очень мала, излучают энергию в сотни тысяч раз меньше Солнца. Столь значительные различия связаны с тем, что температура наружных слоев звезд и их размеры тоже далеко не одинаковы.

Температуру тех слоев, от которых приходит излучение, определяют по спектру. Вы уже знаете (см. рис. 4.19), что цвет нагретого тела зависит от его температуры, т. е. с повышением температуры положение в спектре длины волны (частоты), на которую приходится максимум излучения, смещается от красной части спектра к фиолетовой. При еще более высоких температурах максимум излучения уходит за пределы видимого спектра к более высоким частотам (короткие волны). Этот закон позволяет по распределению энергии в спектре звезды определить температуру ее наружных слоев. Обычно температура поверхности различных типов звезд находится в пределах от 2500 до 50 000 °C. Именно температура этих слоев определяет светимость звезды.

Следовательно, если измерить светимость и температуру наружных слоев звезды, то можно рассчитать площадь ее светящейся поверхности и тем самым определить ее размеры. Расчеты показали, что самые крупные звезды (гиганты и сверхгиганты) по диаметру превосходят Солнце в сотни раз, а звезды-карлики в десятки и сотни раз меньше Солнца. Эти звезды по своим размерам сопоставимы с размерами нашей планеты и даже могут быть меньше Земли.

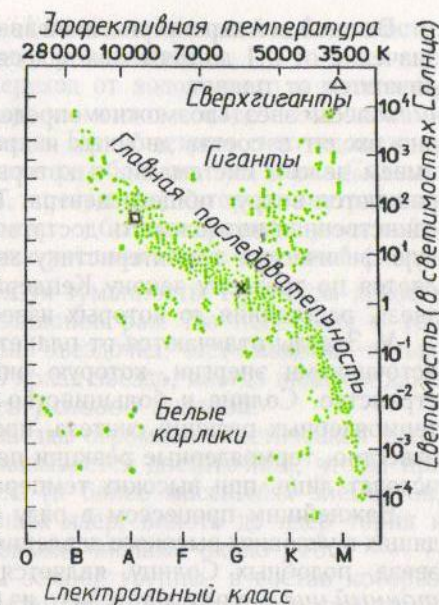


Рис. 9.1

Важнейшей характеристикой звезд является масса, которая имеет значение от 0,1 до нескольких десятков масс Солнца. Этим они отличаются от планет.

Массы звезд возможно определить лишь в тех случаях, когда они входят в состав двойных и кратных систем. Иначе говоря, мы имеем дело с системами, в которых две, три или более звезд обращаются вокруг общего центра. Тем самым обеспечивается почти единственная возможность достаточно точно определить такую важную физическую характеристику звезды, как ее масса. Она вычисляется по третьему закону Кеплера для тех двойных (или кратных) звезд, расстояния до которых известны.

V. Звезды отличаются от планет прежде всего тем, что являются источниками энергии, которую они излучают в космическое пространство. Солнце и большинство звезд излучают энергию за счет термоядерных реакций синтеза, происходящих в их недрах. Но, как известно, термоядерные реакции потому так и называются, что происходят лишь при высоких температурах: более 10 млн градусов.

Важнейшим процессом в ряду термоядерных реакций, происходящих в условиях высокого давления и высокой температуры в недрах звезд, подобных Солнцу, является так называемый *протон-протонный цикл*, в результате чего из четырех ядер водорода (протонов) происходит образование ядра гелия (альфа-частицы), состоящего из двух протонов и двух нейтронов. За счет реакции превращения водорода в гелий звезда, подобная Солнцу, может светить несколько миллиардов лет. Звезды, в которых массы в десятки раз больше солнечной, а светимость в миллионы раз превышает светимость Солнца, растрачивают свои запасы водорода гораздо быстрее, т. е. за несколько десятков миллионов лет.

VI. После выгорания водорода ядро звезды сжимается и температура в нем повышается до 100—200 млн градусов. В этих условиях начинаются реакции между ядрами гелия — так называемый тройной α -процесс. При этом образуется стабильный изотоп углерод-12 и выделяется большое количество энергии. Запасов гелия в звезде хватает примерно на 10 млн лет. Наряду с этой реакцией происходят и другие, продуктами которых являются нейтроны и ядра таких элементов, как кислород.

По мере увеличения температуры в ядре звезды происходит образование тяжелых элементов (натрий, сера, магний и др.) как в результате присоединения нейтронов к легким ядрам, так и в результате термоядерных реакций между самими легкими элементами. Таким образом, в недрах звезды образуются ядра многих химических элементов, вплоть до ядер железа.

Что же касается образования элементов, массовые числа которых больше, чем у железа, то их синтез в обычных звездах невозможен. Дело в том, что на образование этих ядер путем синтеза из элементов с массовыми числами около 40—60 не хватает энергии. Дефект массы и энергия связи у элементов с массовыми числами $A \geq 60$ меньше, чем у элементов с массовыми числами около 56, например у изотопов

железа (см. рис. 8.4). Но тяжелые элементы встречаются, в частности, на Земле, и следует объяснить их происхождение.

Оказывается, что плавный переход от водородного к гелиевому циклу и далее к циклам с синтезом элементов с массовыми числами до 56 характерен не для всех звезд. При быстром сжатии звезд, у которых массы в несколько десятков раз больше, чем масса Солнца, иногда происходит мощный взрыв, в результате которого центральная часть звезды превращается в пульсар — быстро вращающуюся нейтронную звезду. Наружная оболочка расширяется с огромной скоростью (от $5 \cdot 10^7$ до 10^8 м/с), образуя туманность. При этом яркость звезды возрастает в десятки миллионов раз. На небосводе в том месте, где была еще заметна слабая звездочка, часто видимая только в телескоп, начинает сиять очень яркая звезда, иногда видимая даже днем. Такая звезда называется *сверхновой звездой*.

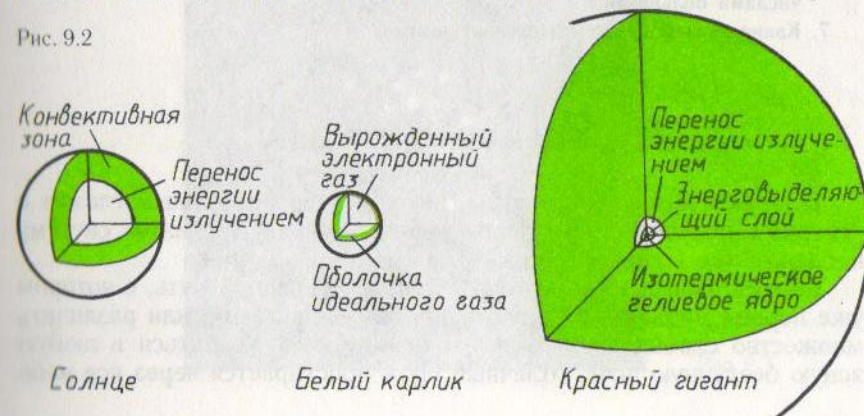
VII. При взрыве сверхновой звезды огромная кинетическая энергия разлетающегося вещества оказывается достаточной, чтобы при столкновении ядер изотопов железа (и более массивных элементов) произошел синтез более массивных ядер, вплоть до ядер тория и урана и даже элементов с массовыми числами около 270.

Отсюда следует, что планеты земной группы, в состав которых входят все элементы периодической системы химических элементов, образовались, по-видимому, из вещества, появившегося в очень давние времена при взрыве какой-то сверхновой звезды. И лишь затем из этого вещества, существовавшего в виде туманности и космической пыли, образовались планеты, в том числе и наша Земля.

VIII. Солнце существует уже в течение нескольких миллиардов лет благодаря тому, что гравитационные силы, стремящиеся его сжать, уравниваются силами давления горячей плазмы, которые препятствуют его сжатию. Подобное состояние гидростатического равновесия характерно не только для Солнца, но и для большинства звезд, которые можно называть обычными.

Однако это вовсе не означает, что внутреннее строение всех звезд одинаково. Это показывают расчеты моделей звезд (рис. 9.2), проводимые на основе данных о том, сколько энергии

Рис. 9.2



выделяется в недрах звезд и какими способами этот поток энергии передается наружу. Так же как и у Солнца, этот перенос может осуществляться переизлучением и конвекцией, а теплопроводность, как правило, не играет существенной роли.

Напомним, что у Солнца из ядра, где энергия выделяется при термоядерных реакциях, она попадает сначала в зону лучистого переноса, а затем в конвективную зону. У звезд, подобных Солнцу, толщина конвективной зоны тем больше, чем ниже температура их поверхностных слоев. Звезды большой светимости могут не иметь конвективной зоны снаружи, у них конвекция происходит в самом ядре, а остальную часть объема составляет оболочка, где осуществляется лучистый перенос энергии.

Самые крупные звезды (красные гиганты и сверхгиганты), наоборот, почти целиком представляют собой конвективную зону, внутри которой расположено маленькое ядро, окруженное тонкими слоями энерговыделения лучистого переноса.

IX. В отличие от обычных звезд *белые карлики* являются весьма необычными звездами, состоящими из так называемого вырожденного газа и имеющими лишь тонкую оболочку из обычного газа.

Они образуются при эволюции звезд, массы которых в 3—4 раза больше массы Солнца. Современные представления об эволюции звезд будут рассмотрены в следующем параграфе.

Вопросы для самопроверки

1. Как определяются расстояния до близких и далеких звезд? Какую роль при этом играют цефеиды?
2. Что называется светимостью звезды?
3. Как определяется температура поверхностного слоя звезды?
4. Какие процессы являются источником энергии, которую излучают звезды?
5. За счет каких реакций в звездах образуются химические элементы с массовыми числами менее 60?
6. При каких условиях происходит синтез химических элементов с массовыми числами больше 60?
7. Какие звезды называются сверхновыми?

§ 9.2. НАША ГАЛАКТИКА

I. Практически все объекты, видимые невооруженным глазом в северном полушарии звездного неба, составляют единую систему небесных тел (главным образом, звезд) — Галактику.

Характерной для нее деталью является Млечный Путь, в котором уже первые наблюдения с помощью телескопа позволили различить множество слабых звезд. Как вы можете сами убедиться в любую ясную безлунную ночь, Млечный Путь простирается через все небо

светлой белесоватой полосой неровной клочковатой формы. Вероятно, кому-то он напомнил след от пролитого молока. Не случайно само слово «Галактика» происходит от греческого слова *galaxis*, которое означает «молочный, млечный».

Не входит в состав Галактики лишь слабо заметное туманное пятно, видимое в направлении созвездия Андромеды и напоминающее по форме пламя свечи, — туманность Андромеды. Она представляет собой другую, подобную нашей звездную систему, удаленную от нас на расстоянии 2,3 млн световых лет.

Только открытие в 1923 г. в этой туманности нескольких цефеид окончательно убедило ученых, что это другая галактика. Это событие можно считать также и открытием нашей Галактики. И в дальнейшем успехи в исследовании нашей Галактики во многом были связаны с изучением других галактик, которых сейчас известно несколько миллиардов.

Наши знания о размерах, составе и структуре Галактики получены в основном за последние полвека. Диаметр нашей Галактики примерно 100 тыс. световых лет (около 30 тыс. парсек). Число звезд — около 200 млрд, и составляют они 98% ее общей массы. Оставшиеся 2% — межзвездное вещество в виде газа и пыли.

II. Звезды образуют скопления, различные по своей форме — *шаровые* и *рассеянные* и различные по численности объектов. В *рассеянных скоплениях* звезд оказывается относительно немного: от нескольких десятков до нескольких тысяч. Самым известным рассеянным скоплением является скопление Плеяды (рис. 9.3), видимое в созвездии Тельца. В том же созвездии находится скопление Гиады — треугольник из слабых звезд вблизи яркого Альдебарана. Часть звезд, относящихся к созвездию Большой Медведицы, также составляет рассеянное скопление. Практически все скопления этого типа видны вблизи Млечного Пути.



Рис. 9.3

Шаровые звездные скопления насчитывают в своем составе сотни тысяч и даже миллионы звезд. Лишь два из них (в созвездиях Стрельца и Геркулеса) можно с трудом увидеть невооруженным глазом (см. цветную вклейку IV, 2). Шаровые скопления распределены в Галактике по-иному. Большая часть звезд расположена вблизи центра Галактики, а по мере удаления от него их концентрация в пространстве уменьшается.

Различается и «население» скоплений этих двух типов. В состав рассеянных скоплений входят главным образом звезды, относящиеся (как и Солнце) к главной последовательности. В шаровых — много красных гигантов и субгигантов.

Именно изучение звездных скоплений предоставляет ученым наилучшую возможность сравнить теоретические выводы о строении и эволюции звезд с данными их наблюдений. Очевидно, что звездные скопления вовсе не представляют собой случайно возникшие группировки готовых звезд. Наоборот, звезды-скопления потому и видны как скопления, что они формировались в едином процессе, начавшемся для всех звезд примерно в одно время. Поэтому химический состав и возраст звезд можно считать (в первом приближении) одинаковыми для всех звезд данного скопления. Следовательно, различие наблюдаемых характеристик звезд, входящих в это скопление, обусловлено различием их масс.

Масса звезды, как говорилось в предыдущем параграфе, определяет интенсивность протекания реакции синтеза гелия из водорода. В недрах более массивных звезд водород выгорает значительно быстрее (за несколько десятков миллионов лет), чем на Солнце, светящем на протяжении не менее 5 млрд лет. Сравнивая характеристики звезд, полученные на основании расчетов, с теми, которые реально наблюдаются у звезд, входящих в скопление, можно установить время, прошедшее с момента начала формирования этих звезд.

Расчеты показали, что возраст многих рассеянных скоплений примерно 2—3 млрд лет, в то время как возраст шаровых скоплений значительно больше и может достигать 12—14 млрд лет.

Расположение звезд в Галактике представлено на схеме, показывающей ее структуру в плоскости, перпендикулярной плоскости Млечного Пути (рис. 9.4). На рисунке указаны положения Солнца и центральной части Галактики — ядра, которое находится в направлении созвездия Стрельца; диска, где расположено большинство звезд, спиральных рукавов и сферического гало.

III. Существенные сведения о распределении межзвездного вещества в Галактике удалось получить благодаря развитию радиоастрономии. Выяснилось, что межзвездный газ, основную массу которого составляет водород, испускающий радиоволны длиной 21 см, образует вокруг центра Галактики ветви, имеющие спиральную форму. Такая же структура прослеживается и по некоторым типам звезд. Поэтому наша Галактика относится к наиболее распространенному классу спиральных галактик.

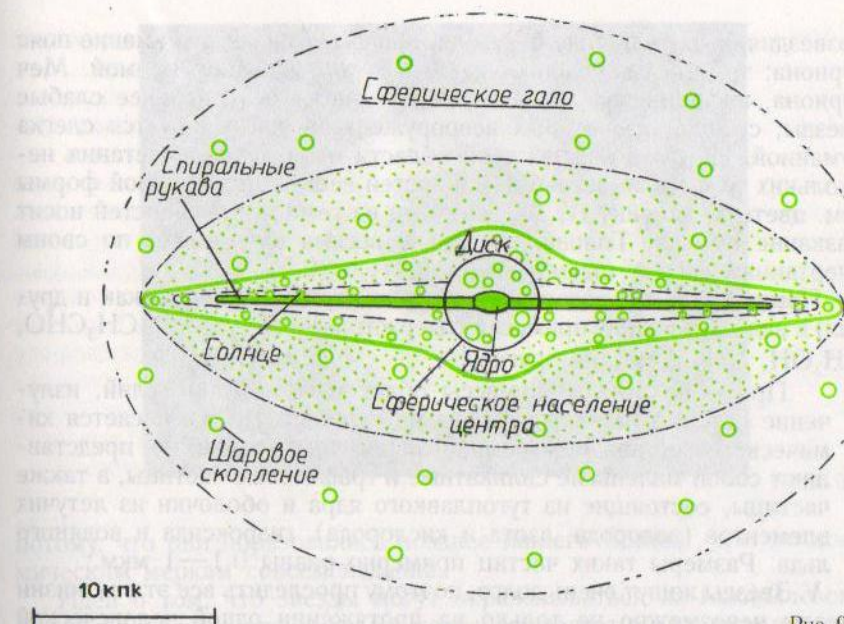


Рис. 9.4

Надо отметить, что межзвездное вещество существенно осложняет изучение Галактики оптическими методами. Оно распределено в объеме, занятом звездами, весьма неравномерно. Основная масса газа и пыли располагается вблизи плоскости Млечного Пути, где образует огромные облака: порой их диаметр равен сотням световых лет. Пространство между облаками тоже содержит определенное вещество, хотя и в очень разреженном состоянии. Форма Млечного Пути и видимые в нем темные промежутки (самый большой из них вызывает его раздвоение, которое протянулось от созвездия Орла до созвездия Скорпиона) объясняются тем, что межзвездная пыль мешает нам видеть свет звезд, расположенных за этими облаками. Именно такие облака не дают нам возможности увидеть ядро Галактики, которое можно изучать только с помощью инфракрасного излучения и радиоволн, идущих от этого ядра.

IV. Наблюдаемое во многих случаях тесное соседство звезд и туманностей различного типа уже давно наводило на мысль о том, что это соседство не случайно. Звезды и межзвездная среда находятся в тесном взаимодействии друг с другом. Изучение физических процессов в газопылевых комплексах позволяет понять, как происходит процесс звездообразования.

Согласно современным представлениям, области звездообразования в нашей Галактике расположены в основном на расстоянии 4—8 килопарсек от центра. Они связаны с облаками молекулярного водорода, имеющими массы в сотни тысяч раз больше массы Солнца. Ближайшее из них наблюдается в созвездии Ориона, которое украшает звездное небо зимой. Помимо ярчайших звезд этого

созвездия — Бетельгейзе и Ригеля, обращает на себя внимание пояс Ориона: три звезды, расположенные почти на одной прямой. Меч Ориона, висящий на его поясе, обозначают еще три более слабые звезды, средняя из которых невооруженному глазу кажется слегка туманной. На фотографиях этой области неба видны сочетания нескольких темных и светлых туманностей весьма причудливой формы (см. цветную вклейку IV, 1). Так, одна из темных туманностей носит название Конская Голова, поскольку весьма напоминает по своим очертаниям фигуру шахматного коня (рис. 9.5).

Помимо молекул водорода, в облаках этого комплекса (как и других) в виде небольших примесей содержатся молекулы CO , CH_3CHO , CH_3OH , NH_3 и многие другие.

Примерно 25—30% массы облаков составляет гелий, излучение которого наблюдать пока не удается. Что же касается химического состава межзвездной пыли, то пылинки эти представляют собой маленькие силикатные и графитовые частицы, а также частицы, состоящие из тугоплавкого ядра и оболочки из летучих элементов (водорода, азота и кислорода), гидроксида и водяного льда. Размеры таких частиц примерно равны $0,1\text{—}1\text{ мкм}$.

V. Звезды живут очень долго, поэтому проследить все этапы жизни звезды невозможно не только на протяжении одной человеческой жизни, но даже на протяжении существования всего человечества. Казалось бы, невозможно сделать вывод о том, что все звезды Галактики образовались в одно время; процесс их образования происходит непрерывно. Тем не менее, сравнивая выводы теории о сроках существования массивных горячих звезд с наблюдаемыми данными, можно прийти к выводу, что звезды формируются и в наши дни.

В самом деле, согласно геологическим данным, наша планета существует не менее 5 млрд лет, возраст нашего Солнца и нашей Галактики никак не может быть меньше этой величины. В то же время расчеты показывают, что наиболее массивные звезды не могут существовать дольше чем 10—20 млн лет. Мы видим их только



Рис. 9.5

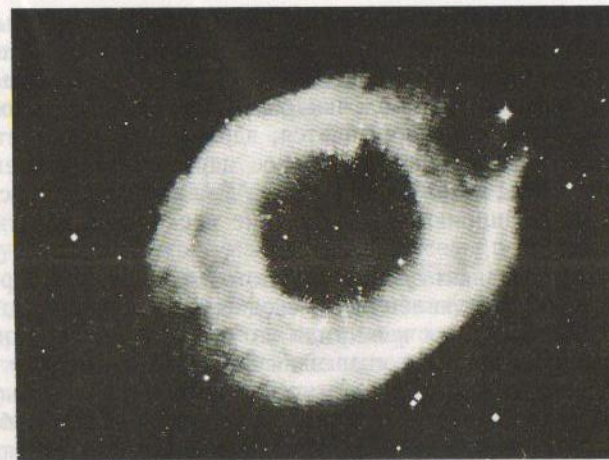


Рис. 9.6

потому, что они образовались позднее нашего Солнца, т. е. по космическим меркам совсем недавно.

Идея о том, что звезды могут образовываться из газопылевого вещества, подтверждается теоретическими расчетами гравитационной неустойчивости такой первоначально однородной среды. Согласно этой теории, в среде неизбежно должны возникать небольшие неоднородности, т. е. сгущения с повышенной плотностью вещества. В тех случаях, когда масса конденсаций превышает некоторый предел, под действием гравитационных сил конденсации продолжают сжиматься и в конце концов превращаются в звезды. Этот естественный процесс приводит к тому, что звезды, как правило, образуются не поодиночке, а группами и целыми скоплениями.

На стадии гравитационного сжатия эта конденсация, называемая протозвездой, нагревается и излучает только за счет освобождающейся при сжатии энергии. Причем на начальной стадии формирования будущая звезда излучает в инфракрасном диапазоне. Сжатие под действием собственного тяготения продолжается до тех пор, пока ему не начнут противодействовать силы давления. Это случается лишь после того, как температура в недрах звезды становится достаточной для начала термоядерных реакций превращения водорода в гелий, т. е. выше 10^7 градусов.

VI. Наряду с газопылевыми комплексами — своеобразными звездными колыбелями, в Галактике наблюдаются и другие типы туманностей, являющиеся результатом процессов, происходящих в конце жизни звезд различных масс.

К их числу относятся прежде всего планетарные туманности, которые были названы так, поскольку в слабые телескопы они выглядят как диски далеких планет — Урана и Нептуна (рис. 9.6). Судя по всему эти туманности вместе с наблюдаемыми внутри их белыми карликами образуются на определенной стадии эволюции звезд. По-

степенно, по мере того как в центральной части ядра звезды остается все меньше и меньше водорода, слои, в которых происходят термоядерные реакции, охватывают области, расположенные ближе к поверхности звезды. Ее оболочки разогреваются и разбухают. Наконец, когда водород исчерпывается, ядро звезды сжимается, а наружные оболочки, которые маленькое ядро своим тяготением уже не может удержать, отделяются и уходят в межзвездное пространство. Эти оболочки расширяются и в течение нескольких десятков тысяч лет рассеиваются.

По-другому выглядят туманности, которые возникают в результате наиболее грандиозных явлений, наблюдаемых в мире звезд: вспышек сверхновых звезд. Самая известная из числа таких туманностей — Крабовидная туманность в созвездии Тельца — результат вспышки сверхновой звезды, столь яркой, что ее в 1054 г. в течение 23 сут видели даже днем. В настоящее время внутри туманности наблюдается пульсар — быстровращающаяся нейтронная звезда с периодом вращения 0,033 с.

VII. Теория звездной эволюции предсказывает, что если после взрыва звезды масса сжимающегося ядра окажется в 3—5 раз больше массы Солнца, то, во-первых, никакие силы давления не смогут остановить его коллапса; во-вторых, излучение, испускаемое этим объектом, не сможет покинуть его окрестностей, преодолеть его гравитационное притяжение. Поэтому такие объекты получили название черных дыр.

Обнаружить черную дыру можно, если она является компонентом двойной звезды. Если другой компонент такой системы является обычной звездой и находится достаточно близко к черной дыре, то последняя будет притягивать газ из атмосферы этой звезды. При падении на черную дыру газ разогревается до высоких температур, при которых возникает рентгеновское излучение. К настоящему времени на небе обнаружено несколько сотен рентгеновских источников излучения. Вероятно, некоторые из них содержат черные дыры.

VIII. Итак, мы видим, что Галактика представляет собой весьма сложную систему, в которой звезды, межзвездное вещество и другие объекты тесно связаны между собой. В Галактике происходит постоянный круговорот вещества: формирование звезд из газопылевых туманностей, потеря вещества звездами в результате взрывных и более спокойных процессов их эволюции, затем образование звезд следующего поколения из межзвездного вещества и т. д.

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляет наша Галактика?
2. Как было доказано, что туманность Андромеды не входит в нашу Галактику?
3. Что собой представляют звездные скопления?
4. Какова структура Галактики?
5. Как распределено межзвездное вещество в Галактике?

6. Каков процесс эволюции звезд различных масс?
7. Из чего и как образуются звезды?
8. Как возникают белые карлики и сверхновые звезды?
9. Что собой представляет черная дыра?

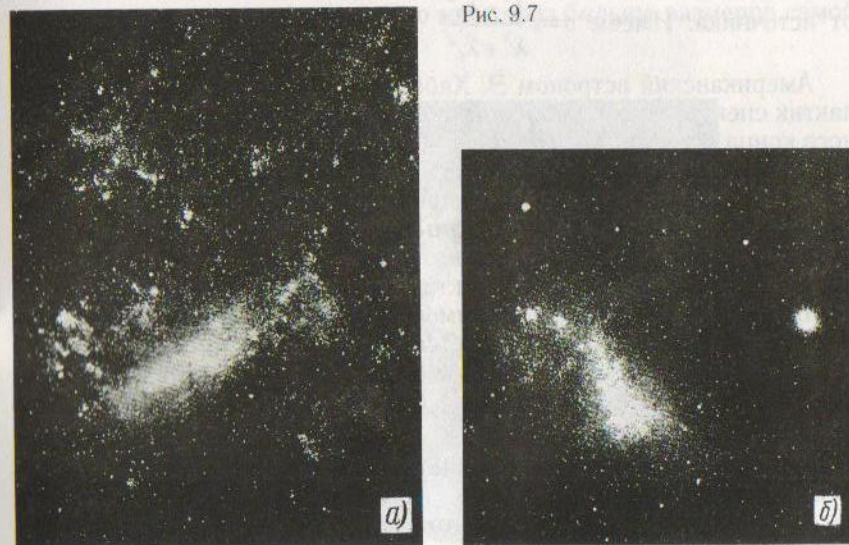
§ 9.3. ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

I. Вы уже знаете, что туманность Андромеды представляет собой звездную систему — галактику такого типа, как наша Галактика. Обе они принадлежат к наиболее многочисленному типу спиральных галактик, характерная особенность которых отражена в самом названии. Видимо, галактика М31 (таково обозначение туманности Андромеды по одному из первых списков-каталогов этих объектов) несколько больше нашей по своим размерам и количеству входящих в нее звезд.

Невооруженным глазом, кроме М31, можно видеть еще только две галактики: Большое (рис. 9.7, а) и Малое (рис. 9.7, б) Магеллановы Облака. Они находятся в южном полушарии неба, в созвездии Золотой Рыбы, и в наших широтах не видны. Эти самые близкие к нам галактики являются спутниками нашей Галактики. Выглядят они как два облачка, как бы оторвавшиеся от Млечного Пути. Первыми из европейцев о них узнали участники кругосветного путешествия Магеллана. На фотографиях Магеллановых Облаков видно очень много отдельных звезд и звездных скоплений, принадлежащих этим галактикам.

Наблюдения цефеид в Магеллановых Облаках показали, что расстояние до них составляет около 150 тыс. световых лет. С такого расстояния звезды, подобные Солнцу, не видны ни в какие телескопы.

Рис. 9.7



Зато горячие голубые сверхгиганты наблюдаются в большом количестве.

Туманность Андромеды более чем в 10 раз дальше от нас, чем Магеллановы Облака. Но и в ней с помощью больших телескопов можно наблюдать много звезд высокой светимости, в том числе цефеид, по которым и определили расстояние до нее.

II. Расстояния до далеких галактик определяются по красному смещению, которое наблюдается в спектрах большинства галактик. Этот сдвиг линий в спектрах объясняется эффектом Доплера.

Оказывается, что если источник, излучающий электромагнитные волны длиной λ_0 , удаляется от наблюдателя, то спектральные приборы наблюдателя регистрируют излучение длиной волны $\lambda > \lambda_0$. А поскольку в видимом участке спектра красному цвету соответствуют более длинные волны, то говорят о красном смещении даже в том случае, когда регистрируется не видимый свет, а радиоволны с помощью радиотелескопов.

Как доказывается в теории относительности, сдвиг спектральных линий связан со скоростью источника следующим соотношением:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}},$$

где v — скорость источника (или наблюдателя); c — скорость света в вакууме. Это и есть выражение для эффекта Доплера. Из этой формулы, зная λ и λ_0 , можно определить скорость удаления источника от наблюдателя, или, что то же самое, скорость удаления наблюдателя

от источника. Имеем $v = c \frac{\lambda^2 - \lambda_0^2}{\lambda^2 + \lambda_0^2}$.

Американский астроном Э. Хаббл обнаружил, что в спектрах галактик спектральные линии обычно бывают смещены в сторону красного конца спектра, т. е. в сторону более длинных волн. Это означает, что наблюдаемые объекты — в данном случае галактики — удаляются от нас. В 1929 г. он пришел к выводу, что **скорости удаления галактик, определенные по красному смещению, растут примерно прямо пропорционально расстояниям до них: $v = HD$** , где v — скорость удаления галактики; D — расстояние до нее; H — некая постоянная. Эта зависимость получила название **закона Хаббла**. Постоянная H называется **постоянной Хаббла**.

Определение этой величины оказалось исключительно трудной задачей. Часто принимают для H значение 75 (км/с) / Мпк. Это означает, что если галактика удаляется от нас со скоростью $v = 15 \cdot 10^3$ км/с, то расстояние до нее $D = 200$ Мпк, или около 600 млн световых лет.

Закон Хаббла выполняется только для далеких галактик, рас-

стояния до которых превышают 5—10 Мпк. Некоторые близкие галактики (в том числе туманность Андромеды) даже приближаются к нам, т. е. имеют в спектре не красное, а фиолетовое смещение.

III. Несмотря на чрезвычайное разнообразие внешнего вида галактик, их можно разделить на несколько типов: спиральные (рис. 9.8), эллиптические и неправильные (см. рис. 9.7). Рисунок 9.9 воспроизводит так называемый камертон Хаббла — классификацию, предложенную Э. Хабблом, одним из пионеров изучения мира галактик, сделавшим в этой области немало важнейших открытий.

IV. Галактики являются самыми крупными звездными системами в природе, в которых звезды притягивают друг друга.

Хотя наша Галактика спиральная, но, находясь внутри нее, мы не можем видеть спирали непосредственно. Однако мы знаем об их существовании по радионаблюдениям межзвездного газа, который находится преимущественно в спиральных ветвях.

Две звездные составляющие спиральной галактики — массивный диск и сферическая подсистема — особенно хорошо видны, когда мы наблюдаем галактику с ребра. Примером может служить галактика Сомбреро, находящаяся в созвездии Девы (см. цветную вклейку IV, 3).

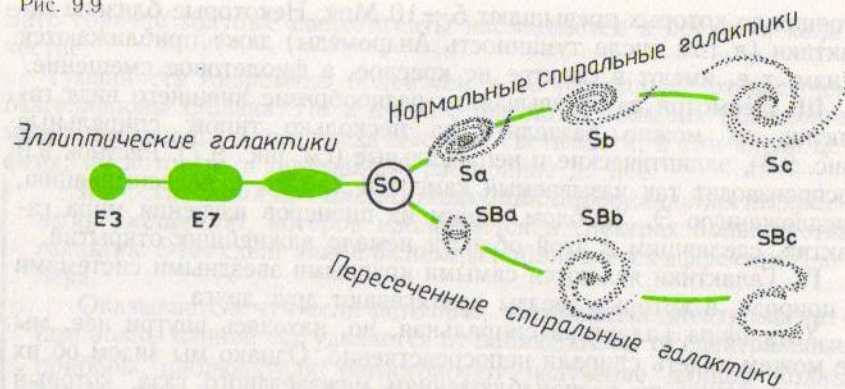
V. Оказалось, что в ядрах некоторых галактик, в их центрах, происходит выделение колоссального количества энергии, которое нельзя объяснить излучением или взрывом обычных звезд. Такие галактики называются **галактиками с активными ядрами**. Иногда в центре галактики наблюдается мощный источник электромагнитных волн: видимого, инфракрасного или ультрафиолетового, а в некоторых случаях и рентгеновского излучений.

Из ядра галактики происходит выброс мощных потоков частиц, движущихся с космическими скоростями. Электроны, содержащиеся в этих потоках, создают колоссальные источники электромагнитных волн, размеры которых нередко во много раз больше размеров самой



Рис. 9.8

Рис. 9.9



галактики. Этот источник располагается симметрично относительно нее (рис. 9.10). Галактики, содержащие мощные радиоисточники, называются *радиогалактиками*.

VI. В 1963 г. в спектре звездоподобного радиоисточника были обнаружены линии поглощения, смещенные в красную часть спектра так сильно, как это могло быть только у чрезвычайно далекого объекта. А это значит, что его светимость должна в 100 раз превышать светимость самых ярких галактик. После того как были открыты и другие подобные объекты, их стали называть *квазизвездными* (т. е. похожими на звезды) источниками радиоизлучения (сокращенно *квазарами*). Их природа долгое время оставалась непонятной, но постепенно выяснилось, что квазары представляют собой активные ядра далеких гигантских галактик. Расстояния до многих квазаров, определенные по красному смещению, превышают 5 млрд световых

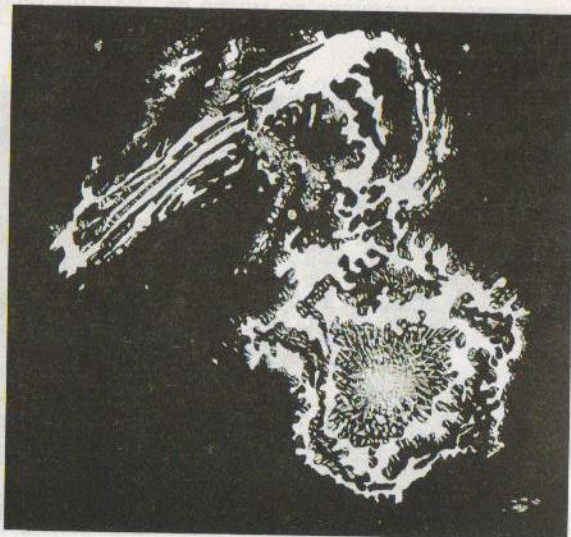


Рис. 9.10

лет. На таких больших расстояниях галактики нельзя увидеть. Итак, свет, который приходит к нам сегодня, покинул эти далекие объекты миллиарды лет тому назад. Поэтому, изучая галактики и квазары, мы как бы заглядываем в далекое прошлое Вселенной.

Вопросы для самопроверки

1. Какие галактики вам известны?
2. Как формулируется закон Хаббла?
3. Какие основные типы галактик вы знаете?
4. Что представляет собой межзвездная среда в галактиках?
5. Что представляют собой радиогалактики?
6. Что представляют собой квазары?
7. Сколько лет свет от квазаров идет до нас?

Упражнения

1. В спектре некоторой галактики красная линия серии Бальмера длиной волны $\lambda_0 = 656,3$ нм воспринимается как свет длины волны $\lambda = 678,6$ нм. С какой скоростью эта галактика удаляется от нас?
2. В спектре радиогалактики 3C295 отношение длин воспринимаемой и излучаемой волн $\lambda/\lambda_0 = 1,4$. Определите скорость удаления этой галактики.
3. Приняв постоянную Хаббла $H = 75$ (км/с)/Мпк, определите расстояния до этих галактик.
4. У квазара 3C9 отношение длин волн $\lambda/\lambda_0 = 3$. Определите его скорость и расстояние до него.
5. Сколько времени до нас идет свет от радиогалактики 3C295 и от квазара 3C9?

§ 9.4. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

I. Исследования все более и более далеких объектов во Вселенной не только позволили понять их состав и строение, но также открыли возможности для изучения свойств Вселенной в целом. Этим занимается раздел астрономии, который называется *космологией*. (Слово «космология» образовано от греческих слов kosmos — мировое пространство и logos — слово, учение.)

Важнейшим достижением науки второй половины XX в. является создание довольно стройной и строгой теории эволюции Вселенной на протяжении 10—20 млрд лет. Представления об эволюции Вселенной и ее нестационарности вначале казались столь непривычными и неожиданными, что даже такой выдающийся ученый, как А. Эйнштейн, вначале отнесся к ним недоверчиво. Но сейчас эта теория общепринята. Рассмотрим основные научные данные, на которых строится современная космология.

Открытие Э. Хабблом красного смещения показало, что далекие

галактики удаляются от нас во все стороны со скоростями, прямо пропорциональными расстояниям до них. Однако из этого вовсе не следует, что они разбегаются именно от нашей Галактики как от центра. Правильным будет другой вывод: *все галактики удаляются друг от друга*, т. е. *Вселенная в целом расширяется*. Наблюдаемая картина расширения не зависит от положения наблюдателя.

II. Учитывая структуру распределения галактик, Вселенную можно считать однородной в масштабах около 1 млрд световых лет. Иначе говоря, если в различных ее областях выделить кубы со сторонами такого размера, то в каждом из них будет находиться примерно одинаковое число скоплений галактик.

Предположение об однородности Вселенной в больших масштабах является очень важным, поскольку оно используется практически при всех теоретических расчетах, во всех моделях Вселенной.

Итак, важнейшими фундаментальными фактами, характеризующими Вселенную, являются однородное распределение вещества и ее нестационарность, которая проявляется как взаимное удаление галактик друг от друга.

III. Теоретический вывод о нестационарности Вселенной был получен российским математиком А. А. Фридманом в 1922—1924 гг. Он доказал, что вследствие действия гравитационных сил вещество во Вселенной не может находиться в покое; Вселенная должна либо сжиматься, либо расширяться. Докажем это.

Учитывая однородность Вселенной, выделим в ней произвольный шар радиусом R (рис. 9.11). Любая галактика массой m , находящаяся на поверхности выделенной сферы, будет притягиваться к центру этого шара согласно закону всемирного тяготения силой, пропорциональной массе шара M и обратно пропорциональной квадрату его радиуса R . Все остальные галактики, находящиеся за пределами этой сферы, никак не влияют на эту силу.

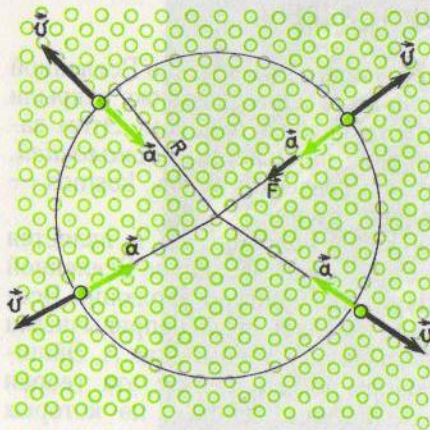


Рис. 9.11

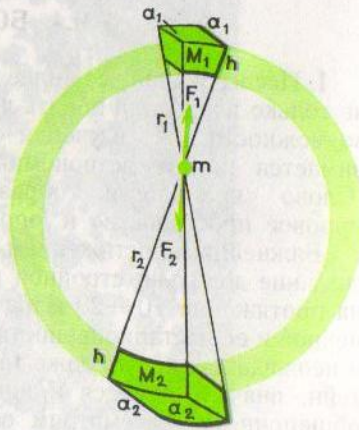


Рис. 9.12

Для доказательства обратимся к рисунку 9.12. Выделим сферический слой радиусами $r_1 > R$ и $r_2 = r_1 + h$. В этом слое равномерно распределены галактики плотностью ρ . Вследствие симметрии этого слоя участки, находящиеся слева и справа от галактики m , действуют на нее силами, равными по модулю и противоположными по направлению; их равнодействующая равна нулю. Масса слоя, находящегося сверху, равна $M_1 = \rho V_1 = \rho h a_1^2$. Он действует на галактику m силой $F_1 = GmM_1/r_1^2$, направленной вверх. Соответственно слой, находящийся внизу, притягивает эту же галактику вниз силой $F_2 = GmM_2/r_2^2$, где $M_2 = \rho V_2 = \rho h a_2^2$. Нетрудно убедиться, что эти силы также равны по модулю. Действительно,

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{GmM_1/r_1^2}{GmM_2/r_2^2} = \frac{a_1^2 r_2^2}{a_2^2 r_1^2}.$$

Но из подобия фигур (см. рис. 9.13) следует, что $a_1/a_2 = r_1/r_2$, откуда $F_1/F_2 = 1$, и их равнодействующая равна нулю.

Искомая сила $F = GmM/R^2$, где масса всех галактик внутри сферы $M = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$. Ускорение галактики m направлено к центру сферы (см. рис. 9.12). Оно равно:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{GmM}{mR^2} = \frac{4}{3}\pi G\rho R.$$

IV. Если представить себе, что в какой-то момент времени галактики неподвижны относительно друг друга, то уже в следующий момент в результате взаимного притяжения они приобретут скорости, пропорциональные ускорениям. Вселенная будет сжиматься, а плотность вещества в ней будет возрастать. Если же в начальный момент времени галактики удалялись друг от друга, то Вселенная будет расширяться, но это расширение будет тормозиться силами тяготения (см. рис. 9.11). Теория тяготения не определяет модули и направления скоростей галактик. Наблюдения показывают, что мы живем во Вселенной, которая в настоящее время расширяется. Следовательно, в начале своего существования Вселенная расширялась с большей скоростью. Эту стадию существования Вселенной называют Большим взрывом. Однако это расширение тормозится силами тяготения. Будущее расширение зависит от соотношения скорости взаимного удаления галактик и плотности вещества во Вселенной.

V. Скорость, с которой галактики, расположенные на поверхности сферы радиусом R , удаляются от ее центра, определяется законом Хаббла: $v = HR$. При скорости, большей или равной второй космической для шара данного радиуса (см. § 7.14), галактика будет неограниченно удаляться от его центра, т. е. Вселенная будет неограниченно расширяться. Если же скорость удаления галактики меньше второй космической, то расширение Вселенной должно смениться сжатием. Все

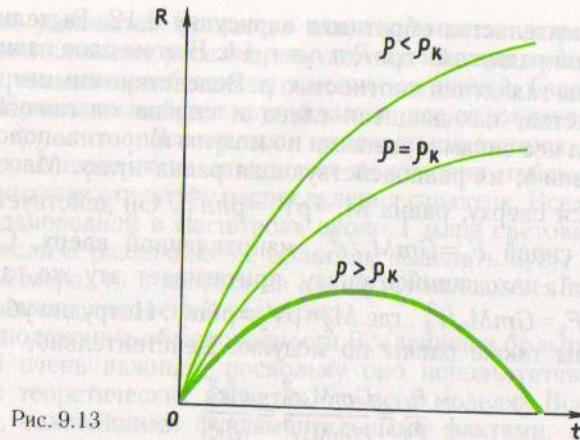


Рис. 9.13

три случая графически изображены на рисунке 9.13. На вертикальной оси обозначены расстояния между галактиками, а на горизонтальной — время.

Значение так называемой критической плотности вещества $\rho_{кр}$, которое отделяет один случай от другого, зависит от постоянной Хаббла: $\rho_{кр} = 3H^2/(8\pi G)$. Если принять постоянную Хаббла равной 75 (км/с)/Мпк, то критическая плотность составит примерно 10^{-26} кг/м³.

Таким образом, будущая история Вселенной зависит от средней плотности всех видов вещества и поля. На основе имеющихся в настоящее время данных невозможно сделать окончательный вывод о том, как именно будет в дальнейшем вести себя Вселенная: будет ли она бесконечно расширяться, или наступит момент, когда разбегание галактик прекратится и Вселенная станет сжиматься.

Значение критической плотности можно найти путем следующего рассуждения. Как известно, вторая космическая скорость выражается формулой $v = \sqrt{2gR}$, где g — ускорение свободного падения, R — радиус Земли. В рассматриваемом нами случае $g = a = \frac{4}{3}\pi G\rho R$, а скорость определяется по закону Хаббла: $v = HR$.

Имеем $HR = \sqrt{2R \cdot \frac{4}{3}\pi G\rho_{кр}R}$, или $H^2R^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho_{кр}R^2$, откуда следует $\rho_{кр} = 3H^2/(8\pi G)$. Подставив значения постоянной Хаббла $H = 75$ (км/с)/Мпк = $75 \cdot 10^3$ (м/с)/ $3,086 \cdot 10^{22}$ м = $2,43 \cdot 10^{-18}$ с⁻¹ и гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², получим

$$\rho_{кр} = \frac{3 \cdot 2,43^2 \cdot 10^{-36} \text{ кг}}{8\pi \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3} = 10^{-26} \text{ кг/м}^3.$$

VI. Из факта наблюдаемого расширения Вселенной вполне естественно сделать вывод о том, что в прошлом все галактики были ближе друг к другу, а когда-то были так тесно расположены, что просто не могли существовать в таком виде, как сейчас. Если принять, что галактики разлетаются с постоянной скоростью, то можно прикинуть, когда расстояния между всеми объектами Вселенной были равны нулю. В этом случае время, прошедшее с момента начала расширения, $t_0 = D_0/v_0$. Так как согласно закону Хаббла $v_0 = HD_0$, то $t_0 = 1/H$. Полагая $H = 75$ (км/с)/Мпк, $1 \text{ пк} = 3,0857 \cdot 10^{13}$ км, $1 \text{ год} = 3,1557 \cdot 10^7$ с, получим $t_0 = 13 \cdot 10^9$ лет.

Скорости разбегания галактик со временем уменьшаются, поскольку каждой из них приходится преодолевать притяжение, действующее со стороны остальных галактик. Следовательно, время, прошедшее с момента начала расширения, будет несколько меньше расчетного $t_0 = 13$ млрд лет. Это согласуется с данными о возрасте нашей планеты и других небесных тел. Возраст нашей Земли не менее 5 млрд лет, а самых старых объектов в нашей Галактике — шаровых звездных скоплений — примерно 10—14 млрд лет.

VII. Расчеты показывают, что в прошлом плотность веществ во Вселенной была значительно больше, чем в настоящее время. Галактики, звезды и планеты не могли существовать как отдельные объекты. Вещество, из которого они теперь состоят, в ту эпоху представляло собой однородную космическую среду. Достоверность выводов о прошлом Вселенной можно проверить лишь на основе наблюдений, поскольку расчеты показывают, что в моменты, близкие к началу расширения, плотность вещества должна была быть во много раз больше максимально известной в настоящее время плотности ядерного вещества $\rho_{яд} = 10^{17}$ кг/м³. Вопрос о природе такого начального состояния является одним из самых сложных и еще не до конца решенных вопросов современной космологии.

Уже в 40-е гг. нашего века перед астрономами стояли два важных вопроса, связанные с космологическими теориями: как доказать, что вещество во Вселенной в начале ее расширения действительно имело очень большую плотность? Как объяснить наблюдаемую распространенность химических элементов во Вселенной?

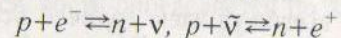
В 1946 г. Г. Гамов выдвинул идею *горячей Вселенной*, т. е. предположение о том, что вещество во Вселенной в далеком прошлом было не только очень плотным, но и очень горячим. Благодаря этому существующие химические элементы образовались вследствие реакций термоядерного синтеза на начальной стадии расширения первичного дозвездного вещества, когда его температура достигала еще миллиарда градусов. Соответственно высокой была и энергия фотонов — квантов электромагнитного излучения, заполнявших Вселенную. В процессе ее расширения энергия этих квантов должна уменьшаться и соответственно возрастать длина волны этого излучения, поскольку энергия фотона $\epsilon = h\nu = hc/\lambda$. Это излучение называли *ре-*

ликтовым. (Слово «реликтовый» образовано от латинского слова *relictus* — остаток.)

Как показали первые теоретические оценки, в современную эпоху распределение энергий этих квантов должно соответствовать температуре 5—6 К по абсолютной шкале температур. Это излучение следует искать в сантиметровом диапазоне радиоволн. Позднее, в 1964 г., были опубликованы расчеты, из которых следовало, что интенсивность реликтового излучения в сантиметровом диапазоне спектра превышает интенсивность излучений других источников. В 1965 г. сотрудники американской компании «Белл» при отладке антенны, созданной для слежения за спутником «Эхо», обнаружили слабый космический радиосум. Наблюдения, проведенные на волне 7,35 см, показали, что температура этого излучения, не зависящего от напряжения антенны, составляет около 3 К. Дальнейшие наблюдения, охватившие диапазон длин волн от десятков сантиметров до долей миллиметра, подтвердили высокую степень изотропности реликтового излучения, т. е. одинаковую его интенсивность независимо от направления приема с точностью до десятых долей процента. Так было получено не только подтверждение справедливости теории горячей Вселенной, но и доказательство того, что процесс расширения Вселенной, который сейчас является изотропным, был таким и в далеком прошлом, когда плотность вещества превышала современную в тысячи раз.

VIII. В настоящее время разработана теория явлений, происшедших после Большого взрыва. Процессы, происходившие в течение трех минут после первых мгновений расширения, в значительной мере обусловили всю последующую историю Вселенной. В частности, они определили химический состав вещества, из которого значительно позднее образовались существующие в настоящее время галактики и звезды. По химическому составу звездного вещества можно судить о физических условиях в начале космологического расширения.

При температуре свыше 10 млрд градусов не могут существовать ни нейтральные атомы, ни сложные атомные ядра. Самыми массивными частицами в этих условиях оказываются нейтроны и протоны, которые, взаимодействуя с электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино, превращаются друг в друга:



Равновесие между протонами и нейтронами, которое устанавливается в результате этих реакций, приводит к тому, что их концентрации при такой высокой температуре оказываются равными. Однако с понижением температуры в ходе расширения Вселенной число протонов увеличивается, а число нейтронов уменьшается. Это происходит потому, что свободный нейтрон оказывается нестабильным (см. § 8.6). Поэтому уже после первых секунд расширения относительное содержание нейтронов снижается до 15%.

После того как температура снизится до миллиарда градусов, энергия квантов и других частиц уже недостаточна для того, чтобы раз-

бивать образующиеся при слиянии протонов и нейтронов ядра дейтерия, трития, гелия-3 и гелия-4, а также лития. Таким образом, в горячей плазме за счет термоядерных реакций синтезируются ядра элементов начала периодической системы химических элементов. Однако, за исключением гелия, на этой стадии другие элементы почти не образуются. Синтез легких элементов заканчивается примерно через 300 с после начала расширения. В это время температура падает ниже миллиарда градусов, вследствие чего энергия частиц оказывается уже недостаточной для ядерных реакций.

Количество гелия, образовавшегося в эту эпоху, можно рассчитать исходя из того, что почти все нейтроны войдут в состав ядер гелия. Поскольку в ядре гелия-4 каждый находится в паре с протоном, то доля гелия равняется удвоенной концентрации нейтронов, т. е. 0,30. Следовательно, спустя примерно 3 мин после начала расширения вещество Вселенной должно представлять собой смесь из ядер гелия (примерно 30%) и ядер водорода — протонов (70%). В течение последующего миллиарда лет этот химический состав будет сохраняться неизменным, пока не образуются галактики и звезды, в недрах которых в ходе термоядерных реакций смогут образовываться элементы тяжелее гелия.

Наблюдаемое в составе небесных тел содержание гелия хорошо согласуется с предсказаниями теории. Этот элемент трудно обнаружить спектральными средствами, но иногда это удается сделать, наблюдая облака газа, нагретые ультрафиолетовыми излучениями горячих звезд, а также атмосферу Солнца и солнечный ветер. При этом гелия обнаруживается от 26 до 32%. Это подтверждает, что наши знания о процессах, происходивших в первые секунды расширения Вселенной, достаточно достоверны.

Картина мира, открывшаяся перед нами за последние десятилетия, способна поразить воображение. Но еще более достойно восхищения и удивления то, что человек, живущий на планете Земля — маленькой пылинке, затерянной в безграничных просторах Вселенной, способен силой своего разума проникать даже туда, откуда свет идет миллиарды лет, и исследовать явления, происходившие несколько миллиардов лет тому назад!

Вопросы для самопроверки

1. Что означает понятие «нестационарная Вселенная»?
2. Что означает расширение Вселенной? Есть ли центр у расширяющейся Вселенной?
3. Какая сила препятствует расширению Вселенной?
4. От чего зависит, будет ли Вселенная всегда расширяться, или расширение может смениться ее сжатием?
5. В чем смысл теории «горячая Вселенная»?
6. Что такое реликтовое излучение? Как оно образуется и как было обнаружено?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дорогой читатель, наш юный друг!

Мы поздравляем тебя! Ты получил первый достаточно полный круг знаний об окружающей природе. Этот курс физики и астрономии содержит сведения о наиболее общих свойствах мира, в котором мы живем.

Предшествующие поколения ученых оставили нам в наследство не только знания, добытые в области физики и астрономии, дающие представление о мироздании и законах его развития, но и знания о методах научного познания. Непосредственные наблюдения человека ограничены расстоянием, размерами изучаемых объектов, доступностью непосредственного контакта с исследуемыми явлениями. На помощь приходят приборы и инструменты, которые позволяют заглянуть как внутрь атома, так и за пределы нашей Галактики.

Исследуя скрытое от взора явление, мы вынуждены строить догадки-гипотезы о том, как бы оно выглядело, какими величинами его можно было бы характеризовать и каким законам оно подчинялось бы. Все это вместе составляет метод модельных гипотез. Ученые, исследующие мир, недоступный непосредственному восприятию, находятся в мире моделей. Особенностью этого метода является то, что модель не всегда достаточно полно и точно отражает свойства изучаемого объекта или явления. И поэтому всякая модель имеет определенные границы применимости.

Научное предвидение, основанное на методе модельных гипотез, в определенных границах с большой точностью подтверждается результатами экспериментов. Однако при выходе за эти границы теория не работает — приходится искать новые модели, которые отражают новые явления более точно. При этом появляется новая теория.

Желаем тебе доброго пути, ведущего к познанию удивительной картины мира, которая от поколения к поколению пополняется новыми красками, удивительными новыми деталями, но не теряет своего очарования, величия, загадочности и таинственности.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Работа № 1.

Изучение колебаний пружинного маятника

Приборы и материалы: набор грузов по механике, динамометр для лабораторных работ с пределом измерений 4Н, набор пружин при жесткости порядка 20 Н/м, 30 Н/м, 40 Н/м, штатив для фронтальных работ, секундомер или часы, линейка длиной около 50 см.

Цель данной работы заключается в том, чтобы экспериментально проверить выражение для периода колебания пружинного маятника (см. § 1.4). Для решения такой задачи сначала необходимо определить жесткость пружины, применяемой в лабораторной установке, и массу груза, а затем вычислить собственную частоту и период колебания маятника.

Для проверки закономерности зависимости периода колебания (или частоты) от свойств маятника достаточно построить график зависимости квадрата частоты (или периода) от жесткости пружины (при постоянной массе) либо от массы груза (при заданной жесткости пружины).

При определении периода колебания и частоты необходимо воспользоваться косвенным способом, измерив время t значительного числа колебаний (порядка $N \geq 20$). Тогда

$$T_0 = t/N,$$

$$\nu_0 = N/t.$$

Задание 1. Проверить формулу для расчета периода колебания

Соберите измерительную установку в соответствии с рисунком Л.1. По растяжению пружины и массе груза определите жесткость пружины. Выведите груз из положения равновесия и измерьте период колебания и частоту колебаний груза массой 0,1 кг (0,2 кг), подвешенного к пружине динамометра либо к любой пружине из набора.

Оцените отклонение расчетного значения частоты (или периода) от измеренного. Рассчитайте погрешность. Результаты измерений запишите в таблицу.

№ опыта	F , Н	Δx , м	k , Н/м	m , кг	$T_0 = 2\pi \sqrt{m/k}$, с	ΔT , с	$\epsilon = \frac{\Delta T}{T_0} \cdot 100\%$	ν_0 , Гц
1								
2								
3								

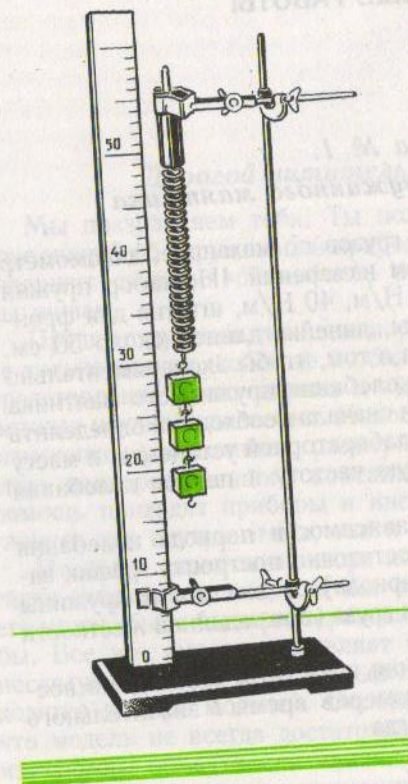


Рис. Л.1

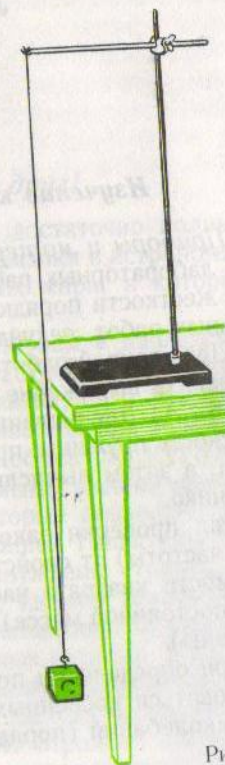


Рис. Л.2

Задание 2. Изучить зависимость периода колебания (частоты колебаний) от массы груза

Продумайте экспериментальную установку, проведите необходимые измерения. Постройте график зависимости периода колебания от массы груза. Затем постройте график зависимости квадрата периода от массы. Какой из графиков позволяет лучше определить зависимость периода колебания от массы груза: график функции $T_0 = f_1(m)$ или функции $y = T_0^2 = f_2(m)$?

Задание 3. Изучить зависимость частоты колебаний от жесткости пружины

Измерьте частоту колебаний груза на пружинах разной жесткости при одинаковой массе груза. Данные занесите в таблицу. Постройте график зависимости частоты колебаний и график зависимости квадрата частоты колебаний от жесткости пружины. В отчете обоснуйте, какой график удобнее использовать для экс-

периментального изучения зависимости частоты колебаний от жесткости пружины.

$k_1 = 20 \text{ Н/м}$			$k_2 = 30 \text{ Н/м}$			$k_3 = 40 \text{ Н/м}$		
N_1	$t_1, \text{с}$	$\nu_1, \text{Гц}$	N_2	$t_2, \text{с}$	$\nu_2, \text{Гц}$	N_3	$t_3, \text{с}$	$\nu_3, \text{Гц}$

Работа № 2.

Измерение ускорения свободного падения с использованием математического маятника

Приборы и материалы: штатив, нить, груз, лента измерительная, часы.

В работе используется простейший математический маятник — шарик на нити. При малых размерах шарика по сравнению с длиной нити и небольших отклонениях от положения равновесия период колебания можно вычислить по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{l/g}.$$

Для большей точности измерения периода колебания нужно измерить время t для достаточно большого числа N полных колебаний маятника. Тогда ускорение свободного падения

$$g = 4\pi^2 l N^2 / t^2.$$

Задание. Измерить ускорение свободного падения

Соберите измерительную установку в соответствии с рисунком Л.2. После измерения длины маятника от точки закрепления нити до центра шарика измерьте период колебания груза на нити при отклонении нити от вертикали не более чем на 10° .

При измерении периода колебания целесообразно провести серию опытов, в которых оценивается время не менее тридцати колебаний маятника. Затем надо найти среднее значение времени N колебаний и среднее значение периода колебания. Результаты измерений занесите в таблицу.

№ опыта	Время $t, \text{с}$	Среднее значение периода колебания $T, \text{с}$
1		
2		
3		
4		
5		

Рассчитайте ускорение свободного падения и оцените отклонение полученного значения от известного: $g=9,8156 \text{ м/с}^2$ (см. с. 160).

Работа № 3. Сборка радиоприемника

В данной работе необходимо собрать детекторный радиоприемник и принять радиопередачу ближайшей радиостанции. Затем собрать усилитель колебаний низкой частоты на транзисторах, подключить его к детекторному приемнику и снова осуществить прием радиостанции.

Задание 1. Собрать детекторный радиоприемник

Из лабораторного радионабора используйте конденсатор переменной емкости, две контурные катушки для длинных и средних волн, точечный полупроводниковый диод, телефоны и конденсатор емкостью 1000 пФ, смонтированный на панели с двумя зажимами и гнездами для телефона.

Соберите детекторный приемник по схеме, показанной на рисунке Л.3. Не забудьте присоединить антенну и заземление.

Настройте радиоприемник на прием длинноволновой радиостанции. Для этого медленно вращайте ручку конденсатора переменной емкости. После прослушивания всего диапазона длинных волн включите в колебательный контур катушку для приема средних волн и прослушайте этот диапазон.

Задание 2. Собрать детекторный радиоприемник с усилителем низкой частоты на одном транзисторе

Предупреждение! При сборке радиоприемников необходимо обращать внимание на контактные соединения (они должны быть всегда надежными) и качество соединительных проводов.

При включении транзисторов в цепь вывод базы присоединяют первым, эмиттер соединяют с положительным полюсом источника тока, а коллектор — с отрицательным полюсом. Источник электропитания включают в последний момент, когда радиоприемник собран и проверен по схеме. Все переключения производят при отключенном источнике электропитания.

Для более громкого радиоприема к детекторному радиоприемнику подключите усилитель низкой частоты (рис. Л.4). Вместо панели с гнездами для телефона включите нагрузочный резистор $R1$, а параллельно ему — блокировочный конденсатор $C3$, который необходим для замыкания на землю высокочастотной составляющей продетектированного сигнала.

Усилитель низкой частоты соберите на транзисторе, у которого база и коллектор соединены между собой через резистор $R2$. С по-

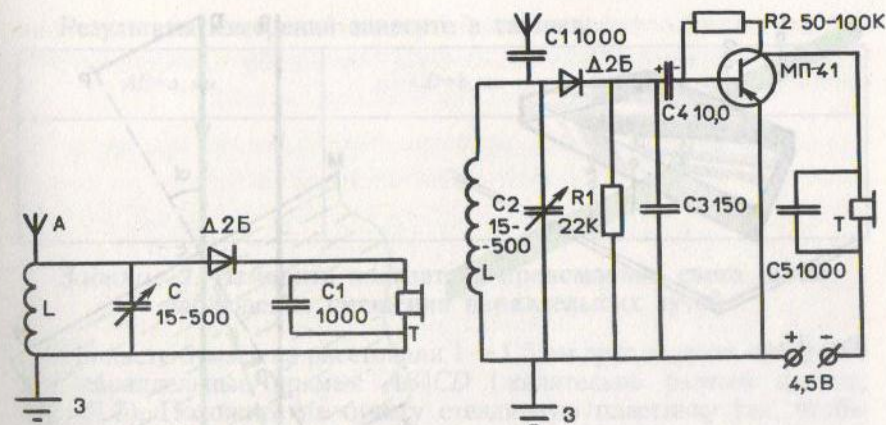


Рис. Л.3

Рис. Л.4

мощью этого резистора обеспечивается неискаженное усиление радиосигнала.

Эмиттерный переход транзистора подключите к нагрузочному резистору $R1$ детектора через конденсатор $C4$. В коллекторную цепь транзистора включите электромагнитный телефон вместе с блокировочным конденсатором $C5$. Питание транзистора осуществляется через катушки телефона.

К входному контуру приемника подключите антенну через конденсатор $C1$, который повышает избирательность и облегчает прием радиостанций в условиях значительных помех. Кроме того, этот конденсатор уменьшает влияние антенны на электроемкость входного контура и тем самым увеличивает диапазон перекрываемых частот.

В последнюю очередь включите источник электропитания. Затем, вращая ручку конденсатора переменной емкости, произведите прием работающих радиостанций.

Работа № 4.

Наблюдение преломления света и измерение показателя преломления стекла

Приборы и материалы: стеклянная пластинка с двумя плоскими параллельными гранями, листы белой бумаги, линейка с миллиметровыми делениями, циркуль, транспортир, черный и цветной карандаши или шариковые ручки, четыре булавки, стеклянная кювета с плоскими параллельными бортами.

Задание 1. Измерить показатель преломления света на основе наблюдения преломления света методом мнимых изображений

По одну сторону плоскопараллельной пластинки располагают две булавки 1 и 2 (рис. Л.5) и рассматривают их сквозь пластинку в

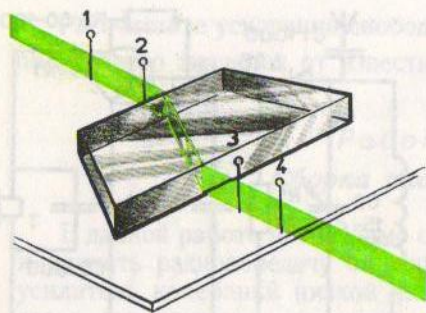


Рис. Л.5

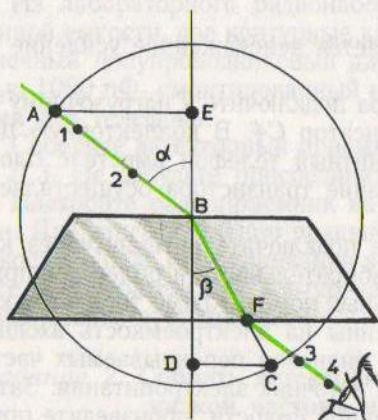


Рис. Л.6

направлении, которое значительно отличается от перпендикулярного направления к пластинке. Из-за преломления света наблюдается кажущееся смещение булавок. Между глазом и пластинкой помещают еще две булавки 3 и 4 так, чтобы мнимые изображения булавок 1 и 2 лежали на одной прямой с булавками 3 и 4.

После этого отмечают на бумаге положения преломляющих граней пластинки и основания булавок (рис. Л.6). Через основания булавок 1 и 2 проводят падающий луч, а через основания булавок 3 и 4 — луч, прошедший через пластинку. Затем чертят окружность с центром в точке B возможно большего радиуса R — падения луча на пластинку. Через точку B и точку F выхода преломленного луча из пластинки проводят прямую BC до пересечения с окружностью. Из точек A и C опускают перпендикуляры AE и CD . Если угол падения обозначить через α , а угол преломления через β , то $\sin \alpha = a/R$ и $\sin \beta = b/R$, где $a = AE$, $b = CD$. Поэтому показатель преломления

$$n = \sin \alpha / \sin \beta = a/b.$$

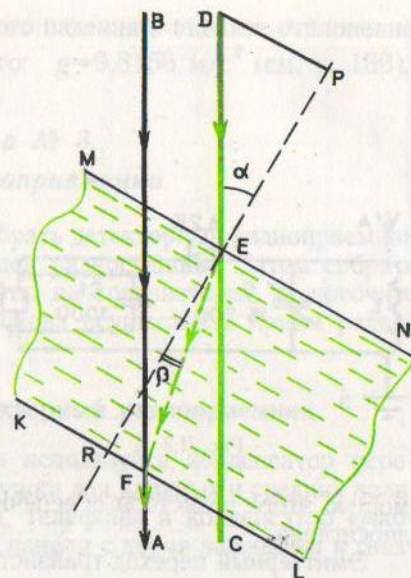


Рис. Л.7

Результаты измерений занесите в таблицу.

$AE=a$, мм	$CD=b$, мм	$n=a/b$

Задание 2. Измерить показатель преломления света путем наблюдения смещения параллельных лучей

На листе бумаги на расстоянии 1—1,5 см друг от друга начертите две параллельные прямые $AB \parallel CD$ (желательно разным цветом, рис. Л.7). Положите на бумагу стеклянную пластинку так, чтобы ее грани были перпендикулярны этим прямым и одна из граней проходила через отмеченную точку E . Затем поворачивайте пластинку — и вы увидите, что мнимые изображения прямых линий смещаются, оставаясь параллельными друг другу.

Поверните пластинку так, чтобы изображение луча DE совпало с направлением луча FA , где F — точка выхода луча BA из пластинки. Прижав пластинку к бумаге, отметьте карандашом ее грани MN и KL , а затем пластинку уберите.

Из опыта ясно, что луч DE будет виден как продолжение луча FA лишь в том случае, если в стекле свет распространялся вдоль луча EF . Начертите этот луч на бумаге. Постройте перпендикуляр к граням пластинки $ER \perp MN$. Тогда $\angle DEP = \alpha$ является углом падения, а $\angle REF = \beta$ — углом преломления.

Чтобы не измерять углы транспортиром, что вносит большие погрешности, следует поступить следующим образом. Отложите отрезок $ED = EF$ и из точки D опустите перпендикуляр на нормаль ER . Тогда $\sin \alpha = \frac{DP}{DE}$, $\sin \beta = \frac{RF}{EF}$, а показатель преломления $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{DP}{RF}$.

Задание 3. Измерить показатель преломления жидкости

Налейте в кювету воду и любым из указанных выше методов определите показатель преломления воды. Затем замените чистую воду концентрированным раствором сахара или соли и проверьте, отличается ли показатель преломления раствора от показателя преломления чистой воды.

Работа № 5.

Наблюдение изображений, получаемых с помощью линз

Приборы и материалы: лампочка на подставке с колпачком, источник тока, выключатель, измерительная лента, две собирающие

линзы с разной оптической силой на подставках, рассеивающая линза, экран белый с щелью, направляющая рейка, соединительные провода, линейка с миллиметровыми делениями.

Задание 1. Получить различные изображения предмета с помощью собирающей линзы

Соберите измерительную установку. Для этого лампочку подключите к источнику тока, наденьте на нее колпачок с буквой «Г», которая будет служить светящимся предметом в ваших опытах. Фокусное расстояние линзы, используемой в этом опыте, не превосходит 15 см. Поставьте лампочку у одного края стола, линзу — на его середине, а экран — по другую сторону стола. Перемещая экран, добейтесь резкого изображения буквы «Г» на нем. Опишите свойства изображения. Измерив размер предмета (его высоту H) и размер изображения h , определите коэффициент увеличения $\gamma = h/H$. Измерьте расстояния от линзы до предмета d и до изображения d' . Докажите, что увеличение $\gamma = h/H = d'/d$. Перемещая линзу к лампе, фиксируйте каждый раз расстояния d от предмета до линзы и d' от изображения до линзы. Получите сначала уменьшенное, а затем увеличенное действительное изображение, а также равенство размеров предмета и изображения. Заполните таблицу.

№ опыта	1	2	3	4	5	6
d						
d'						
γ						

Постройте графики зависимости $d' = f(d)$ и $\gamma = \phi(d)$.

Задание 2. Использовать собирающую линзу в качестве лупы

Поместите светящуюся лампочку от собирающей линзы на расстояние меньшее, чем фокусное. Проверьте, получается ли на экране изображение лампочки. Можно ли увидеть изображение глазом? Опишите характер этого изображения.

Задание 3. Получить изображение с помощью рассеивающей линзы

Замените в установке собирающую линзу рассеивающей. Проверьте, можно ли с помощью рассеивающей линзы получить изображение на экране. Можно ли увидеть изображение в рассеивающей линзе глазом? Опишите характер этого изображения.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы автоколлимационным¹ методом

Приборы и материалы: линза собирающая на подставке, осветитель на подставке, источник тока, плоское зеркало на подставке, бумажный экран небольшого размера с отверстием по размеру лампочки, рассеивающая линза, направляющая (например, желоб Галилея).

Если источник света находится в фокусе S собирающей линзы L , то последняя преобразует расходящийся пучок света в параллельный. Если же поместить за линзой плоское зеркало $З$ перпендикулярно лучам, то отраженный свет, преломившись в линзе, вновь соберется в фокусе S (рис. Л.8). Следовательно, действительное изображение точечного источника света образуется в той же точке, где находится сам источник.

На самом деле в опыте зеркало всегда несколько повернуто и луч света падает на него под небольшим углом Θ (рис. Л.9). При этом изображение S' сместится несколько в сторону, но останется в фокальной плоскости. Следовательно, измерив расстояние между источником и линзой, мы непосредственно найдем фокусное расстояние линзы f и ее оптическую силу $\Phi = 1/f$.

Рис. Л.8

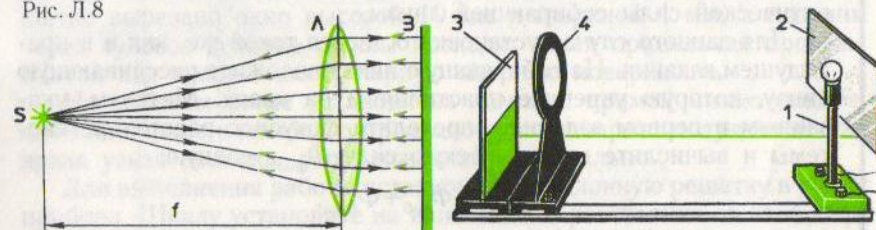


Рис. Л.10

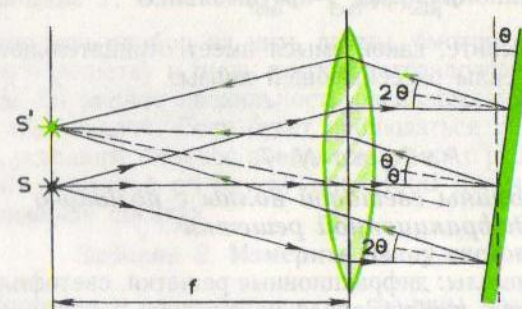


Рис. Л.9

¹ От греч. autos — сам и лат. collineo — направляю.

Для выполнения опыта снимите с лампочки 1 колпачок и укрепите на лампочке бумажный экран 2 так, чтобы нить лампочки совпала с плоскостью экрана. Расположите вдоль направляющей зеркало 3, линзу 4 и лампочку, как показано на рисунке Л.10. Расстояние между зеркалом и линзой должно быть небольшим, порядка 3—5 см.

Задание 1. Определить фокусное расстояние собирающей линзы

Зажгите лампочку и перемещайте ее к линзе до тех пор, пока на экране не получите четкое изображение нити накала. Это будет означать, что нить накала попала в фокус линзы. Измерьте расстояние от линзы до экрана. Оставив осветитель на месте, переместите зеркало на 1—2 см и проследите, что происходит с изображением. Опыт проделайте несколько раз. Найдите среднее значение фокусного расстояния, а затем вычислите оптическую силу линзы в диоптриях.

Задание 2. Определить оптическую силу рассеивающей линзы

Так как с помощью рассеивающей линзы нельзя подлечить действительное изображение, то указанный выше метод к ней применить нельзя. Однако можно доказать, что если две линзы сложить вплотную, то оптическая сила системы равна сумме оптических сил обеих линз. Это позволяет использовать метод, указанный выше, если модуль оптической силы рассеивающей линзы меньше оптической силы собирающей линзы.

Для данного случая установка остается такой же, как и в предыдущем задании. На собирающую линзу положите рассеивающую линзу, которую укрепите пластилином на краях. Методом, указанным в первом задании, определите фокусное расстояние системы и вычислите ее оптическую силу $\Phi_{\text{сист}}$, равную:

$$\Phi_{\text{сист}} = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{расс}}$$

Отсюда следует, что оптическая сила рассеивающей линзы

$$\Phi_{\text{расс}} = \Phi_{\text{сист}} - \Phi_{\text{соб}}$$

В отчете разъясните, какой смысл имеет отрицательное значение оптической силы рассеивающей линзы.

Работа № 7.

Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Приборы и материалы: дифракционные решетки, светофильтры, осветитель и установка, изображенная на рисунке Л.11.

Основанием прибора для определения длины световой волны с помощью дифракционной решетки служит деревянный брусок 1 раз-

мером 520×20×40 мм. Вдоль бруска нанесена шкала с делениями. К нижней поверхности в середине при помощи шарнира с зажимом прикреплен стержень 2, который вставляют в отверстие подставки от подъемного столика 3 или зажимают в лапку штатива.

К переднему торцу бруска прикреплен рамка 4, в которую вставляется одна из дифракционных решеток, причем место расположения решетки совпадает с нулевым делением шкалы бруска. Сюда же может вставляться светофильтр.

Вдоль бруска может передвигаться ползунок, концы которого загнуты и скользят в боковых пазах. Поперек бруска к ползунку прикреплен щиток 5 размером 150×40 мм. В нижней части щитка нанесена миллиметровая шкала с нулевым делением посередине. Верхний край шкалы и середина дифракционной решетки находятся на одинаковой высоте от бруска. Над нулевым делением шкалы в щитке вырезано окно высотой 10 мм и шириной 4 мм, а под ним через нулевое деление шкалы проходит узкая прицельная прорезь. Щиток над шкалой имеет черную матовую поверхность.

На рабочем столе установлена лампа с прямой нитью накала, либо на экране с помощью проекционного аппарата получена четкая яркая узкая полоска, расположенная вертикально.

Для выполнения работы вставьте дифракционную решетку в рамку прибора. Шкалу установите на наибольшем расстоянии от этой дифракционной решетки.

Задание 1. Ознакомиться с дифракционными спектрами

Наведите прибор на нить лампы, смотря на нее через дифракционную решетку и щель щитка, находящуюся на нулевом делении шкалы. Проверьте правильность расположения спектров на черном фоне над шкалой. Если будет наблюдаться смещение их с черного фона, устраните перекося поворотом рамки с решеткой. Передвигайте щиток со шкалой по бруску так, чтобы получить на шкале четкое изображение спектра.

Задание 2. Измерить длину световой волны

Определите по шкале щитка границы красного и фиолетового участков в спектрах первого и второго порядков с правой и с левой сторон (рис. Л.12). Найдите их средние значения $a_{\text{кр}}$ и $a_{\text{ф}}$.

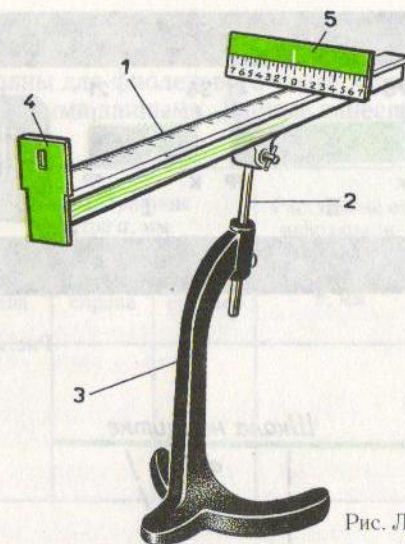


Рис. Л.11

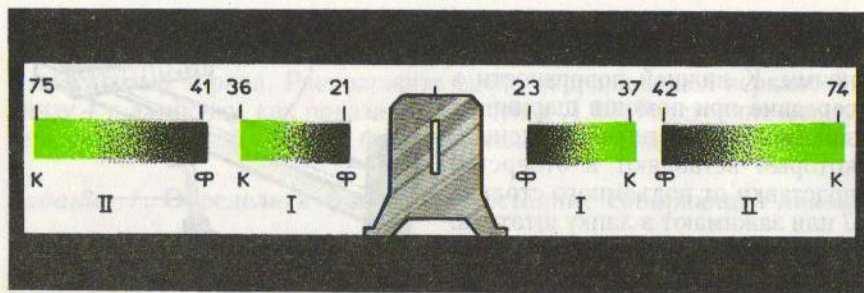


Рис. 1.12

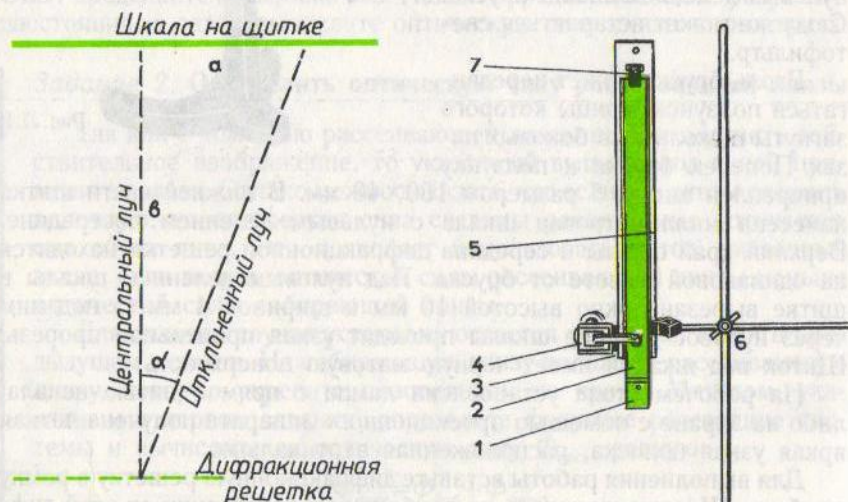


Рис. 1.13

Определите по брусу (см. рис. 1.11) расстояние b от дифракционной решетки до шкалы. Найдите отношение среднего расстояния a рассматриваемой части спектра от щели к расстоянию b дифракционной решетки от щитка $\operatorname{tg} \alpha = a/b$ (рис. 1.13).

Ввиду малости угла α можно допустить $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = a/b$. Вычислите длину волны для красного света по формуле $n \cdot \lambda = d \sin \alpha \approx da/b$, где n — порядок спектра; d — постоянная решетки (указывает преподаватель). В опыте используются дифракционные

решетки, в которых на каждом миллиметре нанесено 100 или 200 штрихов.

Аналогично вычислите длину волны для фиолетового света. Сравните найденные длины волн с табличными данными. Данные занесите в таблицу.

№ опыта	Постоянная решетки d , мм	Порядок спектра n	Видимые границы спектра a , мм			Расстояние от дифракционной решетки до шкалы b , мм
			слева	справа	среднее	
1						
2						
3						
4						
5						

Задание 3. Определить диапазон длин волн, пропускаемых светофильтром

Установка остается той же, но на пути светового пучка поместите светофильтр. Обратите внимание, как изменился дифракционный спектр. По описанной выше методике определите границы диапазона длин световых волн, которые пропускает данный светофильтр.

Работа № 8.

Изучение законов свободного падения тел

Приборы и материалы: прибор для изучения движения тел, линейка, полоски бумаги с миллиметровой сеткой, копировальная бумага.

В этом приборе (рис. 1.14) груз 1 падает свободно. К грузу прикреплена длинная бумажная лента 2 с миллиметровыми делениями, покрытая сверху полоской копировальной бумаги. Бумажная лента движется между основанием вибратора 3 и якорем 4 . На обмотку вибратора подается переменное напряжение, вследствие чего якорь колеблется с периодом $T=0,02$ с. Вся система закреплена на линейке 5 , укрепленной на штативе 6 . Бумажная лента с грузом удерживается зажимом 7 . Если освободить зажим 7 , то груз станет свободно падать без начальной скорости, увлекая за собой бумажную ленту. За счет колебаний якоря на ленте остаются метки (рис. 1.15). Измерив расстояния между ними, можно определить перемещение тела за любое время $t=nT$, где n — число интервалов между точками.

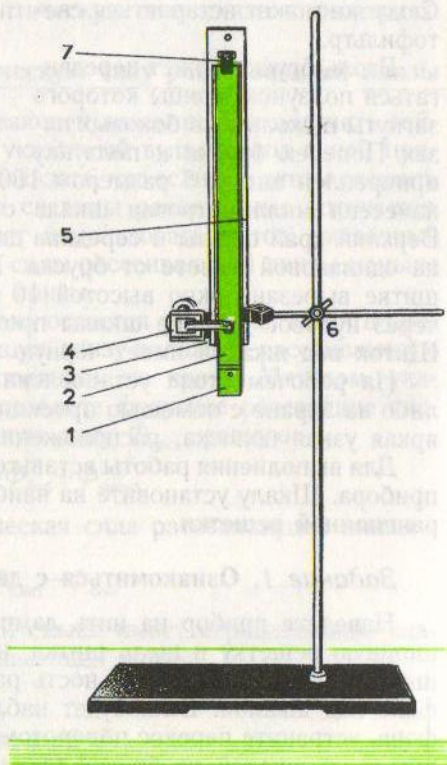
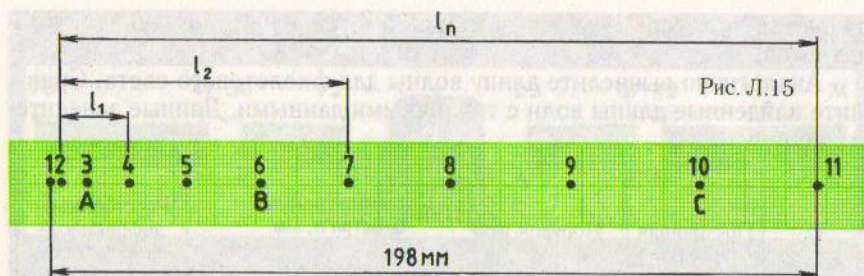


Рис. 1.14



Задание 1. Изучить зависимость перемещения падающего тела от времени

Соберите установку в соответствии с рисунком Л.14. Осуществите пуск тела. Сняв ленту, измерьте перемещения за выбранные вами промежутки времени. Результаты измерений занесите в таблицу.

№ метки	1	2	3	4	5	6	...
Расстояние от метки 1 до метки n , l , мм							
Время $t=(n-1)T$, с							
$y=\sqrt{l}$							

Постройте график зависимости $l=f(t)$. Как убедиться, что этот график — парабола?

Постройте график зависимости $y=\sqrt{l}=\varphi(t)$. Чем этот график удобнее предыдущего?

Задание 2. Пользуясь результатами эксперимента, найти ускорение свободного падения. Найти погрешность полученного результата

Работа № 9.

Сравнение действующей силы с изменением импульса тела

Приборы и материалы: два штатива для фронтальных работ, динамометр учебный, шарик массой около 100 г с крючком или отверстием, нитки, линейка с миллиметровыми делениями, весы учебные, гири Г4-210.

В лапке штатива закрепите горизонтально динамометр (рис. Л.16). К его крючку привяжите шарик на нити длиной 60—80 см.

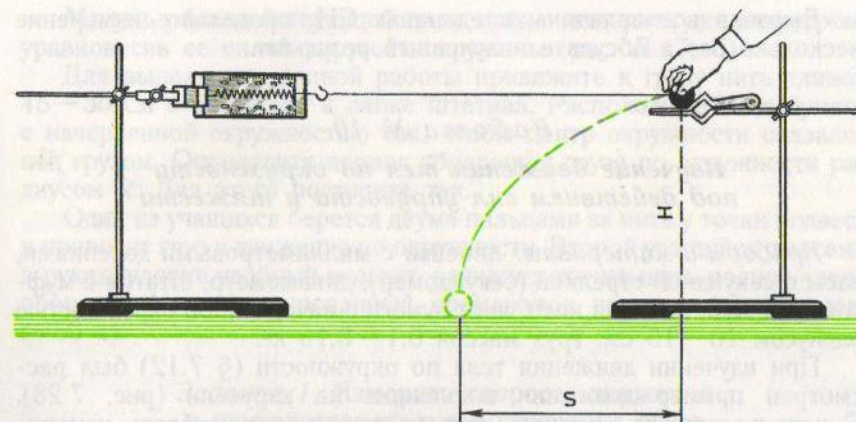


Рис. Л.16

На другом штативе на такой же высоте, как и динамометр, закрепите лапку. Установив шарик на краю лапки, отодвиньте штатив вместе с шариком от первого штатива на такое расстояние, чтобы на шарик действовала сила упругости F_0 со стороны пружины динамометра. Затем шарик отпустите. Под действием силы упругости шарик приобретет скорость v , а его импульс за это время изменится на величину $\Delta(mv)=mv$, так как начальная скорость шарика равна нулю.

Время действия силы равно четверти периода колебания шарика массой 100 г на пружине динамометра, жесткость которой равна 40 Н/м.

$$\text{Итак, } \Delta t = T/4 = \frac{2\pi}{4} \sqrt{m/k} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{0,1}{40}} = 0,079 \text{ с.}$$

Для определения скорости шарика учтите, что за время падения с высоты $H=gt^2/2$ он переместится на расстояние $s=vt$. Поэтому скорость, которую приобретет шарик за счет действия пружины, равна $v=s\sqrt{g/(2H)}$, а изменение импульса $\Delta(mv)=ms\sqrt{g/(2H)}$. Изменение импульса происходит за счет действия переменной силы, которая меняется пропорционально деформации. Поэтому если в опыте показания динамометра равны F_0 , то можно считать, что импульс меняется под действием средней силы $F_{\text{ср}}=F_0/2$.

Итак, в эксперименте следует убедиться в том, что

$$\frac{F_0}{2} = \frac{ms\sqrt{g/(2H)}}{\Delta t},$$

или, подставив значение $\Delta t=0,079$ с, сравнить

$$F_0 = \frac{2ms\sqrt{g/(2H)}}{0,079}.$$

Выразив все величины в единицах СИ, проделайте измерение несколько раз и обсудите полученный результат.

Работа № 10.

Изучение движения тел по окружности под действием сил упругости и тяжести

Приборы и материалы: линейка с миллиметровыми делениями, часы с секундной стрелкой (секундомер), динамометр, штатив с муфтой и лапкой, прочная нить, лист бумаги с начерченной окружностью так, чтобы центр окружности оказался под грузом. Определите период обращения груза по окружности радиусом 10—15 см, груз массой 0,1—0,15 кг.

При изучении движения тела по окружности (§ 7.12) был рассмотрен пример движения школьника на карусели (рис. 7.28). С использованием штатива, нити и груза можно собрать измерительную установку, моделирующую движение школьника на карусели (рис. Л.17, а).

На груз действуют две силы: сила тяжести \vec{P} и сила натяжения троса $\vec{F}_{\text{упр}}$. Равнодействующая этих сил \vec{F} направлена к центру окружности. Эта равнодействующая и сообщает движущемуся по окружности грузу центростремительное ускорение:

$$a_u = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона равнодействующая сила равна произведению ma , т. е. $\vec{F} = m \frac{4\pi^2 R}{T^2}$.

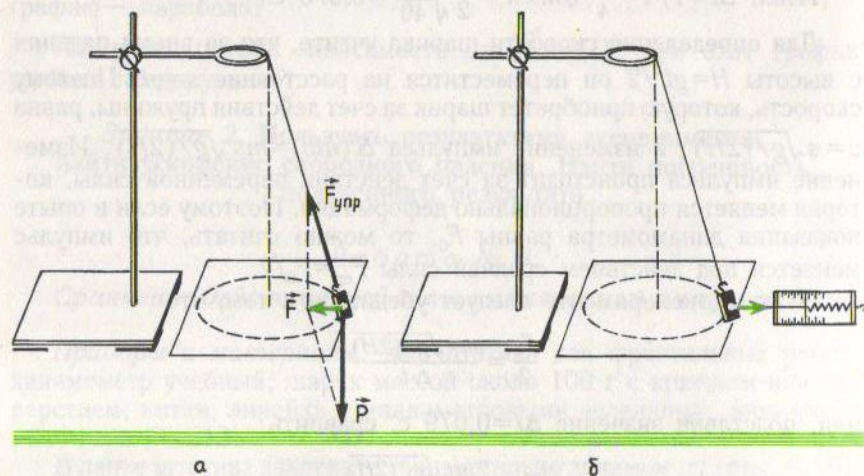


Рис. Л.17

Модуль равнодействующей силы можно измерить динамометром, уравновесив ее силой упругости пружины (рис. Л.17, б).

Для выполнения данной работы привяжите к грузу нить длиной 45—50 см и подвесьте к лапке штатива. Расположите лист бумаги с начерченной окружностью так, чтобы центр окружности оказался под грузом. Определите период обращения груза по окружности радиусом R . Для этого поступите так.

Один из учащихся берется двумя пальцами за нить у точки подвеса и приводит груз в движение по окружности. Второй учащийся с часами в руках, уловив удобный момент, начинает отсчитывать полное число оборотов N за фиксированный промежуток времени t (например, $t=60$ с).

Задание 1. Измерить скорость движения и центростремительное ускорение груза

Определите период колебания $T=t/N$ и рассчитайте ускорение

$$a = v^2/R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Задание 2. Измерить равнодействующую с использованием второго закона Ньютона

Рассчитайте модуль равнодействующей силы на основе второго закона Ньютона $F=ma$.

Сравните полученное значение силы с результатом непосредственного измерения с использованием динамометра.

Сделайте выводы.

ДОМАШНИЙ ПРАКТИКУМ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

*...Наука сокращает
Нам опыты быстротекущей жизни...*

А. С. Пушкин

Вдумайтесь в смысл этих мудрых слов великого поэта. Разве не самая главная ценность науки отражена в них?!

Зная законы физики, вы сможете не только понять и объяснить явления природы, но и предвидеть их ход, сможете использовать законы природы для решения ваших жизненных проблем.

Законы физики помогут вам ответить на целый ряд вопросов, например: как заставить двигаться тело с заданной скоростью? Как предвидеть результат соударения шаров?

Неоценимую помощь в разрешении многих вопросов вам окажет физический опыт.

В качестве приборов и установок для своих опытов и измерений вы сможете использовать подручные предметы и материалы домашнего обихода: коробки, грузы, динамометр (пружинные весы), линейки, нитки, шарики, пружинки, резинки и т. д.

Несколько творческих заданий и возможные варианты их решений мы предлагаем вам в этом учебнике. Не спешите читать решения. Лучше используйте их для сравнения с вашими собственными выводами.

Научное теоретическое предвидение, подтвержденное экспериментом, дает большое удовлетворение и даже наслаждение.

Желаем вам творческих успехов!

Запуск тела с заданной скоростью

Для запуска искусственного спутника по круговой орбите вокруг Земли нужно сообщить ракете скорость порядка 8 км/с. Если скорость будет меньше, то ракета упадет на Землю, а если больше, то ракета будет удаляться от нее.

Как получить нужную скорость? Чтобы ответить на этот вопрос, попробуйте решить несколько более простых задач.

1. Почему капля воды, пущенная в растительное масло, падает с постоянной скоростью? От чего зависит скорость падения?

2. Почему шайба движется по наклонной плоскости равноускоренно? От чего зависит величина ускорения? Если вы нашли ответ, то проверьте его экспериментально, заставив скользить коробку или какой-нибудь другой предмет по наклонной доске с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$.

3. Если предыдущий опыт удался, то попытайтесь заставить эту же коробку (или деревянный брусок) с тем же ускорением двигаться горизонтально (рис. 1).

4. Когда задача 3 будет решена и эксперимент подтвердит правильность рассуждений и расчетов, можно перейти к сравнительно сложной задаче: запустить тело с заданной скоростью.

Чтобы поставить этот эксперимент, нужно сделать несложное приспособление (рис. 2). В стену или доску вбивают два гвоздя на расстоянии 6 — 8 см друг от друга и на высоте 1,5 м от пола. На гвозди накидывают белую крепкую нитку длиной 1,5 м с петлями на концах. К петлям прикрепляют два равных груза по 80 — 100 г. Желательно, чтобы они были одинаковой цилиндрической формы.

Над гвоздями укрепляют маятник с кисточкой на конце. Кисточка, смоченная чернилами или краской, делает отметки на нити при колебаниях маятника.

Сначала нужно сделать так, чтобы один из грузов мог двигаться сверху вниз с постоянными скоростями, но разными по значению. Затем надо придумать, как запустить этот груз сверху вниз с заданной постоянной скоростью, например 0,5 м/с. Очень важно прийти к решению этих задач самостоятельно. Если они успешно решены, то вы можете быть уверены в том, что знания основных законов динамики в объеме, предусмотренном программой средней школы, у вас имеются. Для самоконтроля даем возможные варианты решений всех приведенных выше задач.

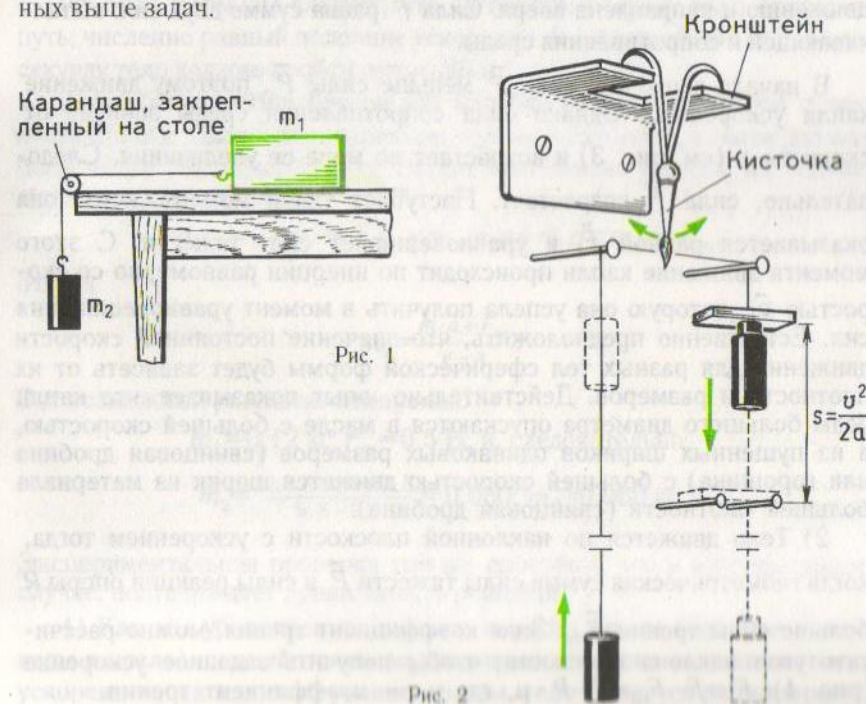


Рис. 1

Рис. 2

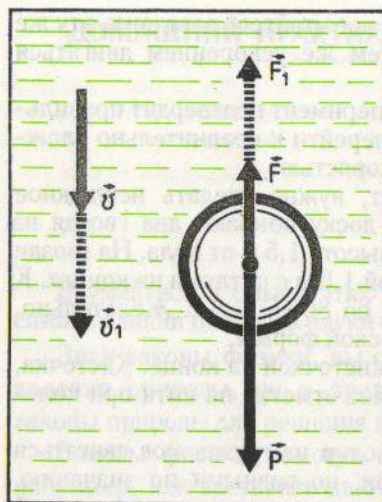


Рис. 3

1) На каплю (рис. 3), пущенную в масло, действуют две силы: сила тяжести \vec{P} , направленная вниз, и сила \vec{F} , которая препятствует движению и направлена вверх. Сила \vec{F} равна сумме двух сил: выталкивающей и сопротивления среды.

В начале движения сила \vec{F} меньше силы \vec{P} , поэтому движение капли ускоренное. Однако сила сопротивления среды зависит от скорости \vec{v} (см. рис. 3) и возрастает по мере ее увеличения. Следовательно, сила \vec{F} возрастает. Наступает такой момент, когда она оказывается равной \vec{F}_1 и уравнивает силу тяжести. С этого момента движение капли происходит по инерции равномерно со скоростью \vec{v}_1 , которую она успела получить в момент уравнивания сил. Естественно предположить, что значение постоянной скорости движения для разных тел сферической формы будет зависеть от их плотности и размеров. Действительно, опыт показывает, что капли воды большего диаметра опускаются в масле с большей скоростью, а из пущенных шариков одинаковых размеров (свинцовая дробина или горошина) с большей скоростью движется шарик из материала большей плотности (свинцовая дробина).

2) Тело движется по наклонной плоскости с ускорением тогда, когда геометрическая сумма силы тяжести \vec{P} и силы реакции опоры R больше силы трения $\vec{F}_{тр}$. Зная коэффициент трения, можно рассчитать угол наклона плоскости, чтобы получить заданное ускорение (рис. 4): $F_1 = F - F_{тр} = F - R \cdot \mu$, где μ — коэффициент трения.

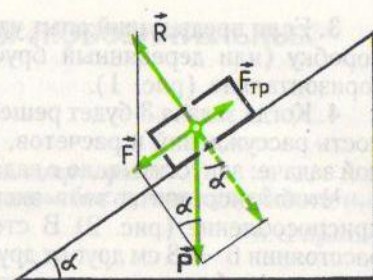


Рис. 4

Если обозначить угол наклона плоскости через α , то полученное выражение можно упростить, сократив в нем количество неизвестных:

$$F_1 = P \sin \alpha - P \cos \alpha \mu.$$

Но так как $F_1 = ma$, а в то же время $P = mg$, то в итоге получим

$$\frac{a}{g} = \sin \alpha - \mu \cos \alpha.$$

Поскольку мы задались целью запустить тело с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$, то угол α должен быть таким, чтобы удовлетворять равенству

$$\sin \alpha - \mu \cos \alpha = 0,05.$$

Таблицы тригонометрических функций позволяют легко подобрать нужный угол. Например, при коэффициенте трения $0,45$ нужно взять угол наклона $24^\circ 30'$.

Для проверки этого вывода экспериментально можно использовать формулу пути для равноускоренного движения:

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Из этой формулы следует, что за первую секунду тело проходит путь, численно равный половине ускорения. В нашем случае за первую секунду тело должно пройти путь $0,25 \text{ м}$.

3) Чтобы запустить брусок или коробку по горизонтальной плоскости стола с заданным ускорением, нужно рассчитать, какова должна быть масса падающего груза. Расчет этот можно сделать на основе второго закона динамики:

$$(m_1 + m_2) a = P - F_{тр}, \text{ или } m_1 a + m_2 a = m_2 g - F_{тр},$$

откуда

$$m_2 = \frac{m_1 a + F_{тр}}{g - a}.$$

Вот возможный результат измерений:

$$m_1 = 0,12 \text{ кг}; F_{тр} = 0,5 \text{ Н, и, следовательно,}$$

$$m_2 = \frac{0,12 \cdot 0,5 + 0,5}{9,8 - 0,5} \approx 0,060; m_2 \approx 0,060 \text{ кг}.$$

Экспериментальная проверка тем же способом, что и в предыдущем случае, подтверждает правильность решения.

4) Как мы убедились на анализе первого опыта (падение капли воды в масле), под действием неуравновешенных сил тело движется с ускорением, а когда силы уравновешены, тело движется равномерно с

той скоростью, которую оно имело в момент уравнивания сил. Этот опыт поможет выполнить поставленную задачу: сначала груз должен двигаться с ускорением, а в нужный момент должно наступить равновесие сил.

Прежде всего с помощью динамометра следует измерить силу трения, действующую на нить при ее скольжении по гвоздям (см. рис. 2). Далее нужно компенсировать эту силу, положив на один из равных грузов дополнительный необходимый груз. Теперь необходимо убедиться, что движение груза с добавкой от толчка сверху вниз равномерное. Для этого нужно маятник с кисточкой, смоченной чернилами, привести в колебательное движение. При движении нити на ней будут изображаться отметки на равных расстояниях. Это — свидетельство равномерного движения.

Если далее сверху компенсирующего грузика положить еще один (например, большой гвоздь или кусок толстой проволоки), то под действием силы тяжести этого груза движение будет равноускоренным. Следовательно, осталось лишь рассчитать, какой путь должны пройти грузы равноускоренно, чтобы набрать нужную скорость. В тот момент, когда нужная скорость будет набрана, необходимо снять ускоряющий груз (гвоздь), и тогда грузы будут двигаться по инерции: все силы уравновешены, т. е. алгебраическая сумма всех сил, действующих на данное тело, равна нулю.

Пусть, например, масса $M_1 = M_2 = 0,12$ кг, сила трения $F_{тр} = 0,87$ Н, масса компенсирующего груза $m_1 = 0,087$ г, а масса движущего груза (гвоздя) $m_2 = 0,020$ г. Тогда вся система грузов будет двигаться с ускорением, которое может быть найдено из уравнения

$$m_2 g = a(2M + m_1 + m_2).$$

Отсюда найдем:

$$a = \frac{m_2 g}{2M + m_1 + m_2} = \frac{0,020 \cdot 98}{2 \cdot 0,12 + 0,087 + 0,020} \approx 0,56; a \approx 0,56 \text{ м/с}^2.$$

Теперь легко определить путь, который должны пройти грузы, чтобы получить нужную скорость, например 0,50 м/с:

$$s = \frac{v^2}{2a} = \frac{0,50^2}{2 \cdot 0,56} \approx 0,23; s \approx 0,23 \text{ м.}$$

Два вбитых в стену гвоздя на нужном расстоянии (23 см) снимают дополнительный груз (см. рис. 2).

Эксперимент подтверждает правильность расчетов.

Упругое соударение шаров

Упругое соударение шаров замечательно не только тем, что мгновенно меняются скорости соударяющихся тел, но и тем, что сохраняются неизменными их общая кинетическая энергия и общее количество движения. Зная это, можно проделать несколько увлекательных опытов, которые помогут уяснить основное в этих явлениях.

Для этих опытов нужно иметь три стальных шара (два из них одинаковые), нитки, клей «Суперцемент» для приклеивания нитки к стальному шару, если он без отверстия, измерительную линейку, а также динамометр или весы. Очень удобно использовать стробоскопическую фотосъемку.

Опыт 1. Возьмите два одинаковых по размеру стальных шара и подвесьте их на длинных нитках, например, к оконному карнизу. Шары должны касаться друг друга. Отведите один из шаров на некоторое расстояние в сторону от положения равновесия и отпустите его. Соударение шаров должно быть центральным.

Какое явление наблюдается после соударения шаров? Каково максимальное отклонение второго шара после соударения и как оно зависит от максимального отклонения первого шара перед соударением? Какова будет эта зависимость, если массы шаров неодинаковы?

Опыт 2. Попробуйте получить нецентральное соударение одинаковых шаров. Понаблюдайте это явление несколько раз. (Именно здесь удобно воспользоваться стробоскопической фотосъемкой.) Попробуйте самостоятельно его объяснить с помощью несложных математических преобразований известных формул. Для самоконтроля после всей этой работы познакомьтесь с возможными вариантами решений поставленных задач.

1) При соударении упругих шаров равной массы, когда один шар движется, а другой покоится, происходит обмен их импульсами и энергиями. Поскольку удар упругий, то в этом случае при ударе сохраняется не только импульс, но и механическая энергия. Поэтому на какое расстояние был отклонен первый шар, на такое же расстояние (почти!) отклонится после соударения второй шар, а первый остановится. Далее явление повторится в обратном направлении и т. д.

Если массы шаров неодинаковы (рис. 5), то, хотя при их соударении также будут сохраняться и импульс, и энергия, картина будет не столь про-

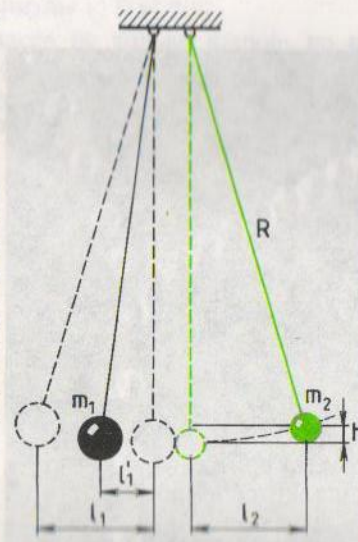


Рис. 5

той и ясной. Чтобы рассчитать скорости шаров после соударения, нужно решить систему из двух уравнений:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$$

и

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

где m_1 и m_2 — массы шаров, v_1 и v_2 — их скорости до соударения, а u_1 и u_2 — скорости после соударения.

Если второй шар покоится ($v_2=0$), то решение этой системы уравнений приводит к следующему результату:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad u_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}, \quad v^2 = 2gh,$$

т. е. v^2 пропорционально h . При малых углах отклонения нити от вертикали с большой степенью точности можно считать

$$h = \frac{l^2}{2R}.$$

(Перпендикуляр, опущенный из любой точки окружности на диаметр, есть среднее пропорциональное между его отрезками, т. е. h пропорционально l^2 , и тогда v пропорционально l .) Но так как

$$u_1 : v_1 = l'_1 : l_1 \text{ и } u_2 : v_1 = l'_2 : l_1, \text{ то } l'_1 = l_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \text{ и } l'_2 = \frac{2m_1 l_1}{m_1 + m_2}.$$

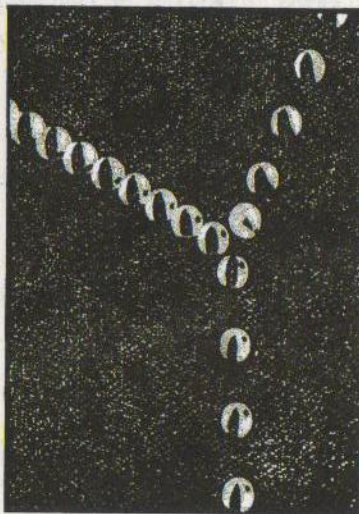


Рис. 6



Рис. 7

Это значит, что, зная массы шаров и первоначальное отклонение l_1 от положения равновесия первого шара, мы можем предсказать максимальные отклонения шаров после их упругого соударения. Пусть, например, $m_1=0,090$ кг, $m_2=0,035$ кг и $l_1=0,20$ м. В этом случае легко подсчитать $l'_1 \approx 0,088$ м и $l'_2 \approx 0,29$ м.

Эксперимент подтверждает предварительные расчеты.

2) Теперь надо сказать несколько слов о нецентральной упругом ударе.

Сколько бы опытов вы ни делали, все они приводят к одному и тому же результату. Шары одинаковой массы разлетаются под прямым углом друг к другу. Правило векторного сложения наводит на мысль: явление протекает так, что всегда остается справедливым равенство

$$v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Легко догадаться, что это результат сохранения кинетической энергии при упругом ударе:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}.$$

На рисунке 6 приводится снимок, который позволяет убедиться в справедливости этой гипотезы. Если измерить расстояние между изображениями шаров до и после удара, то окажется, что

$$l_1^2 = (l'_1)^2 + (l'_2)^2,$$

а это и подтверждает справедливость формулы $v_1^2 = u_1^2 + u_2^2$.

По углу разлета можно судить о массе не только шаров, но и элементарных частиц. На фотографии (рис. 7), сделанной в камере Вильсона, зафиксировано соударение двух α -частиц. Как видно, следы частиц после соударения также образуют прямой угол.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Глава 1

- § 1.1. 1. 57,6 Н. 2. 30 Н; 0. 3. 0,05 с; 20 Гц. 4. 0,05 с; $5 \cdot 10^{-5}$ с. 5. 0,02 с.
 § 1.2. 3. 2,1 м/с. 4. 2,0 м/с. 5. 13,5 см.
 § 1.3. 1. Да. 2. 0,06 с. 3. 0,75 с; 1,3 Гц.
 § 1.4. 1. 0,1 кг. 2. 3,2 Гц. 3. 30 Н/м. 4. 20 г.
 § 1.5. 1. $g=9,87$ Н/кг. 2. 0,3%. 3. 20 с. 4. 0,25 м; 1,0 м. 5. 4,9 с. 6. 3,9 с. 7. 0,86 м/с.
 § 1.6. 1. Проходит положение равновесия. 3. Проходит положение равновесия и движется справа налево.
 § 1.8. 1. Нет. 2. 1,5 Гц. 3. Да. 4. Увеличить массу станины станка.

Глава 2

- § 2.2. 1. 3,2 м/с. 2. 2,0 м.
 § 2.3. 1. 5,9 см. 2. 9,65 кГц. 3. 376 км. 4. На этой глубине находится нефтеносный слой. 5. Под песчаником находится каменная соль.
 § 2.4. 1. От 21,25 м до 1,7 см. 2. От 93,7 м до 7,5 см. 3. 5 км. 4. 0,7 с.
 § 2.6. 2. 894 м. 3. Есть дефект на глубине около 3 см. 4. Глубже 1 км 125,5 м.
 § 2.8. 1. Умножить все частоты на 2. 2. 880 Гц; 1760 Гц. 3. В 4 раза. 4. 500 октав.

Глава 3

- § 3.1. 1. $3 \cdot 10^{-3}$ Кл. 2. Емкость 20 мкФ, наибольшее (пробивное) напряжение 12 В. 3. $2,4 \cdot 10^{-4}$ Кл. 4. $4,8 \cdot 10^{-7}$ Кл.
 § 3.2. 2. 10,8 Дж. 3. $1,4 \cdot 10^{-2}$ Кл. 4. 3,5 мкФ.
 § 3.3. 1. 250 Дж. 2. 0,12 Гн. 3. 6,3 А.
 § 3.4. 1. $2 \cdot 10^{-5}$ с; 50 кГц. 2. 3,1 пФ. 3. 405 Гн.
 § 3.8. 1. От 1,2 МГц до 600 кГц. 2. От 25 до 60 м. 3. $2,99792456,2$ м/с. 4. $2,996576 \cdot 10^8$ м/с. 5. $2,9979 \cdot 10^8$ м/с; $2,9970 \cdot 10^8$ м/с; $3,331 \cdot 10^7$ м/с.
 § 3.10. 1. $v_{\text{рад}}/v_{\text{зв}} \approx 3000$. 2. Примерно 46 000.

Глава 4

- § 4.3. 1. Назад по нормали; вдоль нормали. 2. $40^\circ 31'$. 3. $1,236 = 1,648/1,333$. 4. $48^\circ 50'$. 5. $30^\circ 7'$.
 § 4.4. 1. $48^\circ 36'$; $41^\circ 16'$; $37^\circ 21'$; $24^\circ 26'$. 2. 69° .
 § 4.6. 1. $2,9970 \cdot 10^8$ м/с. 3. $4,14 \cdot 10^7$ м/с; $2,25 \cdot 10^8$ м/с; $1,98 \cdot 10^8$ м/с; $1,82 \cdot 10^8$ м/с.
 § 4.8. 1. 1,3 мм; 2,6 мм. 2. 0,48 мкм; $6,26 \cdot 10^{14}$ Гц. 3. 5 (один центральный, два слева и два справа). 4. 0,52 мкм.
 § 4.10. 1. $31^\circ 47'$; $31^\circ 21'$. 2. $1,9795 \cdot 10^8$ м/с; $1,9571 \cdot 10^8$ м/с. 3. $41^\circ 10'$; нет.
 § 4.12. 1. $1,17 \cdot 10^{15}$ Гц, 255 нм; ультрафиолетовый. 2. $4,1 \times 10^{14}$ Гц, 730 нм; красный.
 § 4.13. 1. $4,565 \cdot 10^{14}$ Гц, 656,7 нм; $6,163 \cdot 10^{14}$ Гц, 486,4 нм; $6,902 \cdot 10^{14}$ Гц, 434,4 нм; $7,304 \cdot 10^{14}$ Гц, 410,4 нм. 2. $2,465 \times 10^{15}$ Гц, 121,6 нм; $1,598 \cdot 10^{14}$ Гц, 1,876 мкм.

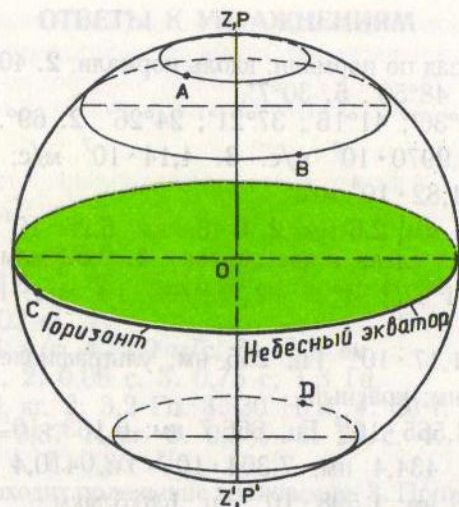
Глава 5

- § 5.2. 4. $L=h/2$.
 § 5.3. 3. $f=R(1-1/2 \sqrt{1-h^2/R^2})=R(1-1/2 \cos \alpha)$. 4. $\epsilon = \frac{f_0-f}{f_0} = \frac{1}{\sqrt{1-h^2/R^2}} - 1$, где $f_0=R/2$; при $h=0,1R$ $\epsilon=0,5\%$; при $h=0,4R$ $\epsilon=9\%$.
 § 5.4. 1. Собирающая, $f=125$ мм. 2. Рассеивающая, $f=-20$ см. 3. 25 см. 4. Уменьшится в 2 раза.
 § 5.9. 1. Система цветных круглых пятен. 2. Одну линию спектра.

Глава 6

- § 6.2. 1. 6 м. 2. На оси аппликат. 3. На плоскости XOY; 5 м.
 § 6.3. 4. С вертикалью; северный — в зените, южный — в надире. 5. С вертикалью; северный — в надире, южный — в зените. 6. С полуденной линией; на горизонте. 7. В южном; 247° . 8. В северном; $58^\circ 03'$; $61^\circ 55'$.
 § 6.4. 1. Рисунок 1. 2. Рисунок 2. 3. К западу; $28^\circ 45'$. 4. $96^\circ 54' 15''$ восточной долготы. 5. $61^\circ 30'$. 6. $41^\circ 20'$. 7. $59^\circ 50'$. 9. $l=H \operatorname{ctg} h$; в момент кульминации h имеет максимальное значение, а $\operatorname{ctg} h$ — минимальное.
 § 6.6. 1. $1,495 \cdot 10^8$ км; в 109 раз. 2. 0,38; 0,96; 0,53; 11,2; 9,5 радиусов Земли. 3. $1,32$ пк= $2,71 \cdot 10^5$ а.е.= $4,06 \cdot 10^{16}$ км; $8,33$ пк= $1,72 \cdot 10^5$ а.е.= $2,57 \cdot 10^{17}$ км. 4. Сириус в 2 раза дальше от Солнца, чем Проксима Центавра, и в 3 раза ближе Веги.

Рис. 1



§ 6.7. 1. 9 см; 0,6. 2. $(1+\epsilon)/(1-\epsilon)$. 3. 1,0340. 4. 1,0137. 5. $v_a/v_n = (1-\epsilon)/(1+\epsilon)$. 6. 0,83. 7. В 19 раз дальше. 8. 1 ч 36 мин. 9. 0,61 года. 10. 39,44 а.е. 11. Эллипс; 180 лет; второму закону Кеплера.

Глава 7

§ 7.1. 1. 86,6 м; 100 м. 2. 30 км; 51,6 км; 3. 31,6 м. 4. $a_x = -8$ см; $a_y = 6$ см; $a = 10,6$ см. 5. 9,9 м.

§ 7.2. 4. $2a \cos 30^\circ = 1,73a$. 5. Указание. Получается равно-сторонний треугольник. 6. $c+d=0$.

§ 7.3. 1. 1 м/с. 2. Перпендикулярно радиусу. 3. Перпендикулярно большой полуоси эллипса. 4. Перпендикулярно радиусу.

§ 7.4. 1. Пассажиры тянет назад; неинерциальная система от-счета. 2. Станет двигаться против направления движения вагона; нет. 3. Указание. Рассмотреть суточное движение звезд, Луны, Солнца.

§ 7.5. 1. Нет. 2. Траектория зависит от начальной скорости, а она в обеих системах отсчета разная. 3. Скорость Земли постоянна по модулю, но не по направлению.

§ 7.6. 1. $2,4 \cdot 10^7$ кгм/с. 2. 48 м/с. 3. 7,4 м/с. 4. 1,3 м/с. 5. 3,7 м/с. 6. 7 м/с.

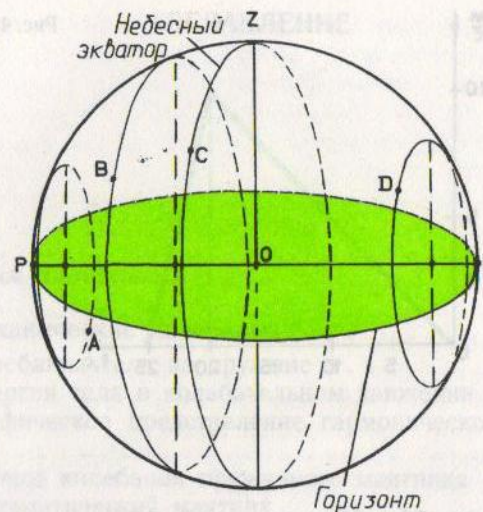
§ 7.7. 1. Отбрасывая веслами воду назад, он продвигает лодку вперед. 2. Винт отбрасывает воду назад, лодка движется вперед. 4. 1 м. 5. 7,5 кг. 7. 8,5 км/с.

§ 7.8. 1. 18 кН. 2. $\tau = mv/\mu mg = 4,2$ с. 3. 10 м/с. 4. Рисунок 3.

§ 7.9. 1. $0,33$ м/с². 2. 2 кН. 3. $-6,7$ м/с; замедленное движение. 4. 10 м/с. 5. 10 м/с; 100 м. 6. 5 с; 25 м. 7. Рисунок 4. 8. 20 м; 4 с.

§ 7.10. 1. 38,5 м; 27,5 м/с. 2. 1,1 с; 11 м/с. 3. 12,5 м/с.

Рис. 2



4. 1,56 с; 23,5 м; $45^\circ 39'$. 5. $\sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sin(90^\circ - \alpha) \cos(90^\circ - \alpha)$. 7. $h_1/h_2 = \sin^2 \alpha / \sin^2(90^\circ - \alpha) = \tan^2 \alpha$; 0,33.

§ 7.11. 1. 0,5 м/с. 2. 8,8 м/с². 4. 10^6 Н=1 МН.

§ 7.12. 1. $9,2$ м/с². 2. 30 км/с. 3. 464 м/с. 4. $2,7 \cdot 10^{-3}$ м/с². 5. $3,37 \cdot 10^{-2}$ м/с²; 0,34%. 6. 5 об/с. 7. 0,2 м. 8. $27^\circ 41'$.

§ 7.13. 1. $2,7 \cdot 10^{-6}$ Н. 2. $6,19 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг². 3. $g = \frac{F}{m} = \frac{GM}{R^2}$.

4. $5,97 \cdot 10^{24}$ кг. 5. $1,99 \cdot 10^{30}$ кг. 6. $6,43 \cdot 10^{21}$ кг. 7. $1,9 \cdot 10^{27}$ кг.

§ 7.14. 1. $4,27 \cdot 10^4$ км. 2. 1,52 а.е. 3. $\frac{R^2}{T^2} = \frac{GM_0}{4\pi^2}$. 4. 1,68 км/с; 2,38 км/с. 5. 3,57 км/с; 5,05 км/с.

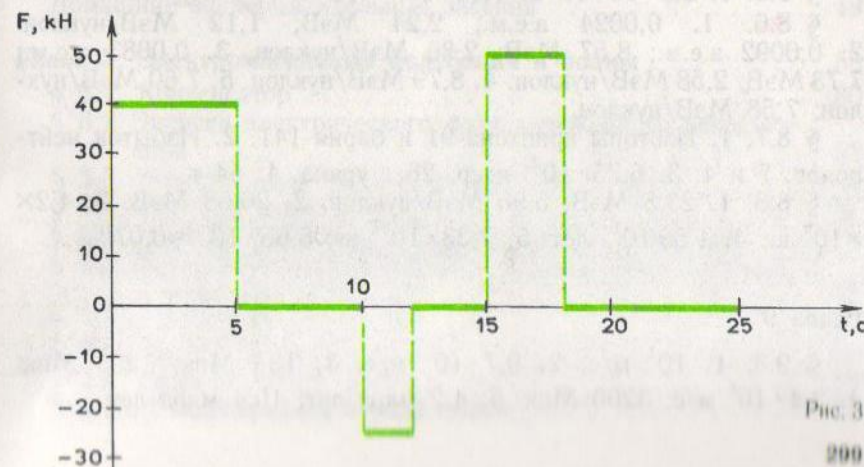


Рис. 3

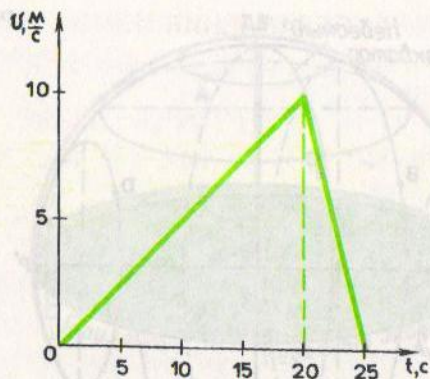


Рис. 4

Глава 8

§ 8.2. 1. e ; $2e$; $26e$; $92e$, где $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. 2. 1; 2; 26; 92. 3. 10; 27. 4. 18; 18.

§ 8.3. 1. $3,7 \cdot 10^{-12}$ кг. 2. $2,5 \cdot 10^{-11}$ кг. 3. Нет. 4. $5,49 \times 10^{-4}$ а.е.м.; 0,511 МэВ; 1,0057 а.е.м.; 936,8 МэВ. 5. $2,466 \cdot 10^{15}$ Гц; $1,63 \cdot 10^{-18}$ Дж; $10,2$ эВ; $1,81 \cdot 10^{-35}$ кг; $1,08 \cdot 10^{-8} \approx 10^{-6}\%$.

§ 8.4. 1. 2 протона, 2 нейтрона; 16 протонов, 16 нейтронов; 74 протона, 110 нейтронов; 82 протона, 125 нейтронов. 2. В ядре протия нет нейтронов; в ядре дейтерия 1 нейтрон; в ядре трития 2 нейтрона. 3. В атоме трития 1 электрон, в ядре трития 1 протон и 2 нейтрона; в атоме гелия-3 2 электрона, в ядре 2 протона и 1 нейтрон; химические свойства разные. 4. В ядре урана-235 143 нейтрона, урана-238 — 146 нейтронов; химические свойства одинаковые. 5. 75,76% легкого изотопа и 24,24% тяжелого. 6. 24,312 а.е.м.

§ 8.5. 1. $2,3 \cdot 10^2$ Н. 2. $1,86 \cdot 10^{-34}$ Н. 3. $F_{\text{кул}}/F_{\text{грав}} \approx 10^{36}$.

§ 8.6. 1. 0,0024 а.е.м.; 2,24 МэВ; 1,12 МэВ/нуклон. 2. 0,0092 а.е.м.; 8,57 МэВ; 2,86 МэВ/нуклон. 3. 0,0083 а.е.м.; 7,73 МэВ; 2,58 МэВ/нуклон. 4. 8,79 МэВ/нуклон. 5. 7,60 МэВ/нуклон; 7,58 МэВ/нуклон.

§ 8.7. 1. Изотопы криптона-91 и бария-141. 2. Избыток нейтронов: 7 и 4. 3. $6,75 \cdot 10^{22}$ ядер, 26 г урана. 4. 54 т.

§ 8.8. 1. 23,8 МэВ; 5,96 МэВ/нуклон. 2. 26,68 МэВ. 3. $4,2 \times 10^9$ кг. 4. $1,5 \cdot 10^{13}$ лет. 5. $1,33 \cdot 10^{27}$ кг; $6,65 \cdot 10^{-4} \approx 0,07\%$.

Глава 9

§ 9.3. 1. 10^7 м/с. 2. $9,7 \cdot 10^7$ м/с. 3. 133 Мпк; 1293 Мпк. 4. $2,4 \cdot 10^8$ м/с; 3200 Мпк. 5. 4,2 млрд лет; 10,4 млрд лет.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Советы юным читателям	5

Глава 1. Механические колебания	7
§ 1.1. Колебания тела на пружине	7
§ 1.2. Энергия тела в колебательном движении	10
§ 1.3. Графическое представление гармонического колебания	13
§ 1.4. Период колебания пружинного маятника	15
§ 1.5. Математический маятник	17
§ 1.6. Колебания в одинаковой фазе и в противофазе	20
§ 1.7. Свободные колебания. Затухание колебаний	23
§ 1.8. Вынужденные колебания. Резонанс	24
§ 1.9. Автоколебания	28
Домашние экспериментальные задания	30

Глава 2. Волны	32
§ 2.1. Образование волн	32
§ 2.2. Длина волны	34
§ 2.3. Поперечные и продольные волны	36
§ 2.4. Звуковые волны	39
§ 2.5. Резонанс в акустике	42
§ 2.6. Отражение звука. Эхо	43
§ 2.7. Характеристики звука	45
§ 2.8. Ухо	48
Домашние экспериментальные задания	49

Глава 3. Электромагнитные колебания и волны	50
§ 3.1. Конденсатор	50
§ 3.2. Энергия электрического поля заряженного конденсатора	53
§ 3.3. Энергия магнитного поля катушки с током	54
§ 3.4. Колебательный контур	56
§ 3.5. Период свободных электромагнитных колебаний	59
§ 3.6. Генератор незатухающих электромагнитных колебаний на транзисторе	60
§ 3.7. Электромагнитное поле	63
§ 3.8. Электромагнитные волны	65
§ 3.9. Радиосвязь	69
§ 3.10. Радиопередача и радиоприем	71

§ 3.11. Радиолокация	75
§ 3.12. Радиоастрономия	77
Домашние экспериментальные задания	80
Глава 4. Световые явления	82
§ 4.1. Что такое оптика?	82
§ 4.2. Закон прямолинейного распространения света. Солнечные и лунные затмения.	82
§ 4.3. Отражение и преломление света	85
§ 4.4. Полное отражение	88
§ 4.5. Корпускулярная и волновая теории света	89
§ 4.6. Скорость света	91
§ 4.7. Интерференция	94
§ 4.8. Определение длины световой волны	96
§ 4.9. Свет — электромагнитная волна	99
§ 4.10. Дисперсия. Спектральное разложение	102
§ 4.11. Сплошной и линейчатый спектры. Спектральный анализ	106
§ 4.12. Происхождение линейчатых спектров	110
§ 4.13. Спектральные серии атома водорода по Бору	113
Домашние экспериментальные задания	116
Глава 5. Оптические приборы	119
§ 5.1. Геометрическая оптика	119
§ 5.2. Плоское зеркало	121
§ 5.3. Сферическое зеркало	123
§ 5.4. Линзы	125
§ 5.5. Построение изображений в линзах и сферических зеркалах	129
§ 5.6. Глаз как оптическая система	132
§ 5.7. Угол зрения. Приборы для увеличения угла зрения	135
§ 5.8. Фотоаппарат. Проектор. Кинопроектор	138
§ 5.9. Призма. Спектроскоп	140
Домашние экспериментальные задания	142
Глава 6. Движение небесных тел. Системы координат	144
§ 6.1. Положение материальной точки в пространстве и система координат	144
§ 6.2. Небесные координаты	146
§ 6.3. Кульминации звезд. Определение местного времени и географических координат	149
§ 6.4. Продолжительность суток и календарь	153
§ 6.5. Определение расстояний до тел Солнечной системы и их размеров	153
§ 6.6. Движение планет Солнечной системы. Законы Кеплера	156
Домашние экспериментальные задания	161

Глава 7. Законы Ньютона	162
§ 7.1. Перемещение — вектор	162
§ 7.2. Действия над векторами	164
§ 7.3. Скорость — вектор. Мгновенная скорость	166
§ 7.4. Первый закон Ньютона. Инерциальная система отсчета	169
§ 7.5. Принцип относительности	172
§ 7.6. Закон сохранения импульса	175
§ 7.7. Реактивное движение	177
§ 7.8. Второй закон Ньютона — основной закон динамики	180
§ 7.9. Ускорение. Равноускоренное движение	183
§ 7.10. Свободное падение тел. Примеры решения задач	186
§ 7.11. Третий закон Ньютона	194
§ 7.12. Равномерное движение материальной точки по окружности	198
§ 7.13. Закон всемирного тяготения	202
§ 7.14. Закон всемирного тяготения. Движение планет и искусственных спутников	206
§ 7.15. Закон всемирного тяготения и объяснение некоторых явлений природы	209
Домашние экспериментальные задания	212
Глава 8. Атомное ядро. Ядерная энергетика	215
§ 8.1. Радиоактивность	215
§ 8.2. Атом и атомное ядро	217
§ 8.3. Единицы физических величин в ядерной физике	218
§ 8.4. Строение ядра	221
§ 8.5. Ядерные силы	224
§ 8.6. Дефект массы. Энергия связи	225
§ 8.7. Деление массивных ядер. Цепная реакция	230
§ 8.8. Цепные ядерные реакции деления. Ядерный реактор	234
§ 8.9. Термоядерные реакции. Энергия Солнца и звезд	238
§ 8.10. Происхождение планет и радиоактивность	241
§ 8.11. Трансурановые элементы. Актиноиды	242
§ 8.12. Биологическое действие и применение ионизирующих излучений	244
Домашние экспериментальные задания	246
Глава 9. Строение и эволюция Вселенной	248
§ 9.1. Мир звезд	248
§ 9.2. Наша Галактика	252
§ 9.3. Галактики и квазары	259
§ 9.4. Большой взрыв	263
Заключение	270
Лабораторные работы	271
Домашний практикум для любознательных	288
Ответы к упражнениям	296

Учебное издание

Пинский Аркадий Аронович
Разумовский Василий Григорьевич
Бугаев Александр Иванович и др.

ФИЗИКА

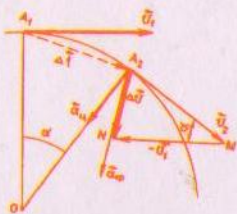
УЧЕБНИК ДЛЯ 9 КЛАССА ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Зав. редакцией *Г. Н. Федина*
Редактор *О. В. Серышева*
Младший редактор *Л. А. Крикунова*
Художник *В. П. Сайчук*
Художественный редактор *В. Н. Алексеев*
Технические редакторы *М. А. Полуян, Р. С. Еникеева*
Корректор *И. В. Чернова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000.
Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано к печати с диапозитивов 16.10.02.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага писчая № 1. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл.
печ. л. 19+вкл. 0,25+форз. 0,31. Усл. кр.-отг. 40,6. Уч.-изд. л. 18,52+вкл. 0,28+
+форз. 0,42. Тираж 50 000 экз. Заказ № 5391 (К—Г).

Федеральное государственное унитарное предприятие ордена Трудового Красного Знамени
«Издательство «Просвещение» Министерства Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. 127521, Москва, 3-й проезд
Марьиной рощи, 41.

Федеральное государственное унитарное предприятие Смоленский полиграфический ком-
бинат Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.



В учебнике «Физика-9» под редакцией А.А. Пинского, В.Г. Разумовского:

► рассматриваются

природные явления, наблюдаемые на Земле и во Вселенной и объясняемые законами физики;
исторические сведения, иллюстрирующие динамику развития физических идей и их воплощение на практике;
роль наблюдений, эксперимента и теории

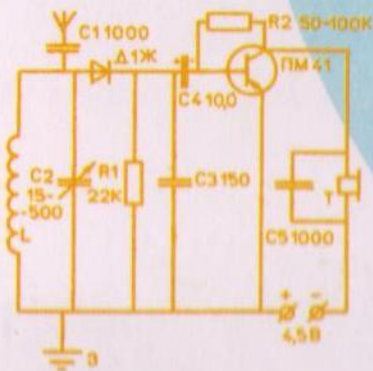
► представлены

практические и экспериментальные задания;
лабораторные работы;
вопросы для самоконтроля;
упражнения в форме качественных и расчетных задач;
система домашних экспериментальных заданий

► предлагается

двухуровневое изложение учебного материала, позволяющее реализовать уровневую дифференциацию

Третье издание учебника выходило под названием
«Физика и астрономия»



ISBN 5-09-011978-3



9 785090 119788

