

И.А. Соловейчик

ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

*Пособие для абитуриентов
и старшеклассников*

ОРАКУЛ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006

ББК 22.3:я 72

С 60

Соловейчик И.А.

С 60 Физика. Электродинамика. Квантовая физика: Пособие для абитуриентов и старшеклассников — СПб.: «ОРАКУЛ», 2006. — 272 с. ISBN 5-901032-09-8

Учебное пособие представляет собой законченный курс по основам классической физики в объеме программы общеобразовательной школы. Стиль пособия отличает предельная ясность изложения материала, сочетающаяся с логической стройностью и полнотой, что позволяет рекомендовать пособие весьма широкому кругу читателей с различным уровнем подготовки по физике и математике.

Пособие издается в трех книгах. Третья из них посвящена изложению электродинамики и квантовой физики в объеме программы одиннадцатого класса средней школы.

Предназначена для преподавателей и учащихся старших классов общеобразовательных и физико-математических школ.

ББК 22.3:я 72

ISBN 5-901032-09-8

© Соловейчик И.А., 1995

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемый читатель! Вы держите в руках третью книгу пособия по физике, основой которого послужил учебник физики, написанный известным педагогом И. А. Соловейчиком. Как и первые две книги, она адресована старшеклассникам и абитуриентам, которые готовятся к выпускным или вступительным экзаменам.

Сегодня, когда на полке абитуриента стоит, наверное, не один десяток разных пособий, важно сделать правильный выбор. Ведь удачно выбранное пособие может помочь не только вспомнить основные факты, законы, физические теории, но и привести знания в стройную систему, правильно расставить акценты.

Чем же, спросите вы, это пособие выгодно отличается от многих других? Во-первых, тем, что оно написано опытным и внимательным педагогом, которому хорошо известны особенности восприятия старшего школьника. Автор предлагает строгое изложение физики, которое, вместе с тем, предупреждает наиболее часто встречающиеся у учеников ошибки. Учитель не стремится обойти или «замазать» трудные места, а исподволь готовит ученика к их восприятию, дает возможность посмотреть на них с разных точек зрения, каждый раз добавляя новые, проясняющие существо вопроса штрихи.

Во-вторых, учебный материал изложен в полном объеме традиционного школьного курса физики предельно лаконично. Четко выверенная структура изложения материала позволяет, с одной стороны, обозреть каждую тему курса в целом, а с другой — получить довольно полное представление о каждом ее фрагменте.

В-третьих, последовательность изложения учебного материала совпадает в большинстве случаев с последовательностью его изложения в лучших школьных учебниках физики. Это позволяет в случае необходимости быстро уточнить детали, сверить формулировки, сопоставить те или иные выводы.

В-четвертых, значительное место в пособии отводится обучению решению как стандартных задач, так и задач, содержащих «изюминку». При этом главное внимание уделяется системе рассуждений, приводящих к отысканию пути решения задачи. В тех разделах курса, знание которых чаще всего проверяется посредством решения соответствующих задач, приводятся конкретные задачи.

Решая их, учащиеся могут проверить, как усвоил ими материал данной темы.

Наконец, нельзя не отметить, что материал изложен понятно и доступно. Строгости и научности изложения отнюдь не противоречат частые обращения автора к здравому смыслу читателя. При изложении материала автор отдает предпочтение качественным аспектам физических теорий, ориентирует учащихся на овладение кругом идей и стилем научного мышления, демонстрирует образец четкого, ясного и неформального изложения своих знаний.

Изучайте это пособие внимательно: оно поможет вам успешно подготовиться к выпускным и вступительным экзаменам. Желаем удачи!

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

(продолжение)

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Введение

Явления, изучению которых посвящена эта глава, лежат в основе всех современных методов получения электрической энергии на электростанциях. Но этим их важность не исчерпывается. Эти явления и закономерности, их связывающие, играют первостепенную роль в науке об электричестве. А так как с электричеством связан ряд важнейших разделов техники (электротехника, радиотехника) и многочисленные природные процессы (например, процесс распространения света и других электромагнитных волн), то, не ознакомившись с этим кругом явлений, нельзя серьезно изучать ни технику, ни природу.

§ 1. Опыты Фарадея

Всякий ток, как мы знаем, создает вокруг себя магнитное поле. Может возникнуть вопрос, не является ли связь между током и магнитным полем еще более тесной и нельзя ли с помощью магнитного поля получать электрический ток? Та-

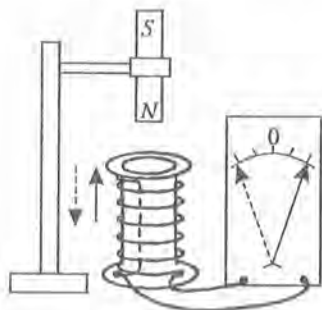


Рис. 1

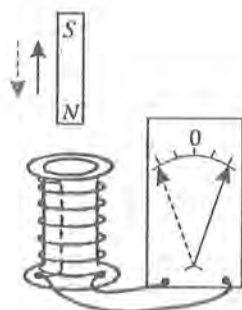


Рис. 2

кую задачу поставил перед собой английский физик Фарадей (1791–1867). После многих безуспешных попыток он нашел, что действительно, при некоторых условиях, магнитное поле может возбуждать электрический ток. Для этого достаточно менять магнитное поле внутри проволочной катушки (например, двигая ее относительно магнита). Этот способ получения тока применяется на всех электростанциях, так что открытие Фарадея является основой всей современной электроэнергетики.

Фарадей проделал много опытов, чтобы точно выяснить условия, при которых возникает ток. Все его опыты можно разбить на две группы:

- а) опыты с движущейся катушкой;
- б) опыты с неподвижной катушкой.

В первом случае катушку приближали или отодвигали от неподвижного магнита (рис. 1) или от неподвижного соленоида (соленоидом тут будем называть катушку, питаемую постоянным током). Гальванометр, подключенный к катушке, показывал, что в ней возникал ток. Во втором случае катушку не трогали, а двигали магнит (рис. 2) или соленоид. Результат получался таким же. Но в неподвижной катушке можно получать ток еще одним способом: установить соленоид неподвижно и менять в нем ток (рис. 3). Каждый раз, когда ток в соленоиде меняли, в катушке возникал ток.

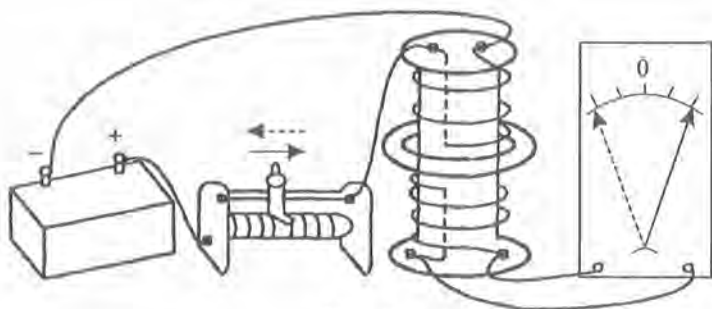


Рис. 3

Во всех этих опытах ток в катушке возникал тогда, когда менялся магнитный поток, пронизывающий ее¹. Этот ток Фарадей назвал индукционным. Если создать такие условия, чтобы менялся магнитный поток вне катушки, а внутри он не менялся бы, то индукционный ток не возникнет бы.

Все эти опыты удаются и в том случае, если катушка состоит из одного-единственного витка, но в этом случае надо иметь гальванометр высокой чувствительности. В дальнейшем вместо термина «виток» будем применять термин «контур». (В данном случае оба термина означают одно и то же, но далее, когда мы будем разбирать процессы, происходящие при изменении магнитного поля в вакууме, где никаких катушек нет, термин «контур» останется в силе: он будет означать замкнутую линию, проведенную и вакууме.)

§ 2. Закон электромагнитной индукции

1. Ток в замкнутой цепи возникает в том случае, если в цепи действует электродвижущая сила, стало быть, в опытах

¹ Из упомянутых здесь опытов нельзя установить, изменение какой именно величины следует считать причиной возникновения тока: изменение магнитной индукции \vec{B} или изменение магнитного потока Φ . В наших опытах менялось и то и другое. Но другие опыты (одни из них описан в *упр. 1* к этому параграфу) показывают, что важно изменение Φ , а не \vec{B} .

Фарадея в катушке возникала ЭДС. Легко показать, что величина этой ЭДС зависит от скорости изменения магнитного поля. Так, если катушку не двигать относительно магнита (рис. 1), т. е. если магнитный поток в катушке не меняется, то ЭДС в ней не возникает. Если двигать катушку медленно, то в ней возникает небольшой ток, а значит, и небольшая ЭДС. Чем быстрее двигать катушку, тем больше величина возникающей в ней ЭДС. То же наблюдалось и в других опытах. Например, если медленно менять ток в соленоиде (медленно перемещать движок реостата, показанного на рис. 3), то возникает небольшая ЭДС. Чем резче менять этот ток, тем бóльшая ЭДС возникает в катушке.

Результаты всех этих опытов можно сформулировать так. Если магнитный поток, пронизывающий данный контур, меняется, то в контуре возникает ЭДС. Это явление называют электромагнитной индукцией, а возникающую ЭДС — ЭДС индукции. Измерения показали, что величина ЭДС индукции \mathcal{E} пропорциональна скорости изменения магнитного потока и больше ни от чего не зависит (в частности, не зависит от материала катушки и от ее сопротивления). В виде формулы этот закон записывается так:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока внутри контура за время Δt ¹. Строго говоря, эта формула определяет среднее значение ЭДС за время Δt . Мгновенное значение ЭДС равно пределу этого отношения при $\Delta t \rightarrow 0$, т. е. равно производной магнитного потока по времени: $\mathcal{E} = -\dot{\Phi}$. Знак «минус» связан с правилом Ленца, устанавливающим направление ЭДС индукции (это будет разъяснено дальше).

¹ Может показаться неожиданным, что коэффициент пропорциональности в этой формуле оказался равным единице (по абсолютной величине). Дело в том, что хотя мы рассматривали закон электромагнитной индукции как новый закон природы, не связанный с известными ранее закономерностями, он может быть выведен (по крайней мере, для некоторых частных случаев, как это будет показано в § 8) из выражения для силы Лоренца. Никаких добавочных коэффициентов при этом не получается.

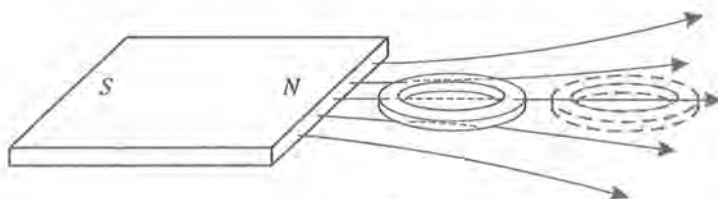


Рис. 4

2. Открытие явления электромагнитной индукции является одним из самых крупных открытий XIX века. Лица, незнакомые с историей науки, обычно неспособны оценить подвиг ученого, сделавшего открытие такого масштаба. Когда верный путь, который привел ученого к открытию, нам известен, решение проблемы представляется делом простым, а ложные пути, которыми шел ученый долгие годы (открытию Фарадея предшествовали 11 лет исследований), — грубыми заблуждениями. Но такова судьба каждого великого открытия.

Оценить по достоинству величайшие открытия прошлых веков трудно еще потому, что те представления, которые привели ученых к этим открытиям (например, представление о поле, введенное Фарадеем), так прочно вошли в наше мировоззрение, что воспринимаются сейчас как само собой разумеющиеся. Нам трудно вообразить, сколько фантазии и смелости требовалось, чтобы эти представления создать.

Упр. 1. Виток расположен в магнитном поле прямого постоянного магнита так, что силовые линии проходят вдоль плоскости витка (рис. 4). Виток удаляют от магнита, перемещая его вдоль силовых линий. Меняется ли при этом индукция B магнитного поля внутри витка? Меняется ли магнитный поток, пронизывающий виток? Будет ли возникать в витке ЭДС индукции?

Упр. 2. Магнитный поток внутри некоторого витка меняется так, что график зависимости $\Phi(t)$ имеет форму трапеции (рис. 5). Перерисуйте этот график в тетрадь и под этим графиком начертите другой, изображающий зависимость ЭДС индукции от времени.

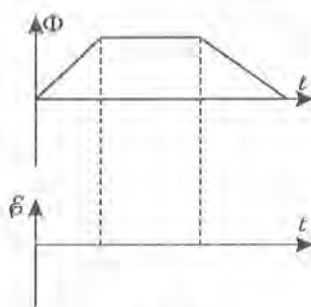


Рис. 5

Упр. 3. В однородном магнитном поле расположен виток, площадь которого 50 см^2 . Нормаль к плоскости витка составляет с направлением магнитного поля угол 60° . Индукция поля равна $0,2 \text{ Тл}$. Чему равно среднее значение ЭДС индукции, возникшей в витке, если поле исчезло за $0,02 \text{ с}$?

О т в е т: 25 мВ .

Упр. 4. Предположим, что явление электромагнитной индукции осталось неизвестным, поэтому электрический ток можно получать только от химических источников (батареек). Сколько стоит один киловатт-час энергии, выработанной плоской батарейкой стоимостью 20 рублей, если в течение всего срока своей службы она способна питать лампочку, потребляющую $0,25 \text{ А}$ при напряжении 4 В в течение двух часов? Сравните ответ с нынешним тарифом ($1,5$ рубля за кВт-ч).

§ 3. Взаимодействие индукционного тока с магнитом

1. Русский физик Ленц (1804–1865) установил, что *индукционный ток всегда мешает тому движению, которое его породило*. Например, если магнит приближать к витку, то индукционный ток создает такое магнитное поле, что виток станет отталкиваться от магнита. Если же магнит удалять от витка, то возникнет притяжение.

2. Можно показать, что приведенное правило Ленца есть следствие закона сохранения энергии. Рассмотрим это на таком примере. Пусть постоянный магнит свободно падает с определенной высоты, пролетая по пути внутри медного витка (рис. 6). С одинаковой ли скоростью ударится магнит о пол, если в одном случае виток был разомкнут (разрезан), а в другом — замкнут?

Применим закон сохранения энергии. В первом случае потенциальная энергия поднятого магнита целиком превращалась в кинетическую. Во втором случае в витке возникал индукционный ток и выделялось определенное количество тепла (можно для наглядности представить, что загорелась подключенная к витку лампочка). Откуда бралась энергия, израсходованная в витке? Очевидно, она бралась от пролетающего магнита. Но первоначальная энергия поднятого магнита в обоих случаях была одинаковой. Значит, во втором случае кинетическая энергия магнита в момент удара меньше, чем в первом. А если скорость падения магнита получилась меньше, значит, со стороны витка на него действовала сила, мешавшая его движению. Это и утверждает закон Ленца.

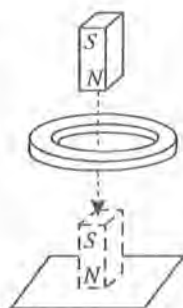


Рис. 6

Упр. 1. Если вращать в магнитном поле виток (или обмотку, состоящую из многих витков), то в витке возникает индукционный ток. Это явление используется в генераторах тока. Одинаково ли легко вращать обмотку ручного генератора, если в одном случае обмотка разомкнута, в другом же случае к ней подключены лампы, моторы и другие потребители? Объяснить двумя способами:

- а) ссылкой на закон сохранения энергии;
- б) ссылкой на правило Ленца.

О т в е т: а) В первом случае за счет энергии генератора питаются потребители — значит, при каждом обороте придется затрачивать больше энергии, чем раньше. Это означает, что в этом случае к рукоятке генератора придется прикладывать большую силу.

б) Во втором случае в обмотке генератора возникает индукционный ток (которого не было при разомкнутой цепи). Из правила Ленца следует, что при этом возникнут силы, тормозящие движение обмотки. Вращать генератор станет труднее (следовательно, при каждом обороте придется за-

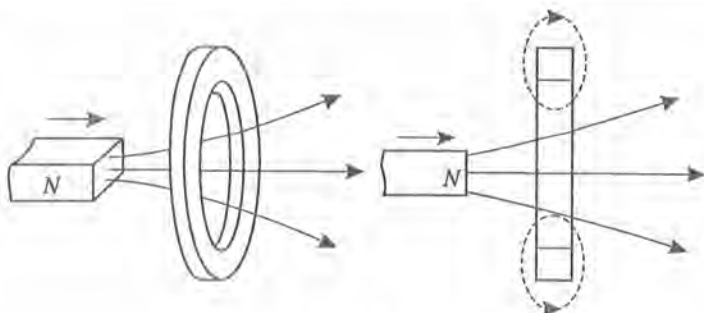


Рис. 7

трачивать больше энергии; эту добавочную энергию и получают потребители).

Упр. 2. Замкнутый виток (не из сверхпроводника) падает под действием силы тяжести на магнит. Может ли возникнуть под действием индукционного тока такая большая сила, что виток неподвижно повиснет в воздухе?

§ 4. Общая формулировка правила Ленца

1. Правило Ленца можно обобщить так, чтобы оно предсказывало не только направление сил, действующих на движущееся в магнитном поле тела, но и направление индукционного тока во всех без исключения случаях электромагнитной индукции. Это обобщенное правило формулируется так: *индукционный ток всегда мешает тому изменению магнитного потока, которое его породило*. Покажем на двух примерах, как находить направление индукционного тока, пользуясь этим правилом.

Первый пример. Пусть к витку приближают магнит северным полюсом (рис. 7), затем удаляют (рис. 8). Найдём направление индукционного тока в каждом случае.

В результате приближения магнита магнитный поток внутри витка увеличивается. Согласно правилу Ленца, индукционный ток будет мешать возрастанию магнитного потока, т. е. возбудит встречное магнитное поле (показано

пунктиром). Зная направление этого поля, находим (по правилу винта) направление индукционного тока.

Пусть теперь магнит удаляют. Это значит, что первичное поле в витке (по-прежнему направленное влево) уменьшается. Индукционный ток в витке будет мешать уменьшению магнитного потока, т. е. возбудит магнитное поле, направленное туда же, куда и первичное (показано пунктиром). Зная направление этого поля, находим (по правилу винта) направление индукционного тока.

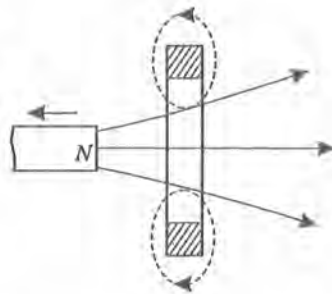


Рис. 8

Второй пример. Пусть два витка расположены один под другим или один внутри другого, как показано на рис. 9. В первом витке имеется источник тока и рубильник. В момент замыкания и в момент размыкания рубильника во втором витке возникает ток. Найдем направление этого тока.

После замыкания рубильника (рис. 9а) магнитный поток, созданный первым витком, начинает расти. При этом во втором витке возникает индукционный ток. Из правила Ленца следует, что этот ток должен мешать росту первичного поля — значит, этот ток будет направлен «наперекор» первичному току. Если рубильник разомкнуть (рис. 9б), то во втором витке снова возникает индукционный ток. Из правила Ленца следует, что этот ток должен мешать исчезновению первичного поля. Другими словами, вторичное поле должно совпадать по направлению с первичным. Это произойдет лишь в том случае, если вторичный ток совпадает по направлению с первичным.

2. Математическим выражением правила Ленца является знак «минус» в формуле закона электромагнитной индукции. (Для тех, кто интересуется тем, как этот «минус» следует применять формально, предназначено *упр. 2* к этому параграфу.)

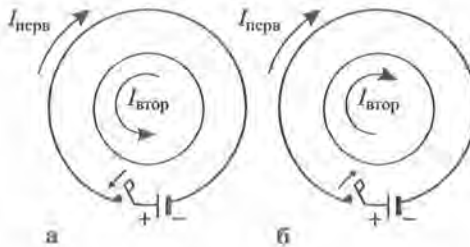


Рис. 9

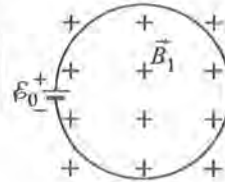


Рис. 10

Упр. 1. Пусть виток расположен в плоскости чертежа (рис. 10). Перед витком имеется магнит, который создает поле B_1 , направленное от нас за чертеж. В витке имеется источник с ЭДС $\varepsilon_0 > 0$, создающей ток, направленный по часовой стрелке. Изменяющийся магнитный поток Φ_1 создает в контуре дополнительную ЭДС величиной ε_1 . Чему равна результирующая ЭДС в контуре: сумме или разности абсолютных значений ε_0 и ε_1 ?

О т в е т: Если Φ_1 растет, то $\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_1$,
если убывает, то $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$.

Упр. 2 (необязательное). Разберитесь в приведенном ниже «формальном» решении предыдущей задачи:

1. Направление вектора B_1 принимаем за положительное.
2. Поскольку источник ε_0 создает ток, магнитное поле которого совпадает с направлением B_1 , приписываем ε_0 положительный знак.

За. Если B_1 растет, то $\Delta\Phi > 0$ и $\varepsilon_1 < 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_1$.

3б. Если B_1 уменьшается, то $\Delta\Phi < 0$ и $\varepsilon_1 > 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$.

§ 5. Вихревые токи (токи Фуко)

1. Индукционные токи могут возникать не только в проводниках, имеющих форму витков или катушек, но и в «сплошных» телах: в металлических дисках, в болванках, в сердечниках катушек, в корпусах электрических машин и т. д. В этом

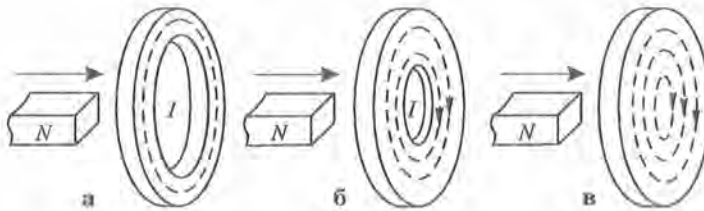


Рис. 11

случае их называют вихревыми токами или токами Фуко (по фамилии французского физика, впервые обратившего на них внимание).

Рассмотрим в качестве примера металлический диск, к которому приближают магнит (рис. 11в). Сначала представим, что у диска вырезана середина. Получится широкий виток (рис. 11а), в котором при изменении магнитного потока будет возникать «обычный» индукционный ток. Если внутреннюю полость витка уменьшить, вставив туда виток меньших размеров (рис. 11б), то индукционный ток не прекратится, а наоборот, увеличится, так как сопротивление витка уменьшится. Продолжая уменьшать внутреннюю полость витка, мы получим в конце концов сплошной диск, в котором будет еще больший ток, чем в диске с вырезом.

2. Вихревые токи, возникающие в телах, выделяют в них тепло. Во многих случаях (например, в сердечнике трансформатора) это ведет к непроизводительной потере мощности и, кроме того, может привести к порче изоляции обмоток. Для уменьшения вихревых токов сердечники собирают из отдельных тонких листов, изолированных друг от друга специальным лаком.

Вихревые токи находят полезное применение в индукционных печах. Такая печь представляет собой тигель, помещенный внутри катушки, питаемый переменным током высокой частоты (рис. 12).

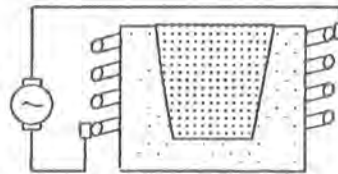


Рис. 12

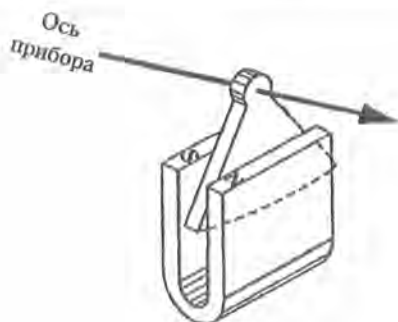


Рис. 13

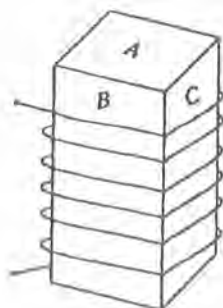


Рис. 14

В таких печах можно вести плавку даже в вакууме, что позволяет получать металлы и сплавы исключительной чистоты.

Индукционные токи, возникающие в телах, движущихся в магнитном поле, должны, согласно правилу Ленца, тормозить движение этих тел. Это используется в некоторых измерительных приборах для быстрого успокоения колебаний стрелок. Для этого к стрелке прикрепляют алюминиевую пластинку, расположенную между полюсами постоянного магнита (рис. 13). Преимуществом такого устройства (перед таким, где быстрое успокоение достигается за счет увеличенного трения) в том, что когда стрелка останавливается, тормозящая сила исчезает, не препятствуя стрелке прийти к положению равновесия.

Упр. 1. В сердечнике катушки, питаемой переменным током (рис. 14), возникают вихревые токи. Параллельно какой плоскости (А или В или С) надо разрезать сердечник, чтобы уменьшить эти токи?

Упр. 2. Если перед сильным подковообразным магнитом установить на оси медный диск (рис. 15), то при вращении магнита диск также начинает вращаться. Объяснить это явление и объяснить, будет ли диск вращаться синхронно с магнитом (т. е. с той же скоростью, что и магнит).

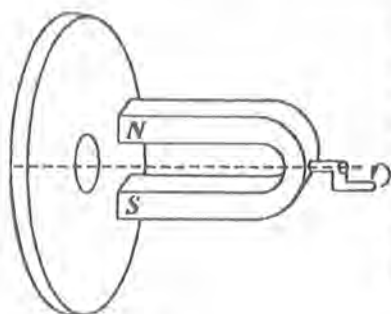


Рис. 15

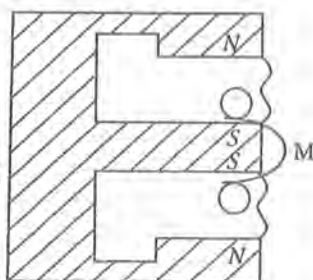


Рис. 16

§ 6. Электродинамический микрофон

Существуют микрофоны различных систем. Действие одного из самых распространенных микрофонов, электродинамического, основано на явлении электромагнитной индукции. Его устройство почти точно совпадает с устройством электродинамического громкоговорителя. Легкая катушка находится в поле сильного постоянного магнита, имеющего форму толстостенного стакана с круглым стержнем посередине (рис. 16). С катушкой связана мембрана М, сделанная из пластмассы или алюминиевой фольги. В громкоговорителе к катушке подводился переменный ток звуковой частоты, и под действием силы Ампера она колебалась с частотой тока. В результате колебания электрические превращались в механические (звуковые) колебания той же частоты. В микрофоне все происходит наоборот. Под действием звука мембрана и соединенная с ней катушка колеблются. Магнитный поток, пронизывающий катушку, также колеблется, и в катушке возникает переменная ЭДС индукции той же частоты, что и частота музыкального тона, прозвучавшего перед микрофоном. В результате колебания механические (звуковые) превращаются в колебания электрические.

Возникшая в катушке ЭДС поступает в усилитель, а оттуда в громкоговоритель либо в звукозаписывающее устройство.

§ 7. Магнитная запись и воспроизведение информации

1. В настоящее время в быту и в технике широко применяются магнитный способ записи и хранения информации (в магнитофонах, видеомагнитофонах, ЭВМ). Разберем, как это делается в магнитофонах. Записанная информация хранится в магнитной ленте, т. е. в гибкой пластмассовой пленке, покрытой с одной стороны ферромагнитным порошком. При записи звука механические колебания сначала с помощью микрофона превращаются в колебания электрического тока. После усиления этот ток направляется в обмотку «записывающей головки» (рис. 17). Головка представляет собой подковообразный электромагнит с узким зазором (настолько узким, что поле вне магнита создается лишь на участке шириной в несколько микрометров). Двигаясь мимо головки, лента намагничивается, и каждую секунду на ней появляются сотни участков, намагниченных по-разному.

Чтобы воспроизвести записанный звук, ленту надо перемотать обратно, затем пропускать с той же скоростью мимо воспроизводящей головки (она устроена так же, как и записывающая). Когда в зазор головки попадает определенный участок ленты, то магнитный поток, созданный этим участком, замыкается через сердечник головки. Поскольку разные участки намагничены по-разному, магнитный поток в сердечнике меняется сотни раз в секунду и возбуждает в ее обмотке ЭДС индукции той же частоты, что и записанный звук. Возникшая ЭДС после усиления направляется в громкоговоритель.

2. Примерно так же записывается и считывается информация на жестких дисках компьютера. Разница в том, что вместо магнитной ленты используется диск, покрытый ферромагнитным составом, который вращается как диск в

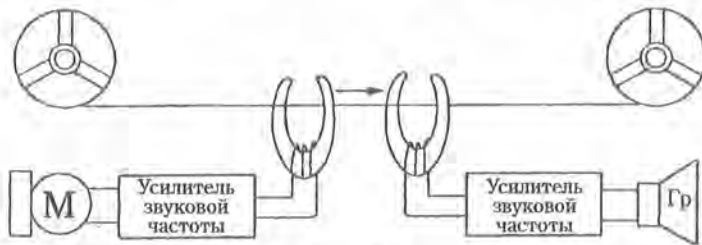


Рис. 17

проигрывателе, но с гораздо большей скоростью. Магнитная головка способна перемещаться вдоль неподвижного радиуса. Магнитные дорожки имеют вид концентрических окружностей. Запись и воспроизведение производится так же, как в магнитофонах, только тут записывается и воспроизводится не звук, а последовательность нулей и единиц, закодированных в виде отдельных импульсов тока.

На каждом таком диске можно записать такое количество информации, которое содержится в книгах на сотнях тысяч книжных страниц.

§ 8. Какие силы заставляют двигаться электроны при электромагнитной индукции

Формула $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ не дает ответа на вопрос о том, какие

именно силы заставляют электроны двигаться при возникновении индукционного тока. Ответ на этот вопрос зависит от того, что именно движется (относительно данной инерциальной системы): катушка или магнит. Если движется катушка, то вместе с ней движутся и свободные электроны, находящиеся в витках катушки. Но на движущиеся электроны действует сила Лоренца. Эта сила и создает индукционный ток. Если движется магнит, то свободные электроны в катушке в среднем покоятся. В этом случае сила Лоренца не может вызвать их направленного движения. Если на покоящиеся заряды дей-

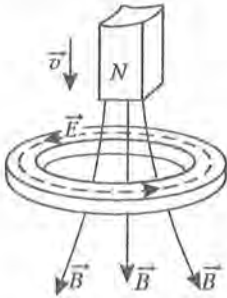


Рис. 18

Поле, силовые линии которого замкнуты, называют вихревым. По своему силовому действию на электрические заряды вихревое поле не отличается от электростатического.

Упр. 1. Будет ли работа, совершаемая вихревым полем при перемещении заряда по замкнутому кругу, равна нулю (как это имеет место для электростатического поля)?

§ 9. Расчет ЭДС индукции в движущихся проводниках

1. В движущихся проводниках индукционный ток, как мы уже упоминали, вызывается силой Лоренца. В этих случаях ЭДС индукции можно вычислить, пользуясь только выражением для силы Лоренца. Сделаем такой расчет для прямоугольного контура, состоящего из П-образной петли и лежащего на этой петле стержня (рис. 19). Для облегчения расчета будем считать, что магнитное поле B однородно (направлено от нас за чертеж) и что движется не весь контур, а только стержень (вправо). Поскольку вместе со стержнем движутся его свободные электроны, на них будет действовать сила Лоренца. Применяя правило левой руки (не следует забывать, что на отрицательные заряды сила Лоренца действует в обратную по сравнению с действующей на положительные заряды силой стороны), видим, что сила Лоренца будет гнать

ствует сила, значит в этом месте имеется электрическое поле $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

Таким образом, мы вынуждены признать, что, когда внутри контура меняется магнитный поток, то в контуре возникает электрическое поле (рис. 18). Силовые линии этого поля замкнуты. Этим оно отличается от поля электростатического — там силовые линии начинались на положительных зарядах и кончались на отрицательных. Поле,

электроны вдоль стержня к его нижнему концу¹. ЭДС, возникающая в стержне, равна по определению работе, совершенной сторонними силами при переброске через стержень единичного заряда. Если заряд электрона обозначить q_0 , длину стержня l , а его скорость v , то получим

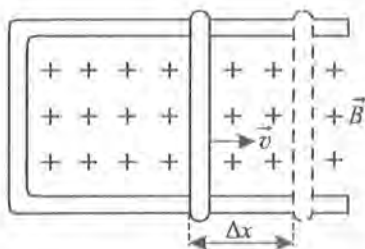


Рис. 19

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q} = \frac{F_{\text{пор}} \cdot l}{q} = \frac{q_0 v B \sin(\hat{v}\hat{B}) l}{q_0}, \quad \mathcal{E} = Blv \sin(\hat{v}\hat{B}).$$

Мы получили другую формулировку закона электромагнитной индукции. Она применима не ко всему контуру, а к его отдельным прямолинейным участкам. Чтобы найти полную ЭДС контура, надо сначала рассчитать ЭДС, возникающую в каждом его участке, а затем их просуммировать (в нашем случае ЭДС возникала только в стержне, поэтому полная ЭДС контура равна ЭДС в этом стержне).

Из последней формулы видно, что если провод скользит вдоль силовых линий ($\sin \hat{v}\hat{B} = 0$), то ЭДС в нем не возникает. Она возникает только в том случае, если провод пересекает силовые линии. *Итак, если проводник пересекает силовые линии, то в нем возникает ЭДС, равная $Blv \sin(\hat{v}\hat{B})$.*

Эта формулировка закона электромагнитной индукции принадлежит Фарадею, данная же раньше формулировка принадлежит Максвеллу (Максвелл — английский физик, был на 40 лет моложе Фарадея; наиболее знаменитые его работы посвящены углублению и развитию идей Фарадея).

¹ Точнее надо бы сказать, что вдоль стержня электроны гонит не сила Лоренца, а та ее составляющая, которая направлена вдоль стержня. Другая составляющая этой силы перпендикулярна стержню. (Электроны в стержне одновременно принимают участие в двух движениях: вместе со стержнем и вдоль стержня.)

2. Покажем, что обе формулировки (Фарадея и Максвелла) эквивалентны. Сделаем это опять-таки для частного случая контура, изображенного на рис. 19. Подставим в формулу Фарадея вместо скорости v отношение $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, где Δx — перемещение стержня за время Δt :

$$|\mathcal{E}| = Blv \sin(\hat{v}\hat{B}) = Bl \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Мы получили (с точностью до знака) формулировку Максвелла.

3. Для определения направления тока, индуцированного в движущемся проводнике, можно сначала найти направление силы Лоренца, действующей на электроны, увлекаемые проводником, а потом учесть, что за направление тока принято направление, обратное движению электронов.

Упр. 1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции по Максвеллу и по Фарадею.

Упр. 2. В однородном магнитном поле находится рамка (рис. 20). Будет ли возникать в ней ЭДС индукции, если рамку: а) двигать вдоль силовых линий (например, вправо); б) двигать перпендикулярно силовым линиям (например, вниз); в) вращать? Каждый ответ обоснуйте дважды: ссылкой на формулировку Максвелла и на формулировку Фарадея.

Упр. 3. Найдите направление индукционного тока в стержне (рис. 19), пользуясь:

- а) правилом левой руки;
- б) правилом Ленца.

Упр. 4. Действует ли сила Лоренца на положительные ионы, образующие кристаллическую решетку стержня (рис. 19)? Почему мы не учитываем эту силу?

Упр. 5. Модель генератора состоит из П-образной петли и подвижного стержня, замыкающего петлю (рис. 19).

Однородное магнитное поле B перпендикулярно плоскости петли. Стержень сопротивлением R двигают с постоянной скоростью u . Сопротивление остальных частей цепи равно нулю. Рассчитайте:

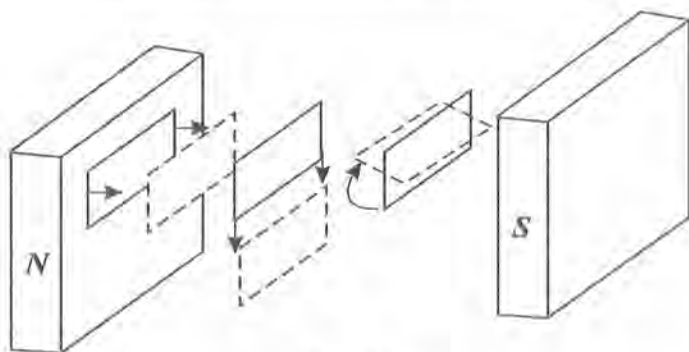


Рис. 20

- а) силу тока в цепи;
- б) количество тепла, выделившегося в цепи за время t ;
- в) силу, с которой надо тянуть перемычку, и работу этой силы за время t .

§ 10. Электромагнитное поле

1. Если внутри неподвижного витка меняется магнитное поле, то в витке, как мы выяснили, возникает электрическое поле. Величина ЭДС индукции не зависит от материала витка. Если, например, в медном витке возникла ЭДС 2 В, то и в железном возникнет 2 В, если магнитный поток в обоих случаях менялся одинаково. Это означает, что в железном и медном витках возникает одинаковое электрическое поле. Видимо, такое же поле возникло бы и в том случае, если виток был бы сделан из стекла или другого диэлектрика. Наконец, если мы мысленно выделим такой виток в вакууме, то нет оснований считать, что электрическое поле в нем будет «хуже», чем в стекле. Мы приходим к выводу, что всякое меняющееся магнитное поле создает вокруг себя вихревое электрическое поле (рис. 21). Этот вывод впервые был сделан Максвеллом

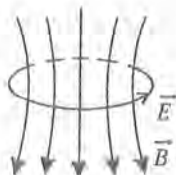


Рис. 21

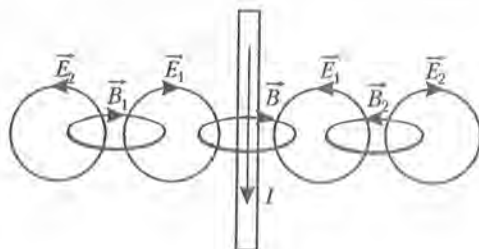


Рис. 22

(в 60-х годах XIX века) и является обобщением закона электромагнитной индукции.

2. Максвелл обратил внимание на то, что после открытия закона электромагнитной индукции Фарадея совокупность законов, описывающих электромагнитные явления, пришла в противоречие с законом сохранения заряда. Попытки устранить указанное противоречие и придать описанию электромагнитных явлений более симметричный вид привели Максвелла к гипотезе (впоследствии подтвердившейся) о существовании «обратного» закона: всякое меняющееся электрическое поле возбуждает вокруг себя поле магнитное.

Из этих двух положений следует, что поле может существовать и после того, как заряды или токи, их породившие, исчезли. В самом деле, пусть в каком-то проводе на короткое время возник, а потом исчез ток. Вокруг провода возникнет и исчезнет магнитное поле (рис. 22). Но этим дело не ограничится. Меняющееся магнитное поле создаст вокруг себя меняющееся электрическое поле, которое, в свою очередь, создаст вокруг себя магнитное поле, и т. д. Совокупность электрического и магнитного полей, где одно порождает другое, называют электромагнитным полем. Это поле убегает по всем направлениям от того места, где оно возникло, со скоростью света ($c = 300\,000$ км/с в вакууме). По мере удаления от места, где оно возникло, оно естественно убывает, однако не так быстро, как «обычное» поле, связанное с постоянными зарядами или токами.

Следует иметь в виду, что истинная картина силовых линий электромагнитного поля, возникающего вокруг провода, не совпадает с тем, что показано на рис. 22. Показанная на этом рисунке картина была бы верной, если бы поле в каждой точке порождалось только одной смежной точкой. На самом же деле поле в каждой точке есть результат наложения полей, пришедших в данную точку из разных точек. Например, на рис. 22 показано, что поле возникает и впереди, и позади данной точки. На самом же деле поле бежит только вперед. То поле, которое излучается из данной точки в обратном направлении, встречается с полем, которое пришло туда «в прямом направлении» и они гасят друг друга¹.

Упр. 1. На рис. 24 изображена схема ускорителя электронов (бетатрона), позволяющего получать электроны очень большой энергии. Между полюсами электромагнита помещена вакуумная кольцевая камера, куда могут впрыскиваться электроны. Обмотка электромагнита питается переменным током. Электроны впрыскиваются в камеру в те моменты, когда ток начинает нарастать. При этом электроны движутся по орбите постоянного радиуса,

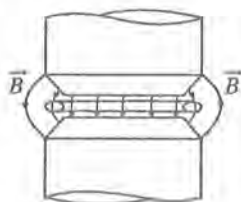


Рис. 24

¹ Тот факт, что поле бежит только вперед (от излучателя), можно пояснить такой механической аналогией. Пусть мы имеем цепочку, состоящую из шариков, связанных друг с другом пружинками (рис. 23). Если качнуть первый шарик, то его колебания начнут передаваться второму шарiku, от второго к третьему и т. д. Почему волна, вызванная колебаниями очередного шарика, побежит только вперед, а не назад? Ответ таков: хотя толчок от него получают оба соседа, результаты будут разными. Тот шарик, что был позади, колебался, и полученный им толчок приостановит эти колебания. Тот, что был впереди, поконился, и в результате толчка начнет колебаться.

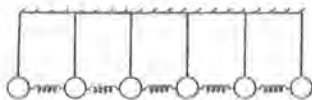


Рис. 23

непрерывно ускоряясь (пока ток в обмотках нарастает). Объясните: а) какая сила ускоряет электроны; б) почему их нельзя вырывать в те моменты, когда ток начинает убывать?

§ 11. Самоиндукция

1. Разберем один важный случай электромагнитной индукции, когда меняющееся магнитное поле, ответственное за возникновение ЭДС индукции, создается не «чужими» магнитами или катушками, а «своей же» катушкой. Рассмотрим катушку, подключенную к источнику тока (рис. 25), и пусть возле нее нет ни магнитов, ни других катушек. Если ток в этой катушке менять, например, размыкать и замыкать рубильник, соединяющий ее с источником тока, то магнитное поле внутри и вне катушки будет меняться. Но если магнитный поток внутри катушки меняется, то в катушке возникает ЭДС индукции. *ЭДС, порождаемая изменением собственного магнитного поля катушки, называется ЭДС самоиндукции, а само это явление (появление ЭДС вследствие изменения собственного поля) — самоиндукцией.*

2. Если в катушке возникает ЭДС самоиндукции, то ток в ней уже нельзя рассчитывать по формуле Ома для пассивного участка. Надо учесть, что, кроме приложенного извне напряжения U , в цепи действует еще ЭДС самоиндукции \mathcal{E} .

В этом более общем случае $I = \frac{U + \mathcal{E}}{R}$,

где I — ток, протекающий через катушку в данный момент времени, U — напряжение, приложенное извне, а \mathcal{E} — ЭДС самоиндукции в тот же момент времени (знак ЭДС самоиндукции, как мы увидим дальше, часто противоположен знаку внешнего напряжения).

3. Даже не делая точных расчетов, легко выяснить в общих чертах, как влияет ЭДС самоиндукции на величину тока в цепи. Тут можно различать три случая:

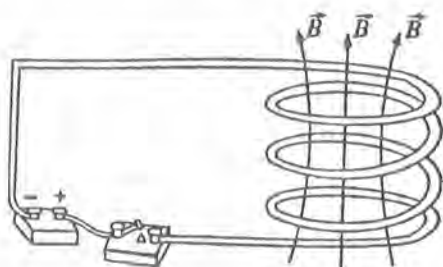


Рис. 25

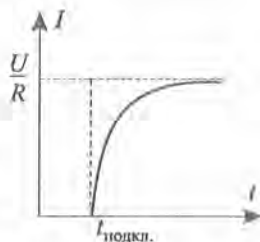


Рис. 26

а) если ток в цепи постоянный, то ЭДС самоиндукции в цепи не возникает и ток в цепи можно рассчитывать по формуле Ома для пассивного участка;

б) если ток растет, то из правила Ленца следует, что ЭДС самоиндукции будет мешать нарастанию тока. Поэтому после подключения катушки к источнику тока ток не сразу достигает значения $I = \frac{U}{R}$, а нарастает постепенно. График тока

имеет вид, показанный на рис. 26 (пунктиром показано, как нарастал бы ток, если бы ЭДС самоиндукции не возникла).

Особенно наглядно можно наблюдать это явление, включая одновременно две параллельно соединенные лампочки, одна из которых включена через резистор, другая — через катушку с железным сердечником (резистор нужен для того, чтобы уравнивать накал обеих ламп) (рис. 27). Первая лампочка загорается сразу после замыкания рубильника, вторая — с заметным опозданием. Объясняется это тем, что резистор создает очень слабое магнитное поле и ЭДС самоиндукции в нем почти не возникает; в катушке же возникает сильное магнитное поле, а стало быть, и большая ЭДС самоиндукции;

в) если ток уменьшается, то ЭДС самоиндукции согласно правилу Ленца будет поддерживать ток в прежнем направлении, мешая ему уменьшаться. Поэтому после отключения источника ток в катушке некоторое время будет

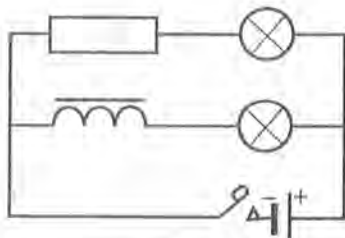


Рис. 27

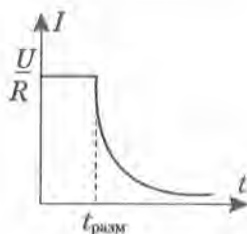


Рис. 28

продолжаться, если только цепь катушки осталась замкнутой (например, как в схеме с двумя лампочками, изображенной на рис. 27). График тока в катушке выглядит в этом случае так, как показано на рис. 28. Если же «запасного пути» нет, то после размыкания рубильника через него может проскочить искра, если ЭДС самоиндукции достаточно велика, чтобы осуществить пробой воздуха.

Упр. 1. Каково направление тока в катушке и в резисторе на рис. 27: а) после замыкания рубильника; б) после размыкания рубильника?

§ 12. Индуктивность

1. Про такую катушку, где возникает большая ЭДС самоиндукции, говорят, что она обладает большой индуктивностью. Определим это понятие более точно. Пусть катушка состоит из N витков, расположенных так тесно, что каждый виток пронизывается не только собственным магнитным полем, но и полями всех остальных витков. Результирующий магнитный поток, пронизывающий катушку, обозначим Φ . Тогда индуктивность L катушки по определению:

$$L = \frac{N\Phi}{I}.$$

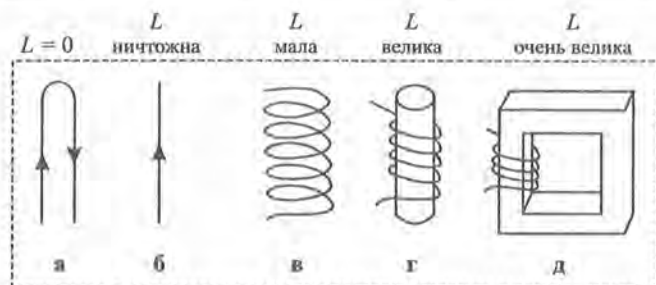


Рис. 29

Теперь рассчитаем, какая ЭДС возникнет в катушке, если ток в ней меняется со скоростью $\frac{\Delta I}{\Delta t}$. ЭДС, возникающая в

каждом витке, равна $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, а суммарная ЭДС всех N витков

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{N}{\Delta t} (\Phi_2 - \Phi_1) = -\frac{N}{\Delta t} \left(\frac{LI_2}{N} - \frac{LI_1}{N} \right) = -\frac{L(I_2 - I_1)}{\Delta t},$$

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Определение индуктивности дается на основе именно этой формулы. Таким образом, *индуктивность катушки измеряется той ЭДС самоиндукции, которая возникает в ней, когда скорость изменения тока равна единице*. Это определение оставляют в силе в том случае, когда витки катушки не расположены тесно. Другими словами, последняя формула справедлива для любой катушки. Единица индуктивности в СИ носит название *генри*. *Один генри — индуктивность такой катушки, где при скорости изменения тока 1 А в 1 с возникает ЭДС самоиндукции в 1 В*.

2. Индуктивность катушки зависит от числа витков в ней, от наличия железного сердечника и от других данных. На рис. 29 показано, как зависит индуктивность проводника от его формы и от наличия сердечника.

Упр. 1. Можно ли намотать катушку, состоящую из многих тесно расположенных витков, так, чтобы ее индуктивность практически равнялась нулю?

О т в е т: Можно.

Упр. 2. Как изменится индуктивность витка (например прямоугольного), если увеличить его площадь?

Упр. 3. Во сколько раз увеличится индуктивность катушки, состоящей из нескольких тесно расположенных витков, если число витков удвоить? Обоснуйте ответ ссылкой на каждую из двух формул, приведенных в этом параграфе.

Упр. 4. Цепь состоит из батарейки, лампочки и катушки с железным сердечником. Увеличится или уменьшится ток в лампочке, если выдвигать сердечник из катушки?

§ 13. Энергия магнитного поля

1. Мы видели, что вследствие возникновения ЭДС самоиндукции ток в цепи может продолжаться и после того, как источник выключен. Возникает вопрос: откуда бралась энергия, необходимая для поддержания тока? Эта энергия, как показали исследования, хранилась в магнитном поле катушки. Величина этой энергии, как показывает расчет, выражается формулой:

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

2. Поясним, как сделать этот расчет. Когда после замыкания рубильника по цепи протекает ток (рис. 27 и 28), сторонние силы (силы, с которыми вихревое электрическое поле действует на электроны) совершают определенную работу. Рассчитаем величину этой работы. Из определения ЭДС ($\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$) следует, что при перемещении по катушке заряда Δq сторонние силы совершают работу $\Delta A = \mathcal{E} \Delta q = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} I \Delta t = -L I \Delta I$. Полная работа, совершенная этими си-

лами, когда ток менялся от I до нуля, $A = - \int_I^0 LI dI = \frac{LI^2}{2}$. Эта

работа совершалась за счет энергии магнитного поля, значит $\Delta W = A$.

§ 14. Аналогия с механическими явлениями

Катушки с большой индуктивностью играют в электрических цепях такую же роль, как маховики с большой массой в механических устройствах. Когда неподвижный маховик «подключают» к источнику энергии, например, когда рукой начинают разгонять маховик, то вначале рука расходует энергию не только на преодоление трения, но и на увеличение кинетической энергии маховика. За счет накопленной энергии маховик может некоторое время вращаться «сам», отдавая накопленную энергию в виде топлива. Аналогично при нарастании тока часть энергии источника расходуется на создание магнитного поля катушки, а после выключения источника за счет этой энергии может выделяться тепло.

Маховики в машинах могут служить копилками лишней энергии, сглаживая толчки (например, при работе двигателя внутреннего сгорания). В момент толчка маховик поглощает энергию и возвращает ее валу, когда приток энергии падает. Подобно этому, катушки с большой индуктивностью, включенные последовательно в цепь, где ток пульсирует, сглаживают толчки тока, то поглощая избыточную энергию, то возвращая ее обратно в цепь.

Подобно тому, как действие маховика можно объяснять без ссылки на законы сохранения энергии (а ссылкой на законы Ньютона), действие катушки можно объяснять без ссылки на закон сохранения энергии (а ссылкой на законы электромагнетизма). Когда ток возрастает, ЭДС самоиндукции мешает росту тока. Когда ток уменьшается, ЭДС самоиндукции не дает току резко падать. Поэтому ток при наличии катушки нарастает и падает более плавно, чем без нее.

Сумма энергий электрического и магнитного полей сохраняется неизменной, если отсутствуют потери энергии.

Упр. 1. Напишите в трех разных вариантах выражение для энергии электрического поля конденсатора.

§ 16. Период свободных колебаний

1. Периодом T называют время, за которое совершается одно полное колебание.

Можно дать другое определение: период — это наименьший промежуток времени, после которого колеблющаяся величина повторяет свои значения в той же последовательности. Число колебаний за единицу времени называют частотой

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

Наибольшее значение колеблющейся величины (ее абсолютное значение) называют амплитудой. Период измеряют в секундах, частоту в герцах (один герц соответствует одному периоду в секунду), амплитуду — в тех единицах, в которых измеряется колеблющаяся величина (в метрах, в амперах, в вольтах, в кулонах и т. д.).

2. В разных контурах периоды свободных колебаний получаются разными. Это происходит потому, что у них разные емкости и индуктивности. Чем больше емкость конденсатора, тем больше надо времени, чтобы зарядить его и разрядить. Чем больше индуктивность катушки, тем медленнее нарастает и убывает ток в контуре. Значит, с увеличением емкости и индуктивности период свободных колебаний возрастает. Расчет показывает, что

$$T = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (\text{формула Томсона})$$

3. Менять период свободных колебаний контура можно двумя способами: меняя индуктивность катушки или меняя емкость конденсатора. Оба эти способа используются в контурах, применяемых в радиоустройствах.

Упр. 1. Как изменится период свободных колебаний контура, если: а) сблизить пластины конденсатора; б) увеличить их площадь; в) заменить диэлектрик: воздух — слюдой?

Упр. 2. Какой контур имеет меньшие размеры: низкочастотный или высокочастотный?

Упр. 3. Частота свободных колебаний в контуре равна 300 кГц. Емкость переменного конденсатора контура равна 80 нФ. На сколько увеличили его емкость, если частота стала равной 150 кГц? Чему равна емкость второго конденсатора? Решите эту задачу: а) устно; б) письменно.

О т в е т: на 240 нФ.

§ 17. Вывод уравнения колебаний

1. Из простых соображений мы установили, что в контуре могут возникнуть свободные электромагнитные колебания. Чтобы найти уравнение этих колебаний (например, зависимость q или I от времени), можно использовать закон сохранения энергии. Если потери в контуре отсутствуют, то сумма энергии магнитного и электрического полей сохраняется неизменной в любой момент времени:

$$\frac{LI^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = W.$$

Продифференцировав обе части равенства, имеем

$$\frac{L}{2} 2I' + \frac{1}{2C} 2qq' = 0.$$

Учитывая, что производная заряда по времени есть сила тока в данный момент $q' = I$, а производная тока по времени есть вторая производная заряда по времени $I' = q''$, получаем

$$Lq'' + \frac{q}{C} = 0 \quad \text{или} \quad q'' + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Если обозначить $\frac{1}{LC}$ через ω^2 , то окончательно получим

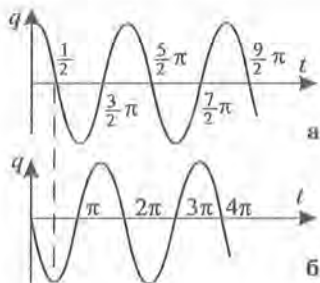


Рис. 31

$$q'' + \omega^2 q = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (2)$$

2. Мы получили уравнение, которое связывает переменную величину q (являющуюся функцией времени) с ее производной. Такое уравнение называют дифференциальным. Решение дифференциальных уравнений часто основано на догадке.

Основой для поиска функции, удовлетворяющей нашему уравнению, является тот факт, что функция и ее вторая производная пропорциональны друг другу. Таким свойством, как видно из таблицы производных, обладают синус и косинус (а также показательная функция).

Легко проверить, что функция

$$q = Q_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (3)$$

где величинам Q_m и φ_0 можно придавать произвольные постоянные значения, удовлетворяет нашему уравнению. В самом деле,

$$q' = -\omega Q_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

$$q'' = -\omega^2 Q_m \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 q. \quad (5)$$

Подставляя (3) и (5) в уравнение (1), видим, что оно обращается в тождество. В курсе математики доказывается, что выражение (3) исчерпывает все возможные решения уравнения (1).

Графики уравнения (3) при $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ показаны на рис. 31.

§ 17а. Исследование полученного решения

1. Выясним, как будет меняться заряд конденсатора с течением времени, если его величина в данный момент определяется уравнением (1). Мы уже раньше из чисто качественных соображений выяснили, что заряд конденсатора будет колебаться. Покажем, что это следует и из полученного нами решения. Действительно, если время будет меняться от нуля до бесконечности, то косинус выражения $(\omega t + \varphi_0)$ будет периодически колебаться между $+1$ и -1 , стало быть, величина заряда будет колебаться между значениями $+Q_m$ и $-Q_m$.

Колебания, описываемые выражением (3), называются гармоническими. Другими словами, *гармоническими называют колебания, графиком которых является синусоида*. Выражение, стоящее под знаком косинуса, т. е. $(\omega t + \varphi_0)$, называют фазой колебаний, а φ_0 — начальной фазой. Фазу измеряют в радианах. Величина начальной фазы зависит от того, какой момент на графике $q(t)$ мы выбрали за начальный.

На горизонтальной оси графика колебаний иногда откладывают не время, а фазу колебаний (фазе 2π соответствует один период).

2. Найдем период гармонических колебаний. Если период функции равен T , это значит, что какой бы момент t мы ни выбрали, через промежуток времени T значение функции станет таким же. В нашем случае это означает, что

$$\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega(t + T) + \varphi_0) \text{ (при любом } t\text{)}.$$

С другой стороны, период косинуса равен 2π :

$$\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\pi).$$

Сравнивая правые части этих двух выражений, видим, что

$$\omega T = 2\pi, \text{ откуда } T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (6)$$

Эта формула верна для любых гармонических колебаний.

В случае контура $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

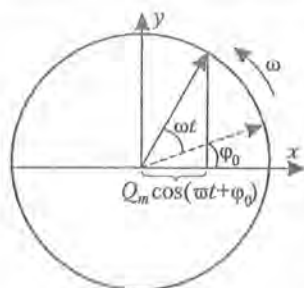


Рис. 32

3. Выражение $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

называют *угловой, или циклической частотой*. Поскольку ν обозначает число колебаний за одну секунду, циклическая частота равна числу колебаний за 2π секунд (т. е. приблизительно за 6 секунд). Измеряется она не в герцах, а в радианах в секунду (ее наименование: c^{-1} , так как радиан — величина безразмерная).

4. Имеется определенная связь между колебаниями и вращательным движением. Пусть некоторый вектор, модуль которого равен Q_m , вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω (рис. 32). Если в начальный момент угол поворота вектора относительно горизонтальной оси равен φ_0 , то в момент t он будет равен $(\omega t + \varphi_0)$. Проекция этого вектора на горизонтальную ось в момент t равна $Q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$. Таким образом, эта проекция совершает гармонические колебания. Эта связь не только позволяет наглядно толковать понятие фазы (как угол поворота того вектора, проекция которого совершает гармонические колебания) и объяснить происхождение некоторых терминов (например, «угловая частота»), но и позволяет так же просто решать многие задачи, связанные с колебаниями. Например, связь между ω и T легко установить, считая, что ω — угловая скорость вектора, а T — период его вращения. Очевидно, $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Упр. 1. Даны уравнения $q = Q_m \cos \omega t$ и $q = Q_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Считая Q_m известным, найдите в каждом из этих двух случаев значения q в моменты $t = 0, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}, T$. Полученные данные занесите в таблицу и сравните их с графиками,

показанными на рис. 31а и 31б.

У к а з а н и е. Вместо ω подставьте в уравнение $\frac{2\pi}{T}$.

Упр. 2. Максимальное значение заряда на конденсаторе контура равно 200 мКл, период колебаний $T = 12$ с, начальная фаза равна нулю. Рассчитайте заряд конденсатора в следующие моменты: $t = 0$ с, 1 с, 2 с, 3 с и т. д. вплоть до 12 с. Полученные данные занесите в таблицу и постройте по этим данным график.

О т в е т: 200 мКл, 173 мКл, 100 мКл, 0, -100 мКл и т. д.

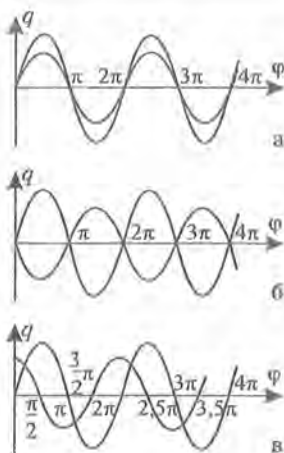


Рис. 33

Упр. 3. На рис. 33 показаны три графика для случаев, когда два колебания происходят:

- а) в одинаковых фазах;
- б) в противофазе;
- в) со сдвигом по фазе на четверть периода.

Предположим, речь идет не об электрических колебаниях, а о механических (например, ладоней рук). Расположите рядом обе ладони и изобразите колебания с указанными разностями фаз.

Упр. 4. Начертите (на глаз) графики уравнения $q = Q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, если $\varphi_0 = 0; \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3\pi}{2}$. Начертите также графики уравнения $q = Q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ при тех же значениях φ_0 .

Упр. 5. Обычно синусоиду и косинусоиду считают одной и той же кривой (отличие только в начальных фазах). Даны уравнения $x = X_m \cos\left(\omega t + \frac{3\pi}{2}\right)$ и $x = X_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$. Выразите x как функцию синуса.

О т в е т: $x = X_m \sin \omega t$.

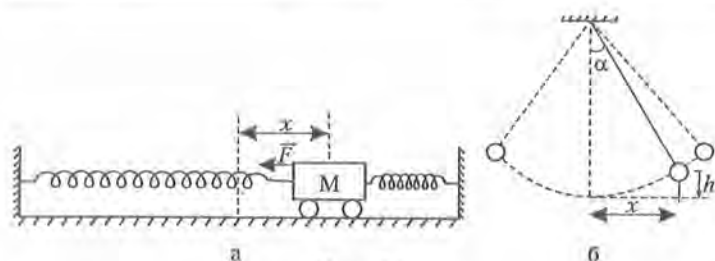


Рис. 34

Упр. 6. При отсутствии трения полная механическая энергия пружинного маятника, изображенного на рис. 34а, постоянна: $\frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = W$, где k — совместная жесткость обеих пружин. Продифференцируйте это уравнение, обозначьте $\frac{k}{m} = \omega^2$ и найдите уравнение для смещения $x(t)$. Найдите также период колебаний.

О т в е т: $x = X_m \cos(\omega t + \varphi_0)$; $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.

Упр. 7. Математический маятник отвели от положения равновесия на небольшой угол α , так что его смещение стало равным x (рис. 34б). Его потенциальная энергия

$$\begin{aligned} mgh &= mgl(1 - \cos \alpha) = mgl \cdot 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cong mgl \cdot 2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 = \\ &= mgl \cdot 2 \left(\frac{x}{2l}\right)^2 = mg \frac{x^2}{2}. \end{aligned}$$

Если трение отсутствует, то полная механическая энергия маятника постоянна и равна $\frac{mgx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = W$.

Найдите уравнение смещения $x(t)$ и период колебаний.

О т в е т: $x = X_m \cos(\omega t + \varphi_0)$; $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

§ 18. Уравнение для тока

Зная уравнение заряда (3), легко найти уравнение для тока:

$$\begin{aligned} I = q' &= -\omega Q_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -I_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \\ &= I_m \cos\left(\omega t + \varphi_2 + \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi_1).$$

Таким образом, сила тока в контуре также совершает гармонические колебания.

Упр. 1. Предположим, графики на рис. 33 означают токи, протекающие по двум параллельным ветвям. Будет ли амплитуда тока в общем проводе равна сумме амплитуд составляющих токов?

§ 19. Причины затухания свободных колебаний

Если потерь нет, то энергия электрического поля $\frac{CU_m^2}{2}$

целиком переходит в энергию магнитного поля $\frac{LI_m^2}{2}$ и обрат-

но. В этом случае амплитуда колебаний не будет убывать (колебания будут незатухающими). Свободные колебания всегда затухают, так как сопротивление контура R (его называют активным сопротивлением) нельзя сделать равным нулю. Согласно закону Джоуля—Ленца каждый период часть энергии, равная $Q = I^2 RT$, переходит в тепло (здесь I — среднее по тепловому действию значение тока). Запас энергии контура постепенно уменьшается, колебания затухают (рис. 35).

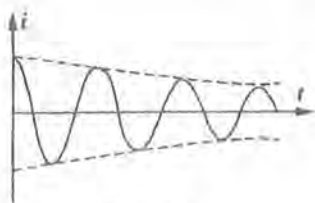


Рис. 35

Другой причиной затухания может быть излучение энергии в виде электромагнитных волн (этот вопрос будет разобран в следующей главе).

§ 20. Использование вынужденных колебаний

1. Свободные колебания всегда являются затухающими. Незатухающие колебания могут происходить лишь в том случае, если контур непрерывно получает энергию от внешнего источника. Внешний источник может создавать либо переменное напряжение, либо постоянное. В первом случае источник навязывает контуру свою частоту, поэтому эти колебания называют вынужденными. Во втором случае источник подключают не прямо к контуру (это ничего в данном случае не дало бы), а соединяют с ним с помощью специальной схемы. Возникающие в этом случае колебания называют автоколебаниями (мы займемся ими в следующей главе).

Вынужденные колебания могут происходить не только в контуре, но и в любой другой цепи, подключенной к источнику переменного напряжения. Такие колебания используются почти во всех электрических устройствах, применяемых в технике и в быту. Источником переменного напряжения служат генераторы, установленные на электростанциях. Они вырабатывают (в России и в Европе) ток частотой $\nu = 50$ Гц. Генераторы получают свою энергию от турбин, которые, в свою очередь, используют энергию топлива либо других источников.

Вынужденные колебания высокой частоты (сотни тысяч, миллионы и даже сотни миллионов герц) используются в радиоприемниках и телевизорах. Источниками этих колебаний служат радио- и телепередатчики.

2. Почему все электростанции вырабатывают переменный ток, а не постоянный? У переменного тока есть несколько преимуществ. Одно из них связано с тем, что дешевую энергию можно получать только от мощных генераторов, а мощный генератор постоянного тока построить не удастся. Другое преимущество — переменный ток легко трансформируется, а без трансформации невозможно передавать электроэнергию на большие расстояния (все это будет разъяснено дальше).

§ 21. Принцип получения переменного тока

1. Простейший генератор переменного тока может состоять из рамки, которую вращают в магнитном поле (рис. 36 и рис. 37). Магнитный поток, пронизывающий рамку, при этом меняется, поэтому в ней согласно закону электромагнитной индукции будет возникать ЭДС. Величина этой ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока

$$\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'$$

Если магнитное поле \vec{B} однородно, а угловая скорость ω рамки постоянна, то ЭДС в рамке будет синусоидальной. Для доказательства найдем выражение для ЭДС в произвольный момент t . Пусть в начальный момент нормаль к рамке составляла угол φ_0 с направлением вектора \vec{B} . Тогда к моменту t угол между этими векторами будет $(\omega t + \varphi_0)$.

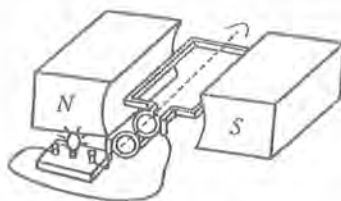


Рис. 36

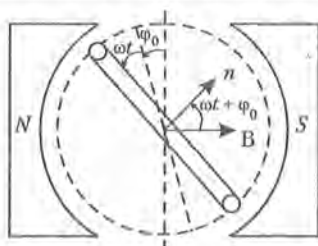


Рис. 37

Магнитный поток, пронизывающий рамку, как видно из рис. 37, будет равен $\Phi = Bs \cos(\omega t + \varphi_0)$, а ЭДС индукции $\mathcal{E} = -\dot{\Phi} = Bs\omega \sin(\omega t + \varphi_0) = \mathcal{E}_m \sin(\omega t + \varphi_0)$. Поскольку начальный момент можно выбирать произвольно, проще всего выбрать его так, чтобы $\varphi_0 = 0$, тогда $E = \mathcal{E}_m \sin \omega t$.

2. Если к генератору подключить нагрузку R , то в цепи возникнет синусоидальный ток

$$I = \frac{\mathcal{E}_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t.$$

Уравнение данной синусоиды можно, как известно, записать и «через косинус»: $I = I_m \cos \omega t$. Эти два выражения различаются только выбором «начального момента» (во втором случае начальный момент выбран на четверть периода раньше, чем в первом случае).

Упр. 1. Выведите уравнение для ЭДС генератора, пользуясь не формулировкой закона электромагнитной индукции Максвелла, а формулировкой Фарадея.

Укажите длину каждой из двух сторон рамки, которые параллельны полюсным наконечникам, а каждую из двух других сторон — $2R$. Затем докажите, что в этих боковых сторонах сила Лоренца не вызывает индукционного тока, направленного вдоль проводов, а только прижимает электроны к боковым стенкам. Таким образом, $\mathcal{E} = 2Blv \sin(\hat{v}\hat{B})$ и т. д.

Упр. 2. Определите направление индуцированного в рамке тока (рис. 37): а) по правилу Ленца; б) по правилу левой руки.

§ 22. Действующее значение переменного тока

1. Хотя сила переменного тока в цепи непрерывно меняется, его можно характеризовать одним числом. Это можно сделать разными способами. Можно характеризовать переменный ток его амплитудным значением или средним значением за полпериода (брать средний за период нет смысла, так как при любой амплитуде получится бы ноль). Однако в подавляющем большинстве случаев оказалось удобным оценивать переменный ток по его тепловому действию. Переменный ток, как и постоянный, протекая по проводнику, нагревает его. Для любого переменного тока можно подобрать такой постоянный ток, который равноценен ему по тепловому действию. Подобранный таким способом значение постоянного тока называют действующим значением данного переменного тока. Таким образом, *действующим значением данного переменного тока называют значение такого постоянного тока, который выделил за период на данном сопротивлении R столько же тепла, сколько и данный переменный ток*. Ясно, что действующее значение меньше амплитудного. Для синусоидального тока, как показывает расчет,

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

За действующее значение синусоидального напряжения принимают величину $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

2. Из определения действующего значения тока следует, что формула Джоуля—Ленца $Q = I^2 R T$ годится и для переменного тока, если под I подразумевается действующее значение тока. Это относится и к формуле мощности, потребляемой цепью переменного тока, если ток совпадает по фазе с напряжением

$$P = UI.$$

Действующие значения, как видим, оказались настолько удобными характеристиками переменного тока, что все амперметры и вольтметры переменного тока градуируют так, чтобы они

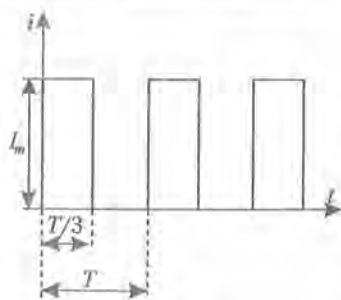


Рис. 38

(т. е. не заглавными) буквами: i , u , e . Амплитудные значения обозначают заглавными буквами со значком m : I_m , U_m , \mathcal{E}_m .

Упр. 1. Через электролитку протекает переменный ток, действующее значение которого 2 А. Объясните, что это значит.

Упр. 2. Найдите среднее (за период) и действующее значения прерывистого тока с амплитудой I_m , изображенного на рис. 38. На рисунке показано, что одну треть периода протекает постоянный ток I_m , а две трети периода ток отсутствует.

О т в е т: $I_{\text{ср}} = \frac{I_m}{3}$; $I = \frac{I_m}{3}$.

Упр. 3. Рассчитайте действующее значение синусоидального переменного тока.

У к а з а н и е. Надо решить уравнение $I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt$.

§ 23. Сопротивление цепи переменному току

1. Для цепей постоянного тока отношение

$$\frac{U}{I} = R$$

во многих случаях является величиной постоянной для данного участка, не зависящей от величины приложенного напряже-

показывали действующие значения тока и напряжения. Если без оговорок говорят о величине переменного тока или напряжения (например, $I = 2$ А, $U = 220$ В), то имеют в виду их действующие значения. Обозначают действующие значения большими буквами без индексов I , U , \mathcal{E} . Мгновенные значения величин обозначают строчными

ния. Это отношение назвали сопротивлением участка. Зная сопротивление участка, можно найти ток в нем:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Для переменного тока данной частоты отношение

$\frac{U}{I}$ (где U и I — действующие значения напряжения и тока)

также, как мы увидим, является постоянным. Его называют сопротивлением цепи переменному току и обозначают не R , а другой буквой, так как оно может сильно отличаться от сопротивления этого же участка постоянному току:

$$\frac{U}{I} = Z.$$

Зная сопротивление цепи, можно рассчитать силу тока в нем по формуле

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (1)$$

Эта формула называется законом Ома для переменного тока.

2. Выясним, почему одна и та же цепь представляет неодинаковое сопротивление переменному и постоянному току. Рассмотрим цепь, в которую включен конденсатор (рис. 39). Постоянный ток по такой цепи протекать не будет: диэлектрик конденсатора является разрывом цепи, как разрыв в рубильнике. Таким образом, для постоянного напряжения сопротивление такой цепи бесконечно. Но если заменить постоянное напряжение переменным, то, как показывает опыт, по цепи будет протекать ток, т. е. сопротивление ее станет конечным. Разумеется, ни в первом, ни во втором случае заряды не могут проходить сквозь диэлектрик, разделяющий пластины конденсатора. Дело тут в следующем. Когда конденсатор подключают к источнику постоянного напряжения, например, к аккумуля-



Рис. 39

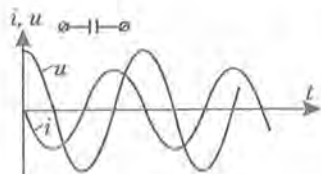


Рис. 42

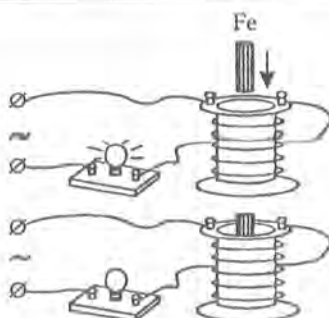


Рис. 43

Найдем теперь величину емкостного сопротивления:

$$X_C = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_m}{\omega C U_m} = \frac{1}{\omega C}.$$

4. Теперь рассмотрим цепь, содержащую катушку с заметной индуктивностью. Опыт показывает, что и в этом случае сопротивление цепи постоянному и переменному току будет различным: сопротивление переменному току будет больше. Если увеличить индуктивность катушки, надев ее на железный сердечник, то ее сопротивление переменному току резко возрастет (рис. 43), сопротивление же постоянному току никак при этом не изменится.

Объясняется это различие тем, что при протекании переменного тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции (не возникающая в случае постоянного тока)

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Величина тока в данный момент зависит не только от того, какое напряжение приложено в данный момент извне, но и от того, какая ЭДС самоиндукции возникла в катушке

$$i = \frac{u + \mathcal{E}}{R}. \quad (5)$$

Если, к примеру, мгновенное значение напряжения $u = 220$ В, ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = -195$ В, а сопротивление катушки постоянному току $R = 2$ Ом, то ток в данный момент будет не 100 А (как это было бы, если бы напряжение 200 В оставалось постоянным), а 2,5 А.

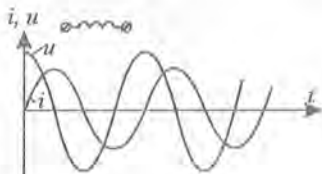


Рис. 44

При нарастании тока ЭДС самоиндукции, согласно правилу Ленца, мешает этому нарастанию. Хотя потом она мешает спаду тока, все же при нарастании она успевает сделать свое «злое дело», и ток не достигает той амплитуды, какой он достиг бы при отсутствии самоиндукции. Даже в том случае, когда сопротивление катушки постоянному току будет равно нулю, ток при переменном напряжении не будет бесконечным. Он не успеет достигнуть большой амплитуды, так как каждые полпериода он меняет свое направление. Расчет (его из-за громоздкости мы не будем делать) показывает, что индуктивное сопротивление катушки переменному току равно

$$X_L = \omega L. \quad (6)$$

Если сопротивление катушки R постоянному току равно нулю, то $Z = X_L$. В цепи, обладающей только индуктивным сопротивлением, ток отстает по фазе от приложенного напряжения на четверть периода (рис. 44).

5. Теперь рассмотрим цепь, в которой нет ни катушек, ни конденсаторов. Про такую цепь говорят, что она обладает чисто активным сопротивлением R . Поскольку в такой цепи не возникает ни ЭДС самоиндукции, ни скопившихся на обкладках конденсатора зарядов, ток в такой цепи в любой момент пропорционален приложенному извне напряжению

$$i = \frac{u}{R}. \quad (7)$$

В тот момент, когда напряжение падает до нуля, ток в такой цепи также падает до нуля; когда напряжение максималь-

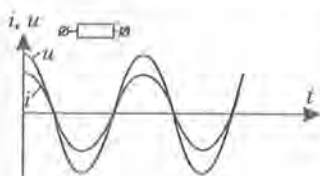


Рис. 45

но, то и ток будет максимальным. Таким образом, в цепи, обладающей только активным сопротивлением, ток и напряжение находятся в одинаковой фазе (рис. 45).

Применяв формулу (7) к максимальному значению напряжения, получим $I_m = \frac{U_m}{R}$;

деля обе части этого выражения на $\sqrt{2}$, получим формулу для действующих значений

$$I = \frac{U}{R}. \quad (8)$$

Таким образом, к цепи переменного тока, обладающей только активным сопротивлением, закон Ома применим (для действующих значений тока и напряжения) точно в таком же виде, как и для постоянного тока. Величина сопротивления в обоих случаях остается, как это видно из формулы (8), одинаковой.

Более строгое определение термина «активное сопротивление» таково: это такое сопротивление, где происходит безвозвратная потеря электромагнитной энергии, например, если она переходит в теплоту. Величина активного сопротивления определяется формулой $P = I^2 R$, где P — поглощенная безвозвратно мощность¹. Идеальная катушка и идеальный кон-

¹ В некоторых случаях активное сопротивление не совпадает с сопротивлением цепи постоянному току. Во-первых, это относится к конденсатору: у идеального конденсатора активное сопротивление отсутствует, тогда как его сопротивление постоянному току бесконечно. Во-вторых, при высоких частотах ток протекает не по всему сечению провода, а только по его поверхностному слою (для медного провода при частоте 100 Гц толщина этого слоя 7 мм, при 10 000 Гц — 0,7 мм, при 1 000 000 Гц — 0,07 мм и т. д.). Это ведет к уменьшению рабочего сечения, а следовательно, к увеличению активного сопротивления проводника. В-третьих, если в идеальную катушку вставить сердечник, то в нем возникнут вихревые токи и

денсатор не обладают активным сопротивлением. Они играют роль кошилок энергии, то отбирая ее от источника (или от других частей цепи), то возвращая ее обратно.

6. Если цепь состоит из последовательно соединенных участков с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением (рис. 46а), то полное сопротивление цепи, как показывает расчет, выражается формулой

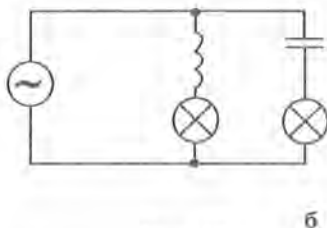
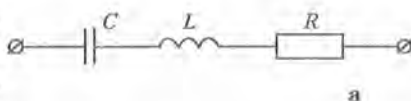


Рис. 46

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (9)$$

При этом ток будет сдвинут по фазе относительно приложенного к цепи напряжения на некоторый угол.

Упр. 1. Конденсатор емкостью 1 мкФ включен в цепь переменного тока частотой: а) 50 Гц; б) 50 000 Гц. Каково емкостное сопротивление в первом и втором случаях? Какой ток возникнет в этой цепи, если напряжение сети 220 В?

Упр. 2. К источнику переменного напряжения подключены параллельно две лампы (рис. 46б). Последовательно с первой включена катушка индуктивности, а со второй — конденсатор. Как будет меняться накал каждой из ламп, если постепенно увеличивать частоту вырабатываемого генератором напряжения, оставляя неизменным его амплитуду?

будет выделяться тепло. Катушка будет безвозвратно поглощать некоторую мощность P , значит, будет обладать активным сопротивлением

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

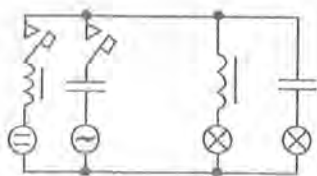


Рис. 47

Индикаторами (т. е. «отметчиками») сигналов служат две неоновые лампочки.

Разберите, как замыкается цепь тока при замыкании ключа 1 и ключа 2, и объясните назначение каждого конденсатора и каждой катушки.

Упр. 3. На рис. 47 изображена схема, с помощью которой по линии *AB* можно одновременно передавать две телеграммы. Один «канал» используется для передачи сигналов от генератора постоянного тока, другой — переменного.

§ 24. Колебания энергии в цепи переменного тока

Рассмотрим снова цепь, состоящую из конденсатора и катушки, подключенную к источнику переменного напряжения. Кроме того, в цепи может быть активное сопротивление (рис. 48). Конденсатор и катушку можно рассматривать как кошелки энергии. Они то запасают энергию в форме энергии электрического и магнитного поля, то полностью (если активное сопротивление конденсатора и катушки отсутствует)

отдают ее обратно. Если $\frac{CU_m^2}{2}$ не равно $\frac{LI_m^2}{2}$, то только

часть запасенной энергии участвует во взаимном обмене между конденсатором и катушкой, а весь избыток энергии отдается активному участку (и расходуется там) и генератору (в эти моменты генератор работает как мотор). Если же максимальная энергия катушки такая же, как у конденсатора, то они попросту будут обмениваться ею. В цепи возникнут как бы свободные колебания. Роль генератора сведется к тому, что он будет компенсировать потери энергии в активном сопротивлении: $Q = I^2 R t$.

Этот случай стоит рассмотреть подробнее.

§ 25. Электрический резонанс

1. Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных катушки, конденсатора и резистора. Пусть к концам цепи подключен генератор переменного напряжения (рис. 48), частоту которого можно менять, не меняя его амплитуды¹. В этой цепи происходят вынужденные электромагнитные колебания. Выясним, какова должна быть частота генератора, чтобы максимальная энергия катушки была бы такой же, как у конденсатора.

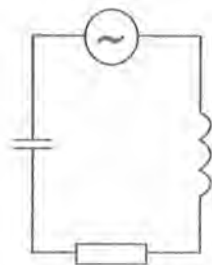


Рис. 48

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \rightarrow \frac{CU_m^2}{2} = \frac{L}{2} \left(\frac{U_m}{\omega L} \right)^2 \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Таким образом, это произойдет тогда, когда частота генератора совпадает с собственной частотой контура $\omega = \omega_0$. (Этот результат можно было предугадать, поскольку условие равенства $\frac{CU_m^2}{2}$ и $\frac{LI_m^2}{2}$ есть одновременно условие, без которого не могли бы совершаться свободные колебания.)

2. Величина тока в цепи при $\omega = \omega_0$ больше, чем при любой другой частоте ω . Это видно из формулы закона Ома:

$$Z = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Ток будет максимальным, если $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0$, т. е. когда $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$. При сдвиге частоты генератора относи-

¹ Такие «генераторы сигналов» имеются в каждой радиомастерской.

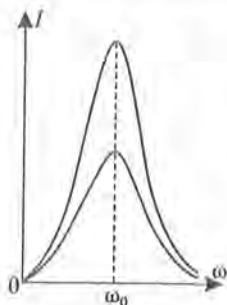


Рис. 49

тельно резонансной как в сторону увеличения, так и уменьшения, ток в цепи резко уменьшается (если $\omega \rightarrow 0$ или $\omega \rightarrow \infty$, то знаменатель в выражении для I стремится к бесконечности, а сила тока — к нулю). График зависимости силы тока от частоты внешнего источника (при неизменном U) показан на рис. 49. Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний в результате совпадения частоты внешнего воздействия с собственной частотой данной системы называется ре-

зонансом. График зависимости I от ω (рис. 49) называется *кривой резонанса*.

3. Причину возрастания тока при электрическом резонансе проще всего понять, сравнив его с механическим резонансом. Если раскачивать качели в такт с их собственными колебаниями, то с каждым толчком амплитуда будет возрастать (и только наличие вредных сопротивлений или особенность конструкции качелей не дает амплитуде возрастать до бесконечности). Если же частота внешних толчков не совпадает с собственной частотой, то внешние толчки будут то поддерживать колебания, то, наоборот, гасить их. Сходные явления наблюдаются и при электрическом резонансе.

После включения источника амплитуда колебаний тока в цепи не сразу достигает своего максимального значения, а некоторое время (десятки и сотни периодов, а иногда и больше) длится «раскачка».

4. Как изменится вид резонансной кривой, если активное сопротивление контура увеличить, например, вдвое? Из формулы видно, что при резонансной частоте ток уменьшится вдвое. В далеких от резонанса точках ток практически не

изменится (так как в этих точках $R \ll \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2$, поэто-

му изменение R почти не повлияет на изменение Z).

В целом кривая станет более «тупой» (показано на рис. 49 пунктиром).

5. Во избежание путаницы заметим, что мы разобрали случай, когда катушка с конденсатором включены последовательно. Этот резонанс называют последовательным или резонансом напряжений. Последнее название объясняется тем, что обычно $\omega L \gg R$, поэтому напряжение на катушке (и на конденсаторе) во много раз больше приложенного извне напряжения:

$I\omega L \gg IR$. Часто конденсатор с катушкой включают параллельно (рис. 50). В этом случае возникает (при $\omega = \omega_0$) параллельный резонанс или резонанс токов. Напряжение на катушке или на конденсаторе здесь равно напряжению источника, зато ток в контуре может во много раз превосходить ток в общей цепи. При резонансе в параллельном контуре (как и в последовательном) происходят как бы свободные колебания, и при отсутствии активного сопротивления ток в общем проводе вообще отсутствовал бы.

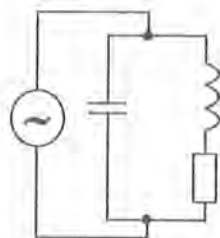


Рис. 50

Упр. 1. Сколько тепла выделяется в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки, конденсатора и активного сопротивления R , за 10 с, если ток равен 2 А, а $R = 20$ Ом?

Решение. Идеальная катушка и идеальный конденсатор являются копилками энергии — всю подведенную к ним энергию они возвращают обратно. Единственным потребителем, который безвозвратно потребляет энергию, является активное сопротивление: $Q = I^2 R t = 800$ Дж.

Упр. 2. Какие величины откладываются на осях кривой резонанса в случае механического и электрического резонанса?

Упр. 3. Пусть ток в каждой ветви параллельного контура (рис. 50) равен 10 А. Как могло получиться, что ток в общем проводе равен нулю (а не 20 А)?

Упр. 4. Предположим, вольтметр, подключенный к катушке (рис. 48), показывает 100 В, подключенный к конден-

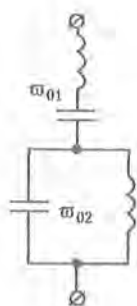


Рис. 51

сатору — тоже 100 В, а к активному сопротивлению — 10 В. Как же могло получиться, что суммарное напряжение цепи равно 10 В (ведь $100 + 100 + 10 = 210$ В)?

Упр. 5. Каково общее сопротивление Z контура при резонансе: очень большое или очень маленькое (например, при $R \rightarrow 0$)? Разобрать отдельно случай последовательного и параллельного резонанса.

Упр. 6. Попробуйте объяснить, почему в схеме, изображенной на рис. 51, нижний контур называют фильтром-пробкой, а верхний — фильтром-дыркой ($\omega_0 = \omega_{01} = \omega_{02}$).

Упр. 7. Как изменится сопротивление каждого контура из предыдущей задачи, если $\omega \gg \omega_0$, и $\omega_0 \ll \omega_0$?

§ 26. Использование электрического резонанса

1. Резонанс в электрической цепи (если его наступление не было предусмотрено) может привести к аварии, так как напряжение на отдельных участках может стать во много раз больше напряжения источника, а ток — во много раз больше нормального. Если цепь не была заранее рассчитана на такие перегрузки, то может произойти пробой изоляции и перегрев проводов.

2. Исключительно широко используется резонанс в технике связи. Используя резонанс, можно по одной паре проводов одновременно передавать множество телеграмм. На рис. 51а показана возможная схема для одновременной передачи двух телеграфных сигналов. При замыкании ключа № 1 к линии передачи подключается генератор, вырабатывающий ток одной частоты (например, $\nu_1 = 30\,000$ Гц), а при замыкании ключа № 2 — другой частоты ($\nu_2 = 60\,000$ Гц). Приемники сигналов изображены в виде лампочек. Лампа № 1 подключена к линии через контур с собственной частотой ν_1 , а лампа № 2 — через контур с собственной частотой ν_2 . Ясно, что при

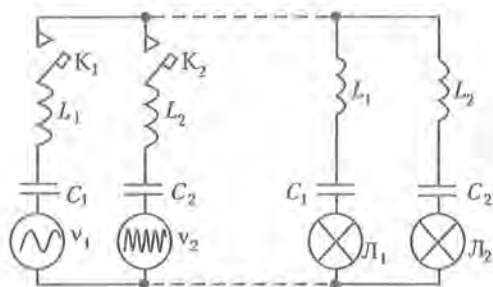


Рис. 51а

замыкании ключа № 1 будет загораться только лампа № 1, а при замыкании ключа № 2 — только лампа № 2. То же будет происходить и при одновременной работе обоих ключей. Применяемые на практике схемы многоканальной телеграфии много сложнее этой упрощенной схемы.

Еще шире используется резонанс в радиотехнике (об этом — в следующей главе).

Упр. 1. Для чего фильтры (в виде колебательных контуров) включены не только в цепь каждой лампы, но и в цепь каждого генератора (рис. 51а)?

§ 27. Производство электрической энергии

1. Всякий генератор состоит из неподвижной части — статора и вращающейся — ротора. В принципе совершенно безразлично, какая именно часть машины сделана неподвижной: магнит или обмотка. Можно неподвижным сделать магнит и вращать обмотку, как это показано было на рис. 36. Но можно сделать наоборот: обмотку закрепить неподвижно, а вращать магнит (рис. 52). По первой схеме невозможно построить мощный генератор, так как для передачи тока от вращающейся обмотки к неподвижной цепи нужно применить кольца, касающиеся неподвижных контактов, называемых

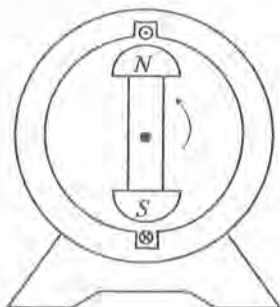


Рис. 52

щетками (рис. 36, с. 43). При высоком напряжении и большом токе между контактными кольцами и щетками возникает столь сильное искрение, что работа становится невозможной. Во втором случае контактные кольца отсутствуют, поэтому все современные генераторы переменного тока делают по этой схеме.

2. В качестве ротора генератора используют не постоянный магнит, а электромагнит. Обмотку этого электромагнита называют

обмоткой возбуждения, так как она служит для того, чтобы «возбудить» (т. е. создавать) магнитное поле. Обмотку возбуждения питают постоянным током от небольшого генератора, который устанавливается обычно на одном валу с главной машиной. Так как ток возбуждения сравнительно мал, то не представляет особых трудностей передать этот ток вращающейся обмотке возбуждения.

Ротор генератора приводится во вращение паровой или водяной турбиной. В результате вращения магнитный поток, пронизывающий каждый виток обмотки статора, меняется, и в обмотке возникает ЭДС. На рис. 52 показан только один виток обмотки, на самом же деле эта обмотка состоит из сотен и тысяч витков, размещенных по всему статору, и соединенных друг с другом по особой схеме.

3. Ясно, что генератор, построенный по второй схеме, может вырабатывать только переменный ток. Что же касается первой схемы (когда вращается рамка), то ее можно видоизменить так, чтобы ток, выходящий из щеток, протекал в одном направлении, т. е. создать генератор постоянного тока. Для этого надо вместо колец использовать вращающийся вместе с обмоткой переключатель (коллектор), касающийся щеток. Подробности мы опускаем, отметим только, что вследствие искрения коллектора мощный генератор постоянного тока построить не удастся.

§ 28. Передача электроэнергии на большие расстояния

1. Дешевую электроэнергию можно получать только на мощных электростанциях, питающих огромное число потребителей. Такая станция не может быть расположена близко от всех своих потребителей. Особенно далеко от потребителей приходится строить гидростанции, так как места, подходящие для их постройки, отстоят иногда на десятки и сотни километров от крупных городов.

В линии передачи всегда расходуется определенная энергия

$$Q = I^2 R t ,$$

где R — активное сопротивление линии. Эта энергия выделяется в виде тепла, т. е. расходуется на бесплатный обогрев воздуха вокруг линии передачи. Чем длиннее линия, тем больше теряется в ней энергии. Уменьшить эти потери, как видно из приведенной формулы, можно двумя путями. Первый путь — уменьшить сопротивление линии, применив более толстые провода. Но расчет показывает, что для снижения потерь до допустимой величины пришлось бы для длинных линий при большой величине тока брать провода непомерной толщины (диаметром более 10 метров), что практически неосуществимо.

Другой путь уменьшения потерь — уменьшить передаваемую силу тока. На первый взгляд может показаться, что это неизбежно ведет к уменьшению передаваемой мощности, но это не так. Мощность, расходуемая потребителем электроэнергии, определяется произведением двух величин: напряжения и силы тока¹

$$P = UI.$$

Например, электроплита, рассчитанная на напряжение 12 В и ток 100 А, расходует такую же мощность, как плита, расчи-

¹ Совершенно аналогично водяную мельницу заданной мощности можно построить либо на горной речке с большим напором, но тонкой струей, либо на равнинной реке с малым напором, но широкой струей.

танная на 1200 В и 1 А, так что обе такие плиты будут давать одинаковое количество тепла. Чем выше напряжение плиты (или другого потребителя), тем меньше потребляемый ею ток (при заданной мощности) и тем меньше будут потери в линии передачи.

2. *Пример.* Пусть каждую из двух плит, о которых шла речь в предыдущем абзаце, питают через линию передачи сопротивлением 1 Ом. Рассчитаем для каждого случая потери мощности в линии и необходимую мощность источника. Весь ход расчета для наглядности сведем в таблицу:

	Низковольтная установка	Высоковольтная установка
Напряжение	12 В	1200 В
Сила тока	100 А	1 А
Потери мощности IR^2	$100^2 \times 1 = 10\,000$ Вт	$1^2 \times 1 = 1$ Вт
Мощность источника	$(1200 + 10\,000)$ Вт	$(1200 + 1)$ Вт

3. Чем длиннее линия передачи, тем более высокое напряжение надо применять, чтобы избежать больших потерь. При дальних передачах приходится применять напряжение, измеряемое сотнями тысяч вольт. Но очень высокое напряжение нельзя применять ни в быту, ни в технике (во-первых, с ним крайне опасно иметь дело, во-вторых, невозможно изготовить комнатную лампу или небольшой электродвигатель, рассчитанный на сотни тысяч вольт). Поэтому на практике поступают так. По линии передают ток высокого напряжения, а в месте потребления его преобразуют в ток низкого напряжения той же мощности. Такое преобразование называют *трансформацией тока*.

Упр. 1. Ученик, рассказывая, почему выгодно применять в линиях передач высокое напряжение, написал закон Джоуля—Ленца так:

$Q = \frac{U^2}{R} t$ (где R — сопротивление линии).

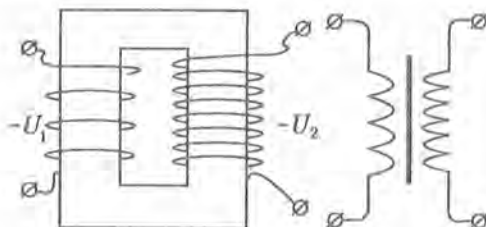


Рис. 53

Отсюда он сделал вывод, что чем выше применяемое напряжение, тем больше потери в линии. Разъясните ошибку.

Упр. 2. Не противоречит ли закону Ома тот факт, что плита, рассчитанная на большее напряжение (в нашем примере 1200 В вместо 12 В), потребляет меньший ток (1 А вместо 100 А)?

§ 29. Трансформатор

1. Для преобразования переменного тока высокого напряжения в ток низкого напряжения той же мощности (или для обратного преобразования низкого напряжения в высокое) служит прибор, называемый трансформатором. Трансформатор состоит из двух обмоток, надетых на общий железный сердечник (рис. 53). Разумеется, обмотки изготовляют из изолированного провода, чтобы витки не замыкались друг с другом или с сердечником.

Если к одной из обмоток подвести переменное напряжение (обмотку, к которой подводят напряжение, называют первичной), то в этой обмотке возникает переменный ток, и в сердечнике возникнет переменное магнитное поле. Это переменное поле будет пронизывать витки вторичной обмотки и возбуждать в ней ЭДС индукции. Напряжение, возникшее во вторичной обмотке, будет, как мы сейчас покажем, больше (или меньше) первичного во столько раз, во сколько число витков во вторичной обмотке больше (или меньше) первичного.

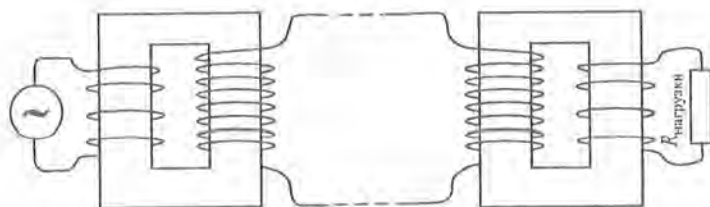


Рис. 57

приходится ставить повышающие трансформаторы, от которых напряжение направляется в линию передачи;

б) в местах потребления это напряжение поступает в понижающие трансформаторы и подается потребителям.

4. Трансформаторы применяют не только для передачи энергии на дальние расстояния. Небольшие трансформаторы применяют во многих устройствах, где требуется получить более высокое или более низкое напряжение, чем то, которое дает сеть или другой источник. Например, в каждом телевизоре имеется множество трансформаторов, с помощью которых из напряжения одной величины получают напряжение другой величины. Возможность трансформации столь простым и дешевым способом является преимуществом переменного тока перед постоянным (постоянный магнитный поток не возбуждает ЭДС индукции, поэтому трансформация постоянного тока должна осуществляться более сложными способами).

Упр. 1. Не противоречит ли закону Ома тот факт, что хотя напряжение вторичной обмотки повышающего трансформатора больше, чем первичной, сила тока во вторичной цепи меньше?

О т в е т: Не противоречит. Из закона Ома следует, что если к одной и той же нагрузке прикладывать различное напряжение, то большему напряжению будет соответствовать больший ток. В данном же случае первичное и вторичное напряжения приложены к разным нагрузкам.

Упр. 2. Если вместо переменного напряжения к трансформатору подвести постоянное напряжение такой же величины, трансформатор сгорит. Объясните, почему.

Упр. 3. Холодильник, рассчитанный на 127 В, приходится использовать в сети, где напряжение 220 В. Как выгодней его включить: через реостат, через потенциометр или через трансформатор (сравните потери энергии в каждом из этих приборов)?

Упр. 4. Трансформатор повышает напряжение частоты 50 Гц со 110 В до 220 В. Что будет, если подать на первичную обмотку такое же напряжение (110 В), но частоты 500 Гц? Правильно ли считать, что теперь магнитный поток будет меняться в 10 раз быстрее и вторичное напряжение станет в 10 раз больше? Объясните.

§ 30. Почему при возрастании вторичного тока возрастает и первичный ток

1. Если трансформатор работает холостую, т. е. если ко вторичной обмотке потребителя не подключены, то ток, потребляемый им, ничтожен. Это следует из закона сохранения энергии: мощность, потребляемая при холостом ходе, идет только на покрытие потерь (нагрев сердечника токами Фуко и нагрев обмотки), а потери составляют ничтожный процент от мощности потребителей. После включения нагрузки картина меняется. Вся потребляемая вторичной цепью энергия поступает в нее из первичной цепи, стало быть, ток, потребляемый первичной цепью, должен теперь увеличиться. Чем больше энергии потребляет вторичная цепь, тем сильнее должен возрасти этот ток.

2. Каким образом можно объяснить эти факты, не привлекая закон сохранения энергии, а ссылаясь только на законы магнитных явлений? Объяснить можно так. Индуктивность первичной обмотки очень велика. Стало быть, ее индуктивное сопротивление $Z = \omega L$ также велико. Поэтому при подаче на обмотку напряжения ток получается ничтожным.

Так будет получаться при холостом ходе. После включения нагрузки картина меняется, так как возникает вторичный ток. Когда первичный ток нарастает, нарастает и «первичный» поток. Согласно правилу Ленца вторичный ток мешает этому

нарастанию, т. е. размагничивает сердечник. Это должно привести к уменьшению индуктивного сопротивления первичной обмотки, т. е. к увеличению первичного тока.

Интересно отметить, что результирующий магнитный поток, созданный совместными действиями увеличившегося первичного тока и размагничивающим действием вторичного тока, остается таким же, каким он был при холостом ходе.

§ 31. Выпрямление переменного тока

Переменный ток имеет ряд преимуществ перед постоянным (см. § 20), поэтому на практике постоянный ток избегают применять. Однако иногда избежать этого нельзя. Постоянный ток необходим для электролиза, для зарядки аккумуляторов, для питания радиоустройств. Электродвигатели постоянного тока вплоть до конца XX века (до изобретения сложных импульсных схем управления питанием) оставались незаменимыми, например, в тех случаях, когда нагрузка и скорость вращения должны меняться в широких пределах. Поэтому в контактные сети городского электрического транспорта (трамвая, троллейбуса, метро) и значительной части железных дорог подается постоянный ток (причем даже в случае питания переменным током его преобразуют в постоянный на борту электровоза или электропоезда). Постоянный ток получают в основном двумя способами:

- а) выпрямлением переменного тока;
- б) непосредственно от генератора постоянного тока.

Первый способ применяется значительно шире, поэтому только его мы и разберем. Самой важной частью выпрямителя является устройство, пропускающее ток в одном направлении и не пропускающее его в другом. Роль такого устройства чаще всего играет полупроводниковый диод. Он представляет собой кристалл, одна область которого обладает p -проводимостью, а другая — n -проводимостью. Если p -область соединить с плюсом внешнего напряжения, а n -область с минусом, то через диод пойдет ток, если же сменить полярность внешнего напряжения, то тока практически не будет.

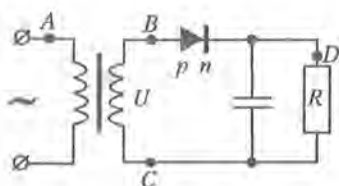


Рис. 58

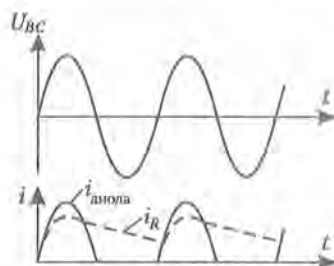


Рис. 59

На рис. 58 показана схема простейшего выпрямителя, состоящего из трансформатора, полупроводникового диода и фильтра. Кроме того, на схеме показана нагрузка R , т. е. потребитель выпрямленного тока. Трансформатор нужен, чтобы понизить (или повысить) напряжение сети до требуемой величины. На концах вторичной обмотки возникает переменное напряжение, так что на p -область подается то положительный потенциал (по отношению к n -области), то отрицательный. В первом случае через диод будет протекать ток, во втором — не будет. График протекающего через диод тока, а также график напряжения на вторичной обмотке трансформатора показаны на рис. 59. Ток, протекающий в одном направлении, но меняющийся по величине, называют пульсирующим. Чтобы сгладить пульсации, применяют сглаживающий фильтр. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Конденсатор играет роль копилки зарядов: он принимает заряды «на хранение», когда они протекают через диод (в эти моменты ток в нагрузке становится меньше, чем в неразветвленной части цепи), и отдает накопленные заряды в те моменты, когда приток зарядов прекращается. В результате ток нагрузки R становится близким к постоянному (на рис. 59 показано пунктиром).

Упр. 1. Каков график тока в точках A и B (рис. 58)?

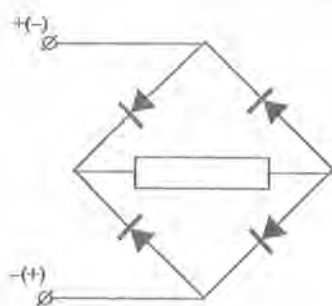


Рис. 60

Упр. 2. На рис. 60 показана так называемая мостиковая схема выпрямителя:

а) нарисуйте график тока в нагрузке;

б) перерисуйте схему в тетрадь, но нагрузку начертите вне мостика и снабдите фильтром; проставьте знаки «плюс» и «минус» на клеммах, к которым подсоединена нагрузка.

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

§ 32. Возникновение электромагнитных волн

1. Возможность существования электромагнитных волн была предсказана английским физиком Максвеллом (около 1870 г.). Это предсказание, как мы уже упоминали (§ 9), основано на двух положениях:

- а) всякое меняющееся магнитное поле возбуждает вокруг себя поле электрическое;
- б) всякое меняющееся электрическое поле возбуждает вокруг себя поле магнитное.

Первое из этих положений является обобщением закона электромагнитной индукции, второе являлось гипотезой (которая впоследствии подтвердилась).

Представим себе, что имеется прямой провод, не соединенный ни с какой цепью (например, расположенный вертикально, как показано на рис. 22). Пусть верхнюю часть провода мы зарядили положительно, а нижнюю отрицательно. В проводе возникает ток, который быстро затухнет,

Этот кратковременный ток возбуждает вокруг себя переменное магнитное поле. Это магнитное поле возбуждает вокруг себя вихревое электрическое поле, которое, в свою очередь, возбуждает вокруг себя вихревое магнитное поле, и т. д. (рис. 22). Позади данной точки происходит наложение «только что» созданного поля с тем полем, что было там раньше. При этом результирующее поле позади данной точки обращается в нуль. В результате убегающее по всем направлениям от излучателя поле остается только в слое некоторой толщины ΔR (рис. 61). (Мы считали, что R во много раз больше длины излучателя, так что излучатель можно считать точкой.) До точек, расположенных от излучателя дальше, чем $(R + \Delta R)$, электромагнитное возмущение еще не успело прийти, а в точках, расположенных ближе R , оно уже успело исчезнуть. Толщина слоя ΔR будет оставаться постоянной, так как передняя и задняя поверхности слоя удаляются от излучателя с одинаковой скоростью¹.

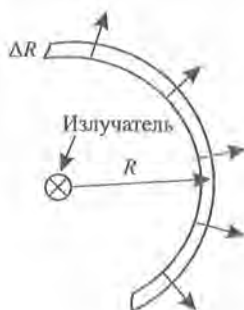


Рис. 61

2. Электромагнитное поле отличается от статических полей, окружающих неподвижные заряды или постоянные токи, такими особенностями:

а) оно может существовать независимо от зарядов или токов;

б) оно движется по всем направлениям от того места, где оно возникло. В вакууме эта скорость равна скорости света ($c = 300\,000$ км/с);

в) силовые линии как магнитной, так и электрической составляющей этого поля замкнуты (тогда как статическое электрическое поле не является вихревым);

¹ Тот факт, что излучение распространяется в форме сферического слоя, вовсе не означает, что плотность энергии в этом слое одинакова по всем направлениям. Прямой вертикальный провод дает максимум излучения в «экваториальной» области и совершенно не излучает вдоль своей оси.

г) значения векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитного поля при удалении от «источника» убывают не так быстро, как убывает поле неподвижных зарядов и постоянных токов¹.

§ 33. Поток излучения и плотность потока излучения

В каждом объеме, в котором имеется электрическое или магнитное поле, сосредоточена определенная энергия. Таким образом, электромагнитное поле несет с собой определенную энергию. Если мысленно вырезать из сферы, центром которой является излучатель, некоторую поверхность, то окажется, что через эту поверхность прошла определенная энергия. *Энергия, прошедшая через данную поверхность за единицу времени (или поглощенная ею за это время), называется потоком излучения через данную поверхность.* Эта величина измеряется в ваттах. Если поделить величину потока излучения на площадь соответствующей поверхности, получим плотность потока излучения.

Легко понять, что по мере удаления от источника плотность потока излучения постепенно уменьшается, так как одна и та же энергия расплывается по все большему пространству. Если радиус сферы, через которую проходит поле, удвоится, то площадь, через которую пройдет та же энергия, увеличится в 4 раза (рис. 62), так что плотность излучения в 4 раза уменьшится. Таким образом, при отсутствии поглощения энергии плотность потока излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния до излучателя.

¹ Это можно пояснить такой грубой аналогией. Предположим, что прилегающий к Земле слой атмосферы, например, толщиной 10 км оторвался от Земли. Если все части этого слоя удаляются с одинаковой скоростью, то толщина слоя будет оставаться постоянной, а плотность воздуха в этом слое будет убывать по мере удаления от Земли. Все же на большом расстоянии от Земли (например, миллион километров) плотность воздуха в этом слое (в тот момент, когда он проходит это место) будет больше, чем если бы из той же массы воздуха образовали сплошную сферическую атмосферу, навсегда привязанную к Земле.

Упр. 1. Через поверхность 5 м^2 прошла за 2 мкс энергия 20 мкДж . Каков был поток излучения через данную поверхность и какова была плотность этого потока?

Ответ: 10 Вт , 2 Вт/м^2 .

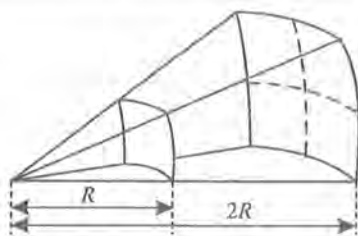


Рис. 62

§ 34. Длина электромагнитной волны. Разбивка на диапазоны

1. Если возбудить в излучателе кратковременный ток, то электромагнитное поле будет удалиться от него во все стороны, образуя слой постоянной толщины наподобие одиночного всплеска от брошенного в воду камня. Если же возбудить в излучателе незатухающие колебания (для этого надо соединить его с источником высокочастотных колебаний), то он будет излучать одну порцию энергии за другой и поле вокруг него будет напоминать картину вокруг места, где непрерывно взбалтывают воду. Только вокруг излучателя колеблются не частицы воды, а векторы \vec{E} и \vec{B} . В таком периодическом поле можно ввести понятие о длине волны. Длиной волны λ называется расстояние, пробегаемое волной за один период (рис. 63). Из формулы равномерного движения следует, что

$$\lambda = cT \quad (c = 300\,000 \text{ км/с в вакууме}).$$

Кроме длины волны для характеристики волновых процессов часто используют частоту $\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$.

В каждой точке векторы \vec{E} и \vec{B} перпендикулярны друг другу и лучу (т. е. направлению распространения волны), а так как вдоль луча происходит постоянное запаздывание колебаний, то «картина» электромагнитной волны выглядит так, как показано на рис. 63. Надо помнить, что в каждой точке

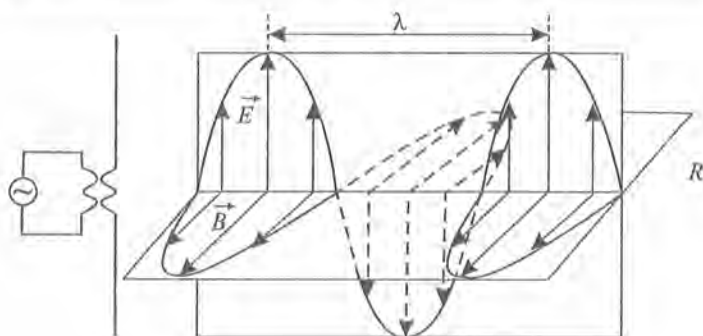


Рис. 63

векторы \vec{E} и \vec{B} непрерывно колеблются, так что на рисунке дана как бы моментальная фотография поля.

2. Волны длиной от 100 км до 1 мм используются в радиотехнике и называются радиоволнами (иногда радиоволнами называют и волны за этими пределами). Волны, примерно в тысячу раз короче миллиметра, воздействуют на наш глаз, вызывая ощущение света. Самые длинные из этих волн (760 мкм) вызывают ощущение красного света, самые короткие (400 мкм) — фиолетового. Волны длиннее красных (но короче радиоволн) называют инфракрасными, а короче фиолетовых — ультрафиолетовыми. За ультрафиолетовыми следуют рентгеновское излучение, гамма-лучи радиоактивных веществ, космическое излучение.

§ 35. Свойства радиоволн

1. В однородной среде электромагнитные волны, как и всякие другие волны, распространяются прямолинейно по всем направлениям. Скорость электромагнитных волн в вакууме одинакова для всех диапазонов: $c = 300\,000$ км/с. В других средах скорость волн меньше и зависит от частоты. В воздухе их скорость на ничтожную долю процента меньше, чем в вакууме.

2. На границе двух сред часть волн отражается, часть преломляется, т. е. проникает в другую среду, причем направление луча, вдоль которого распространяются волны, меняется.

Особенно хорошо отражаются электромагнитные волны (кроме рентгеновских и гамма-лучей) от проводников. В радиотехнике это используется для создания волноводов — металлических труб круглой или прямоугольной формы. Излучатель помещают в одном конце волновода (рис. 64). Радиоволны, многократно отражаясь от его стенок, достигают другого конца. По такому волноводу радиоволны распространяются с меньшими потерями, чем вдоль проводов, поэтому их применяют для передачи радиоволн от одних частей радиостанции к другим (например, к антенне).

Поперечник волновода нельзя делать очень малым

(меньше $\frac{\lambda}{2}$), поэтому их применяют только для сверхчастотных или сверхкоротких волн (короче 10 см).

Над поверхностью Земли, на высоте несколько десятков километров (60 км) и выше, находится проводящий слой воздуха — ионосфера. Этот слой возник под действием ультрафиолетовых и рентгеновских лучей Солнца. Эти лучи способны отрывать от молекул воздуха электроны, т. е. ионизировать воздух. Вблизи земной поверхности ионизация незначительна из-за сильного поглощения лучей в верхних слоях атмосферы, а на очень большой высоте им нечего ионизировать. Поэтому слой наибольшей ионизации расположен не очень низко и не очень высоко (на высоте 300 км). Для радиоволн ионосфера является полупроводящей средой. Ее роль мы разберем дальше.

3. Радиоволны, как всякие другие волны, способны огибать препятствия. *Способность волн огибать препятствия на-*

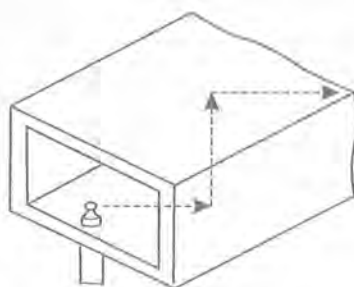


Рис. 64



Рис. 65



Рис. 66

зывают *дифракцией*. Чем больше длина волны, тем большее препятствие может она обогнуть. Длинные волны ($\lambda > 1000$ м) могут огибать любые земные препятствия, кроме самых высоких гор. Они могут даже огибать земной шар. Но расчет показал, что достигаемая на практике дальность распространения длинных волн получается в несколько раз больше той, которая должна получаться за счет дифракции (на длинных волнах удается осуществлять связь даже между «антиподами», т. е. на расстоянии 20 000 км, тогда как расчет показывает, что дифракция может обеспечить при существующих мощностях радиостанций дальность в несколько тысяч километров). Оказалось, что для длинных волн морская вода и влажная почва, с одной стороны, ионосфера — с другой, образуют гигантский волновод, позволяющий достигать такой дальности. При этом в ионосфере происходит сильное поглощение длинных волн, поэтому требуются большие мощности (сотни и даже тысячи киловатт в антенне), чтобы достигнуть предельной дальности.

На коротких волнах (100–10 м) дальность за счет дифракции невелика (несколько десятков километров). Тем не менее на коротких волнах при ничтожной мощности передатчика (десятки ватт) удавалось осуществить связь даже между антиподами. Оказалось, что короткие волны почти без потерь многократно отражаются от ионосферы и от поверхности Земли (рис. 65). Этим и объясняется особенность их распространения.

Для волн короче 10 м ионосфера прозрачна. Поэтому связь с космическими объектами (в том числе звездами) может осуществляться только на таких волнах. С другой стороны, из-за отсутствия отражения от ионосферы связь на таких

волнах может осуществляться только в пределах прямой видимости (рис. 66). На метровых и дециметровых волнах работает телевидение, и хотя антенны телевизионных станций устанавливаются на высоких башнях, обычно они не настолько высоки, чтобы обеспечить уверенный прием на расстоянии свыше 100 км. Для увеличения дальности телепередач используют ретрансляторы — наземные или спутниковые.

4. Волны могут налагаться друг на друга, причем это наложение никак не мешает каждой волне двигаться «восвояси» дальше (рис. 67). Наложение двух волн одинакового периода (при постоянной разности фаз) называют *интерференцией*. В точке, где происходит интерференция двух волн, колебания либо усиливаются (по сравнению с тем, что было бы при отсутствии второй волны), либо гасятся полностью или частично. Колебания усиливаются, если волны приходят в данную точку в одинаковой фазе, и гасятся, если приходят в противофазе.

Интерференцией радиоволн объясняется явление «замирания». Суть его в том, что при приеме коротковолновых дальних передач слышимость неожиданно ухудшается или полностью пропадает, а через некоторое время снова восстанавливается. Объясняется это тем, что сигнал от передатчика к приемнику может придти двумя (или даже несколькими) путями (рис. 65). Если в точке приема эти сигналы окажутся в противофазе, то слышимость может пропасть. Непостоянство приема объясняется тем, что ионосфера не является подобием железной крыши, высота и свойства которой являются постоянными. Высота ионосферы и концентрация электронов в ее слоях могут подвергаться значительным колебаниям.



Рис. 67

Возможностью интерференции волн объясняется также тот факт, что ретранслятор телепередач не должен работать на той же частоте, что и «первичный» передатчик (или соседний ретранслятор).

Упр. 1. Докажите, что дальность прямой видимости выражается формулой $R = 113(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$, где h_1 — высота приемной, а h_2 — передающей антенны (в км). Радиус Земли $r = 6400$ км. (Из-за дифракции волн и преломления их в атмосфере реальная дальность на 15% больше, чем рассчитанная по этой формуле.)

§ 36. Требования к излучателю

1. При некоторых условиях любая колебательная система возбуждает в окружающем пространстве волны, передавая им заметную долю своей энергии. Это явление называют излучением. При механических колебаниях могут возбуждаться звуковые волны, при электромагнитных — электромагнитные. Хотя природа тех и других волн совершенно различная (что проявляется в том, что звуковые волны могут возникать только в какой-либо среде, а электромагнитные — даже в идеальном вакууме), условия хорошего излучения являются во многом общими. Хороший излучатель должен удовлетворять двум требованиям: форма его должна быть такой, чтобы отдельные части не мешали друг другу излучать, а размеры не должны быть много меньше длины излучаемой волны.

Поясним первое требование на примере камертона. Одной из причин того, что камертон слабо излучает, является то, что его ножки мешают друг другу излучать. Они колеблются в противоположных фазах (рис. 68), и если одна ножка создает в точке M сгущение воздуха, то другая создает в тот же момент разрежение. В результате колебания плотности воздуха вблизи камертона будут слабыми, а вдали, естественно, еще слабей. Если окружить одну из ножек камертона картонной

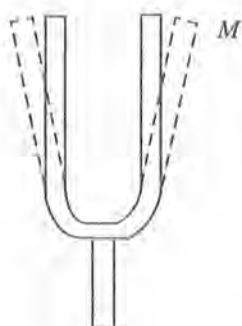


Рис. 68

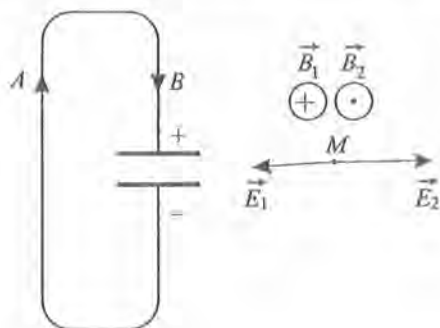


Рис. 69

трубкой, преграждающей путь звуку от этой ножки, то звук заметно усищтся.

Замегим, что если расстояние между ножками камертона велико, например, равно $\frac{\lambda}{2}$, то колебания в точке M не будут гасить друг друга. За то время, пока колебания от задней ножки дойдут до передней, их фаза изменится на полпериода, так что они окажутся в одинаковой фазе с колебаниями, созданными первой ножкой.

Второе требование также поясним на примере с излучением звука. Многие вещи можно сделать миниатюрными. Например, создан работающий электродвигатель размером меньше булавочной головки. Но создать работающий громкоговоритель размером с булавочную головку невозможно. Если мембрана такого громкоговорителя в какой-то момент сжимает воздух перед собой, то позади мембраны воздух станет разреженным. Но так как размеры мембраны ничтожны ($l \ll \lambda$), то сжатие и разрежение произойдут как бы в одной и той же точке, так что никуда не побежит ни «волна сжатия», ни «волна разрежения».

2. Рассмотрим обычный колебательный контур. Для простоты будем считать, что его катушка состоит из одного единственного витка, а конденсатор составлен из двух про-

диопередатчик. В дальнейшем мы передатчик условно будем изображать так, как показано на рис. 72.

5. Антенна, о которой тут рассказывалось, называется симметричной. Ее часто называют полуволновым вибратором. Название объясняется тем, что частота ее собственных колебаний определяется формулой $l = \frac{\lambda}{2}$, т. е. длина антенны

должна быть такой, чтобы на ней укладывалась половина длины волны. Для длинных волн размеры антенны получаются непомерно большими. В этих случаях нижнюю часть симметричной антенны откидывают, заменяя ее Землей (этот случай и изображен на рис. 72б). Электроны движутся из такой антенны в Землю и обратно. Такую антенну называют заземленной (или четвертьволновой, так как ее длина вдвое меньше, чем симметричной). Существуют и другие типы антенн. С помощью всевозможных ухищрений удастся уменьшить длину антенны (по сравнению с невыгоднейшей) примерно на порядок.

6. Иногда требуется излучать волны только в определенных направлениях. Для этого можно использовать явление интерференции: надо расположить несколько излучателей так, чтобы в определенных направлениях волны «уничтожили» друг друга, а в других — усиливали. Можно также применять отражатели волн (как в прожекторе). Во всех этих случаях размеры антенны получаются в несколько раз больше длины волны.

Упр. 1. Предположим, решили создать радиопередатчик, работающий на частоте 50 Гц. Каков должен быть размер антенны, если она сделана в виде симметричного вибратора?

§ 37. Транзисторный усилитель колебаний

1. Радиопередатчик состоит из генератора высокой частоты и антенны. Составной частью генератора является усилитель. Поэтому, а также потому, что усилители широко применяются «сами по себе» (а не только в составе генератора), сначала познакомимся с работой усилителя.

Основным усилительным элементом многих усилителей является транзистор. Транзистор типа $p-n-p$ представляет собой пластинку кремния или другого полупроводника, в котором созданы три области с различной проводимостью: средняя область с электронной, а две крайние области — с дырочной электропроводимостью. Средняя область называется базой, одна крайняя область — эмиттером, другая — коллектором. Напомним также, что если к p -области приложить от внешнего источника «плюс» по отношению к n -области, то через $p-n$ переход пойдет ток. Это направление называется прямым. При обратной полярности внешнего напряжения тока практически не будет.

На рис. 73 показана одна из возможных схем усилителя (схема с общим эмиттером). На входе усилителя включен микрофон, а на выходе — громкоговоритель. Если бы батарея B_1 не вырабатывала никакого напряжения, то ток в промежутке «эмиттер—база» отсутствовал бы. Тогда не было бы тока и в промежутке «база—коллектор», так как между этими областями включено обратное напряжение (например, 9 В). Если батарея B_1 будет создавать напряжение (например, 0,2 В), то в этой цепи возникнет ток: дырки из p -области хлынут в базу. Поскольку база сделана очень тонкой (тоньше 0,01 мм) и концентрация электронов в ней сделана небольшой,

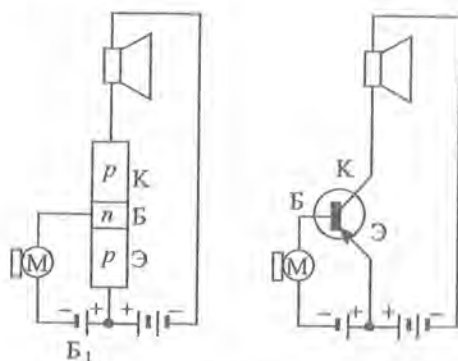


Рис. 73



Рис. 74

подавляющая часть дырок (до 99%), не успев рекомбинировать, диффундирует дальше и попадает в коллектор (при этом около 1% тока эмиттера замыкается через провод базы). В коллекторе дырки будут подхвачены полем, созданным коллекторной батареей (9 см $0,2 = 8,8$ В), и далее ток замкнется через провод коллектора. Чем больше (по абсолютной величине) напряжение, подведенное к эмиттерному переходу, тем больше дырок впрыскивается из эмиттера в коллектор и тем больше ток. Даже небольшое изменение напряжения между эмиттером и базой ведет к резкому изменению коллекторного тока.

2. Если перед микрофоном звуков нет, то на базу подается постоянное напряжение (0,2 В) и через транзистор протекает постоянный ток (левая часть графиков на рис. 74). Но пусть перед микрофоном появился звук, например, нота «ля» основной октавы ($\nu = 440$ Гц). Мембрана микрофона будет колебаться с той же частотой, и в связанной с ней катушке возникнет ЭДС индукции (чтобы легче было считать, положим, что эта ЭДС равна 0,1 В, что на два порядка больше фактической). Эта переменная ЭДС будет то складываться с напряжением эмиттерной батареи, то вычитаться из нее. Коллекторный ток начнет пульсировать с той же частотой (правая часть рис. 74в), и громкоговоритель воспроизведет звук того же тона, что прозвучал перед микрофоном. При этом колебания тока в громкоговорителе могут в десятки раз превосходить колебания тока в микрофоне. То же можно сказать и о пере-

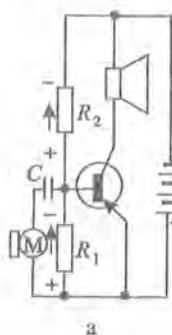
менной составляющей напряжения на громкоговорителе: она может в десятки и даже сотни раз превосходить переменную составляющую напряжения на микрофоне¹. Таким образом, мощность переменной составляющей тока в громкоговорителе («выходная мощность») может в сотни и тысячи раз превосходить мощность тока в микрофоне («входную мощность»). Разумеется, никакого противоречия с законом сохранения энергии здесь нет. Ведь громкоговоритель получает свою энергию не от микрофона, а от коллекторной батареи. Энергия, полученная от микрофона, используется только для управления коллекторным током, а для этого большой мощности не требуется.

Совершенно аналогично небольшое усилие водителя ведет к резкому изменению скорости машины. И здесь суть в том, что водитель не сам тянет машину, а только управляет мощным источником энергии. А управлять чужой энергией легче, чем самому работать.

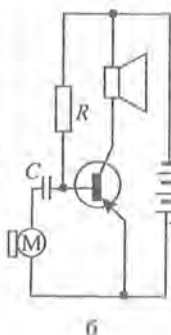
§ 38. Схема питания транзистора

1. Для питания транзисторных усилителей используют не два отдельных источника тока, а один — в цепи коллектора. Постоянное напряжение, которое надо подавать между эмиттером и базой (минусом на базу), называют напряжением смещения. Чтобы подать это смещение, используют либо потенциометр (рис. 75а), либо резистор (рис. 75б). Плечи R_1 и R_2 потенциометра подбирают так, чтобы на нижнем плече выделялось напряжение в несколько десятых долей вольта. Это напряжение подается плюсом на эмиттер и минусом на базу. Конденсатор C называют разделительным. Он препятствует замыканию постоянной составляющей тока от плюса нижнего плеча потенциометра на минус через микрофон, но не мешает переменному току, возникающему и микрофоне, замыкаться через нижнее плечо потенциометра.

¹ При анализе многих вопросов удобно представлять пульсирующий ток как сумму двух токов: постоянного и переменного и отдельно рассматривать «судьбу» каждой составляющей. То же относится и к пульсирующему напряжению.



а



б

Рис. 75

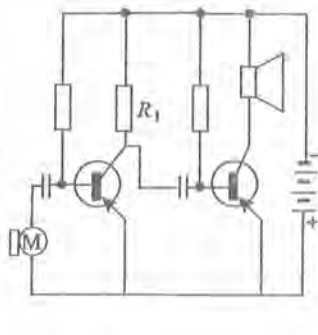


Рис. 76

В нижнем плече R_1 потенциометра складывается постоянное поле от батареи и переменное от микрофона. Результирующее поле, а следовательно, и результирующее напряжение на нижнем плече, будет пульсировать. Это пульсирующее напряжение подается на вход усилителя.

Во второй схеме вместо потенциометра используется резистор R , играющий роль реостата с постоянным сопротивлением. Поскольку через этот резистор на базу подается минус от батареи (по отношению к эмиттеру), через переход «эмиттер—база» будет протекать ток. Сопротивление R подобрано так, чтобы падение напряжения на этом переходе составило несколько десятых долей вольта.

Упр. 1. На рис. 76 показана схема двухкаскадного усилителя. Разберитесь в этой схеме и начертите ее наизусть. Почему усилитель практически не будет работать, если сопротивление резистора R_1 (нагрузки первого каскада) очень мало (например, нуль) или очень велико (бесконечно)?

Упр. 2. Начертите схему трехкаскадного усилителя.

Упр. 3. Начертите схему однокаскадного усилителя с питанием от выпрямителя, выполненного по «простой» или по мостиковой схеме.

§ 39. Пример обратной связи

Если громкоговоритель расположен далеко от микрофона, то между ними имеется только «прямая связь»: микрофон через усилитель управляет громкоговорителем. Если же их расположить рядом (рис. 77), то громкоговоритель, в свою очередь, будет воздействовать на микрофон. Это обратное воздействие и называют обратной связью. Если теперь щелкнуть по микрофону, то громкоговоритель начнет звучать, причем возникший звук будет непрерывно продолжаться и после окончания щелчка. Таким образом, усилитель превратился в генератор колебаний. Почему так произошло? Мембрана микрофона, получив первоначальный толчок, начнет колебаться. Эти колебания усилятся (за счет энергии батареи коллектора) и будут воспроизведены громкоговорителем. Звуки от громкоговорителя, попадая на микрофон, снова усилятся и т. д. В конце концов процесс нарастания колебаний прекратится, так как с увеличением амплитуды колебаний резко увеличиваются потери энергии во всей системе. Подводимая к усилителю энергия перестанет покрывать потери, и установятся колебания с постоянной амплитудой.

Начальный толчок, необходимый для того, чтобы система, как говорят, самовозбудилась, может возникнуть и без нашего участия. Им может быть любой шорох, любое дуновение и даже случайный перевес ударов хаотически движущихся молекул на одну из сторон мембраны.

Обратную связь можно осуществить и не прибегая к помощи микрофона и громкоговорителя, а «чисто электрически». Об этом будет рассказано в следующем параграфе.

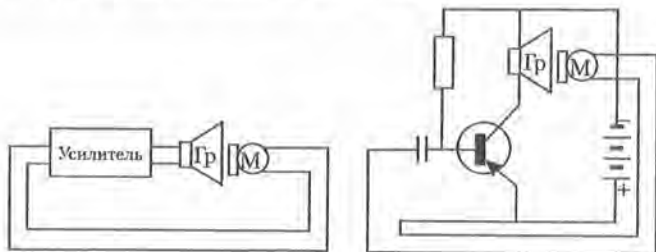


Рис. 77

§ 40. Генератор незатухающих колебаний на транзисторе

1. Устройство, вырабатывающее незатухающие колебания при отсутствии периодического внешнего воздействия, называют автоколебательной системой, а сами колебания — автоколебаниями. Примером механической автоколебательной системы являются часы (механические). Электрические автоколебательные системы широко используются в электронике, особенно там, где нужны высокие частоты. Примером такой системы является генератор на транзисторе. Основные части такого генератора: источник постоянного напряжения, транзистор, колебательный контур и катушка обратной связи. Если обратной связи не применять, то из этих элементов можно получить резонансный усилитель колебаний. Схема такого усилителя показана на рис. 78. На катушку L_2 подается (на схеме не показано, откуда и как именно подается) напряжение высокой частоты, которое требуется усилить. Ток в цепи коллектора начнет пульсировать с той же частотой. В контуре возникнут вынужденные колебания, а на концах контура возникнет напряжение, переменная составляющая которого может во много раз превышать напряжение, поданное на вход усилителя. Вместо контура можно включить и резистор, но контур имеет следующие преимущества. Во-первых, в резисторе были бы большие потери энергии, так как выделялось бы много тепла. Во-вторых, если на вход усилителя было подано несколько напряжений с разными частотами, то, благодаря резонансу, в контуре выделялось бы напряжение только той частоты, на которую настроен контур.

2. Если осуществить обратную связь, расположив катушку L_2 близко от катушки L_1 контура, то усилитель превратится в генератор. Близко расположенные катушки образуют трансформатор высокой частоты, где роль первичной обмотки играет катушка L_1 , а вторичной — L_2 (рис. 79).

Пусть от какого-либо толчка в контуре возникли колебания. Такой толчок тока возникнет, например, после включения рубильника, подключающего к схеме источник питания. В первый момент после толчка в контуре возникнут слабые

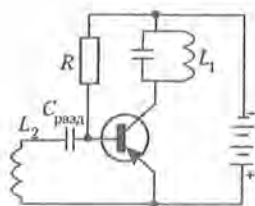


Рис. 78

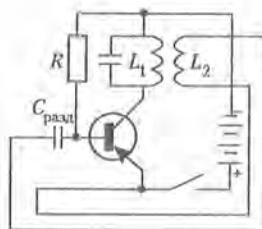


Рис. 79

собственные колебания. Период их определяется формулой Томсона $T = 2\pi \sqrt{LC}$. Не будь поддержки, эти колебания быстро бы затухли. Но благодаря обратной связи они будут не только поддержаны, но даже усилены. В самом деле, как только в контуре возникнут свободные колебания, в катушке обратной связи будет индуцироваться переменное напряжение. Это напряжение будет подано на вход усилителя, и ток коллектора начнет пульсировать с той частотой, которую «заказал» контур. В результате в контуре возникнут еще более мощные колебания и в катушке обратной связи станет индуцироваться еще большее напряжение. Такой круговорот повторится много раз, так что некоторое время амплитуда колебаний будет нарастать. При этом резко возрастают потери. Когда потери энергии в контуре сравняются с величиной поступающей туда энергии, амплитуда колебаний в контуре перестанет нарастать, установятся незатухающие колебания определенной амплитуды.

3. Наличие обратной связи еще не обеспечивает возникновения автоколебаний. Должны соблюдаться два условия. Во-первых, связь должна быть достаточно сильной. Например, если катушку обратной связи расположить далеко от катушки контура, то в ней будет индуцироваться слишком слабое напряжение, и пульсации коллекторного тока будут настоль-

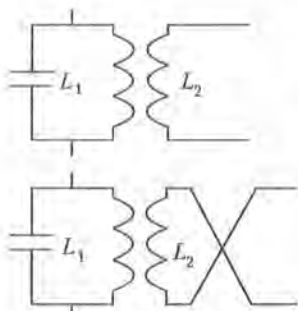


Рис. 80

ко слабыми, что энергия, поступающая в контур, не сможет компенсировать потерь. Во-вторых, колебательная энергия, подпитывающая контур, должна поступать туда в такой фазе, чтобы она поддерживала возникшие колебания, а не гасила их.

Упр. 1. Начертите наизусть схему усилителя (рис. 78) и генератора (рис. 79).

Упр. 2. Предположим, ге-

нератор, собранный по схеме рис. 79, работает (т. е. обратная связь оказалась достаточно сильной и выполнено условие фаз). Будет ли он работать, если переключить концы одной из катушек, например, катушки L_2 , как показано на рис. 80?

О т в е т: Не будет. Фаза напряжения, поданного на вход усилителя, изменится на противоположную, и если раньше колебания коллекторного тока поддерживали возникшие в контуре колебания, теперь они будут гасить их.

Упр. 3. Для чего в схеме генератора нужен разделительный конденсатор $C_{\text{разд}}$?

О т в е т: Не будь этого конденсатора, постоянный ток, протекающий по резистору R , вместо того чтобы протекать через базу и эмиттер, накоротко замкнулся бы через катушку L_2 (сопротивление участка эмиттер—база составляет несколько сотен ом, а катушки — доли ома). С другой стороны, этот конденсатор не мешает переменному напряжению, возникающему в катушке, замыкаться через участок база—эмиттер.

§ 41. Принцип радиосвязи

1. Если к генератору высокой частоты подсоединить антенну, то получится радиопередатчик. Антенну можно подключать к контуру по-разному, например, с помощью трансформаторной или, как говорят, индуктивной связи, т. е. рас-

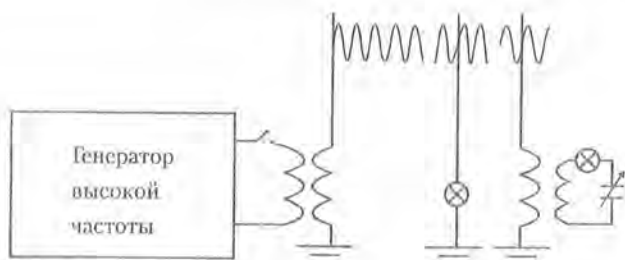


Рис. 81

положить возле катушки контура катушку, включенную в антенну. Условное изображение передатчика показано на рис. 81, слева¹. После включения передатчика антенна начинает излучать радиоволны. Если на пути радиоволн поставить провод, в нем возникнет переменное электрическое поле и электроны будут совершать вынужденные колебания, частота которых задается передатчиком. Провод, позволяющий улавливать энергию радиоволн, называют приемной антенной. Если в антенну включить лампочку или другое устройство, позволяющее обнаруживать возникший ток, мы получим простейший радиоприемник. Управляя с помощью ключа работой передатчика (рис. 81), можно передавать точечные и тире телеграфной азбуки, т. е. сочетания коротких и длинных сигналов. Таким способом можно передавать «по радио» любые сообщения. Для увеличения дальности приема сигнала, принятый антенной, можно усиливать с помощью транзисторов.

2. Хорошая приемная антенна должна иметь такие же размеры, как передающая. Это может быть, в частности, симметричный или заземленный вибратор. Но у большинства совре-

¹ Чтобы из схемы генератора получить схему передатчика, надо на рис. 79 рядом с катушкой контура расположить катушку антенны. Рисунок получается громоздким, поэтому мы ограничиваемся условной схемой.

менных приемников длина антенны в сотни, а иногда и в тысячи раз меньше «наивыгоднейшей». Так можно делать потому, что усиление сигналов в современных приемниках настолько велико, что имеет смысл поступиться качеством антенны ради удобства пользования приемником.

§ 42. Использование резонанса при приеме

Если одновременно работает несколько передатчиков, каждый на своей частоте, то в приемной антенне возникает несколько сигналов различной частоты. Чтобы выделить из них нужный сигнал, используют явления резонанса. Напоминаем, что резонансом называют резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний в результате совпадения частоты внешнего воздействия с частотой собственных колебаний данного устройства. Чтобы использовать явление резонанса, в состав приемника вводят колебательный контур. Строго говоря, приемная антенна уже является колебательным контуром и, меняя ее длину, тем самым меняют ее емкость и индуктивность, т. е. настраивают на определенную частоту. Но такой способ настройки неприменим по многим причинам (хотя бы потому, что антенну делают много короче, чем это надо для настройки ее в резонанс). Длину антенны оставляют постоянной, но в состав приемника вводят обычный контур. Контур можно связать с антенной так, как показано на рис. 81, справа. Когда в антенне возникают сигналы, они передаются катушке контура (играющей роль вторичной обмотки трансформатора). В контуре возникают вынужденные колебания, причем наибольшей амплитуды достигают колебания той частоты, на которую настроен контур. Если работают несколько радиостанций (поочередно или одновременно), то лампочка в приемнике будет загораться только при работе той станции, на которую настроен контур. Колебания, вызванные другими сигналами, при прочих равных условиях, будут настолько слабы, что лампочка (или другое регистрирующее устройство) их не отметит.

Если надо выделить сигнал другой частоты, надо изменить емкость или индуктивность контура так, чтобы его собственная частота совпала с частотой нового сигнала. Чтобы плавно менять собственную частоту контура, в его состав вводят конденсатор переменной емкости.

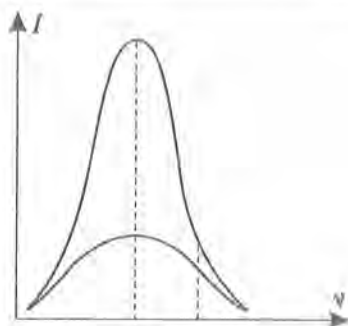


Рис. 82

Упр. 1. Чем меньше потери в контуре, тем острее, как мы видели, получается кривая резонанса. Пользуясь рис. 82, объясните, какому приемнику меньше мешают сигналы посторонних станций: приемнику с острой или с тупой кривой резонанса?

У к а з а н и е. Пусть в колебательный контур поступило одновременно два сигнала одинаковой силы: сигнал нужной частоты и сигнал мешающей станции (работающей на другой частоте). Отметьте на горизонтальной оси точки, соответствующие каждой из этих частот, и сравните токи, возбужденные в контуре каждым из этих сигналов. (Тот факт, что при тупой кривой резонансный ток меньше, чем при острой кривой, не имеет решающего значения. Увеличив усиление приемника (с помощью усилителя, не показанного на схеме), мы легко можем сравнить его с током при острой кривой.)

§ 43. Амплитудная модуляция

Чтобы передавать по радио не условные сигналы телеграфной азбуки, а звуки живой речи или музыки, надо воздействовать на колебания, излучаемые передатчиком, не телеграфным ключом, а микрофоном. Если амплитуда или частота этих колебаний будет меняться в соответствии с колебаниями мембраны микрофона, то излучаемые колебания будут нести в за-

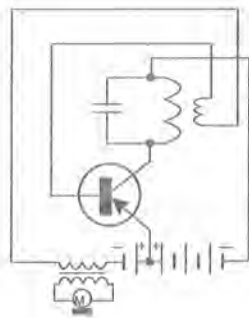


Рис. 83

шифрованном виде информацию о произнесенных перед микрофоном звуках. В приемнике эту информацию надо расшифровать — превратить в токи звуковой частоты и направить в громкоговоритель.

Устройство, с помощью которого можно менять амплитуду или другой параметр сигнала в соответствии со звуком, который надо передать, называют модулятором. Простейший модулятор состоит из микрофона и трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора включена последовательно с батареей смещения¹.

Если звуков возле микрофона нет (см. рис. 83), во вторичной обмотке не возникает никакого напряжения и роль источника смещения базы играет только батарея эмиттера (пусть ее ЭДС равно $\mathcal{E} = 0,2$ В). Генератор в этом случае будет вырабатывать высокочастотные (например, $\nu = 1000$ кГц) колебания постоянной амплитуды (рис. 84а, слева). Но пусть перед микрофоном звучит струна (например, $\nu_{\text{зв}} = 440$ Гц). Во вторичной обмотке микрофонного трансформатора появится переменное напряжение (например, $U = \pm 0,1$ В). Смещение базы будет меняться (от 0,3 В до 0,1 В) со звуковой частотой, поэтому амплитуда тока в контуре и в антенне станет меняться с этой же частотой (рис. 84а, справа). Колебания высокой частоты (в нашем примере, $\nu = 1000$ кГц), амплитуда которых меняется со звуковой частотой ($\nu_{\text{зв}} = 440$ Гц), называют модулированными по амплитуде. Такие колебания несут в зашифрованном виде информацию о том звуке, который прозвучал перед микрофоном.

Линия, соединяющая вершины амплитуд высокочастотных колебаний, называется огибающей (на рис. 84 она проведена пунктиром). Если мы добьемся, чтобы через громкоговори-

¹ Чтобы не усложнять схемы, мы источник смещения выделили отдельно.

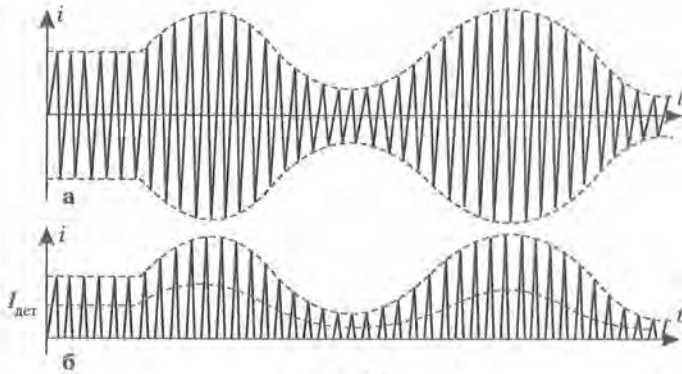


Рис. 84

тель приемника проходил ток, частота которого совпадает с частотой огибающей, то громкоговоритель воспроизведет звук того же тона, что был произнесен перед микрофоном.

Упр. 1. Перерисуйте схему генератора (с модулятором). Возле катушки контура начертите еще одну катушку и индуцированное в ней напряжение подайте на вход резонансного усилителя (схему усилителя начертите справа от схемы генератора). Возле катушки контура усилителя начертите еще катушку, включенную в антенну. Смещение на базу усилителя подайте от отдельной батареи.

Упр. 2. Начертите ту же схему, что задана в упр. 1, но модулятор перенесите из схемы «задающего генератора» в схему резонансного усилителя (получившаяся схема гораздо ближе к схеме реального передатчика, чем предыдущие).

§ 44. Детектирование

1. Когда модулированные сигналы достигают приемной антенны, в ней также возникают модулированные колебания. Чтобы превратить их в звуки, в приемнике должен быть теле-

Упр. 3. Будет ли площадь под кривой $I_{\text{дет}}$ (рис. 84б) равна суммарной площади под импульсами пульсирующего тока (на том же рис. 84б)?

§ 45. Понятие о телевидении

1. Для передачи телевизионного изображения в составе телепередатчика должно быть устройство, которое превращало бы предназначенное для передачи изображение в определенную последовательность электрических сигналов. Это можно сделать так. Пусть имеется вакуумная трубка, имеющая электронный прожектор, как в кинескопе. В этой трубке имеется экран, на который с помощью линз можно спроектировать изображение, подлежащее передаче. Пусть электронный луч пробегает экран точка за точкой, как мы пробегаем глазами страницу книги, которую читаем. Надо сделать так, чтобы, когда луч попадал в светлую точку, в антенну поступал сигнал большой амплитуды, а когда в темную — сигнал малой амплитуды. Чем больше яркость данной точки, тем больше должна быть амплитуда сигнала. Одновременно с движением электронного луча в передающей трубке должно происходить движение луча в кинескопе телевизора. Движение луча в кинескопе должно быть синхронизировано с движением луча в передающей трубке. Это значит, что, когда луч в передатчике начинает разворачивать данную строку, то и в кинескопе должно происходить то же самое. Когда луч в передатчике доходит до конца строки, и в кинескопе он должен доходить до конца, и т. д.

В антенну передатчика, а следовательно, и в антенну телевизионного приемника будут поступать сигналы с разной амплитудой (рис. 86). Эти сигналы поступают после преобразования на управляющий электрод кинескопа. В тот момент, когда на этот электрод поступит сигнал большой амплитуды, на экране кинескопа появится более яркая точка, чем соседние¹. По-

¹ По некоторым причинам сигналы, поступающие в антенну телепередатчика, преобразуются так, чтобы наибольшая амплитуда

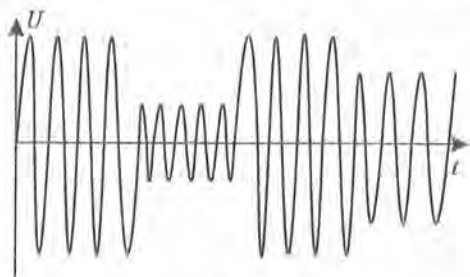


Рис. 86



Рис. 87

том яркие точки появятся и в других местах, и так точка за точкой на экране кинескопа будет воспроизведено то изображение, что было в передающей трубке (рис. 87). Затем на экране появится следующий кадр и т. д.

2. Для преобразования изображения в последовательность электрических сигналов используют фотоэффект. Различают внешний и внутренний фотоэффект. Внешний заключается в том, что свет может выбивать электроны с поверхности вещества. Внутренний фотоэффект заключается в том, что свет, попадая в полупроводник, может освобождать из межатомных связей электроны, создавая тем самым свободные электроны и дырки. Проводимость полупроводника в том месте, куда попал свет, резко увеличивается. Полупроводник, в котором используется внутренний фотоэффект, называют фоторезистором.

3. В качестве примера рассмотрим устройство основанной на внутреннем фотоэффекте передающей телевизионной трубки типа «видикон». Чтобы понять принцип ее действия, рассмотрим рис. 88. Изображение предмета, которое хотят видеть на экранах телевизоров, проектируется с помощью линз на фотомишень (на рисунке предмет расположен слева от фотомишени). Фотомишень представляет собой тонкую прозрачную металлическую пленку, на внутреннюю поверхность ко-

да соответствовала темному месту изображения, а наименьшая — светлomu. Но в кинескоп телевизора сигнал поступает так, что все становится на свои места.

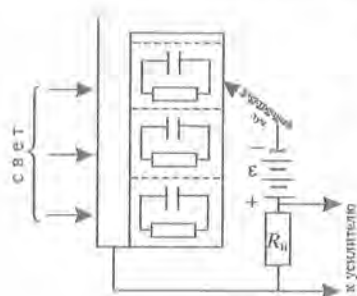


Рис. 88

торой напылен тонкий слой полупроводникового материала. Этот слой изготовлен так, что по своим свойствам равноценен множеству изолированных друг от друга ячеек (на рисунке показаны в сильно увеличенном виде только три ячейки). Каждая ячейка равносильна конденсатору, параллельно которому включен фоторезистор. Все это размещено в вакуум-

ном стеклянном баллоне, в горловине которого имеется электронный прожектор (как в кинескопе). Электронный луч, играющий роль быстродействующего переключателя, пробегает по фотомишени, заряжая все конденсаторы до напряжения источника ϵ . Ток заряда протекает по цепи: плюс источника — резистор нагрузки R_n — конденсатор — электронный луч — минус источника.

В промежутках между очередными воздействиями электронного луча конденсаторы разряжаются через шунтирующие их фоторезисторы. Если данная ячейка не была освещена (была темной), то сопротивление фоторезистора практически будет бесконечным и соответствующий конденсатор не разрядится. Чем сильнее освещена ячейка, тем меньше сопротивление фоторезистора и тем сильнее разрядится конденсатор. Когда после этого электронный луч начнет снова пробегать по ячейкам, он будет дозаряжать конденсаторы до напряжения батареи. Ток подзаряда будет разным: при подзаряде темной ячейки он будет равен нулю; чем лучше была освещена ячейка, тем сильнее будет ток подзаряда. Выделенное на нагрузке R_n напряжение после усиления используется для модуляции несущей частоты телевизионного передатчика.

Помимо сигнала изображения, передатчик передает сигналы синхронизирующих импульсов, которые воздействуют на генераторы развертки в телевизорах, заставляя луч в кинескопах двигаться синхронно с лучом в передающей трубке.



Рис. 89

§ 46. Радиолокация

1. Радиолокацией называется обнаружение и определение местоположения самолетов, спутников, судов, автомашин и других предметов с помощью отраженных от них радиоволн. По принципу действия радиолокаторы делят на две основные группы: локаторы непрерывного излучения и импульсные. Мы рассмотрим только последние.

Основные части радиолокатора: генератор ультракоротких волн (обычно сантиметровых или дециметровых), антенна направленного действия, приемник и индикаторы, на которых отмечаются интересующие нас данные: расстояние до цели, ее координаты и т. п. (рис. 89). Наблюдаемым предметом (целью) для определенности будем считать самолет.

Генератор импульсного радиолокатора вырабатывает колебания не непрерывно, а отдельными порциями — импульсами (рис. 90). В каждом импульсе может содержаться множество периодов (десятки, сотни, даже тысячи). Промежутки между импульсами во много раз больше длительности каждого импульса. Антенна направленного действия излучает этот импульс в определенном направлении, подобно прожектору. Если в этом направлении имеется самолет, то отраженные от него волны будут расходиться в разные стороны, в том числе и в сторону радиолокатора. Слабый импульс, отраженный са-

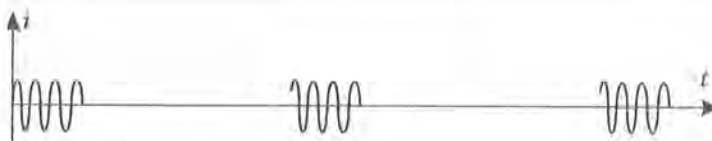


Рис. 90

молетом, будет принят антенной (обычно одна и та же антенна поочередно подключается то к передатчику, то к приемнику), усилен, преобразован и направлен в индикатор. Появление отраженного импульса сигнализирует о том, что в направлении, куда «смотрит» антенна, находится самолет. Чтобы определить расстояние до него, надо знать время запаздывания отраженного сигнала (т. е. время, прошедшее от момента посылки зондирующего импульса до момента возвращения отраженного сигнала). Расстояние до цели равно скорости радиоволн ($c = 300\,000$ км/с), помноженной на половину времени запаздывания (так как радиоволны прошли путь в оба конца).

2. Основной частью индикатора дальности является электронно-лучевая трубка (рис. 91). На пластины горизонтального отклонения (Γ) трубки подается от специального устройства «развертывающее» напряжение. Оно заставляет электронный луч за определенное время (например, за 1000 микросекунд) пробежать всю шкалу от края до края, затем почти мгновенно возвращаться в начальную точку, снова развертываться и т. д. Это движение луча согласовано с работой передатчика таким образом, что луч начинает двигаться от крайней точки вправо как раз в те моменты, когда передатчик испускает очередной импульс.

Пластины вертикального отклонения (B) соединены с выходом приемника. Поэтому в те моменты, когда приемник улавливает сигнал, электронный луч отклоняется в вертикальном направлении и на экране появляется вертикальная отметка. Первая отметка возникает в начальной точке, так как в этот момент передатчик испускает импульс, который тотчас принимается приемником. Если спустя некоторое время (напри-

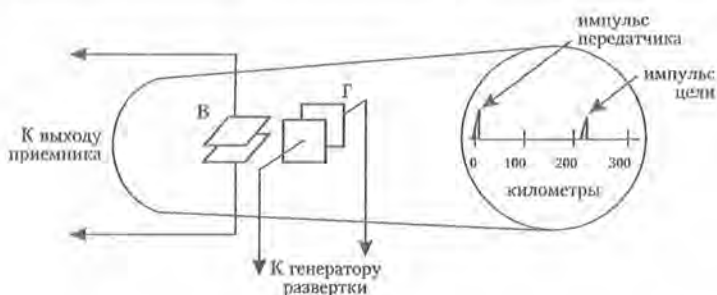


Рис. 91

мер, через 600 мкс) приемник уловит отраженный импульс, то в соответствующей точке экрана возникает вторая отметка. Эта отметка, во-первых, сигнализирует о присутствии самолета в том направлении, куда направлена антенна, во-вторых, дает возможность определить расстояние до него. Чтобы не делать лишних расчетов, на шкале трубки проставляют не микросекунды, а километры (например, вместо цифры 1000 мкс проставляют дальность 150 км, вместо 100 мкс — 15 км и т. д.).

3. Существует еще один тип импульсных радиолокаторов — радиолокаторы кругового обзора, или иначе, панорамные. На экране такого локатора электронный луч рисует подобие карты окружающей местности. На таком экране сразу видно расположение всех самолетов вокруг локатора (в радиусе до нескольких сот километров).

Антенна панорамного локатора равномерно вращается (например, делая один оборот за 10 секунд). В тот момент, когда антенна посылает импульс точно на север, электронный луч на экране начинает разворачиваться от центра тоже на север (рис. 92). Если антенна повернулась, например, на 1° , то и электронный луч на экране разворачивается в этом же направлении (и в момент посылки импульса находится точно в центре). Экран индикатора сделан из вещества, обладающего заметным послесвечением, он не успевает погаснуть за один оборот и почти равномерно светится. Это означает, что в зоне действия локатора самолетов нет.

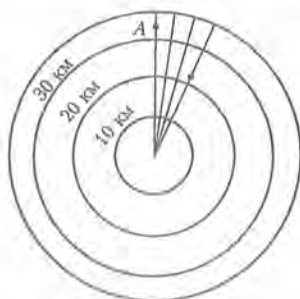


Рис. 92

Если в каком-либо направлении, например, на севере, имеется самолет, то от него придет отраженный сигнал. Это будет в тот момент, когда луч на экране развертывается от центра точно на север и успевает пройти определенное расстояние от центра. Сигнал будет подан (после усиления и преобразования) на электрод, управляющий яркостью экрана. В результате одна из точек на «северном» луче станет ярче остальных (точка А на рис. 92). Если в другом направлении, например на западе, одновременно находится другой самолет, то яркая точка появится и на «западном» радиусе. Если один из самолетов ближе другого, например, вдвое, то и точка, изображающая его, будет ближе другой точки (тоже вдвое). В результате на экране появится карта воздушной обстановки в окружающем районе.

Если панорамный локатор установить на самолете, а антенный луч направить вниз, то на экране появится подобие карты местности, над которой пролетает самолет (так как разные участки: озера, леса, поля, крыши зданий и т. п. по-разному отражают радиоволны).

4. Почему радиолокаторы работают только на ультракоротких волнах (на метровых, дециметровых и сантиметровых)? Одна из причин связана с размерами антенн. Чтобы получить узкий пучок радиоволн, нужна антенна больших размеров — в несколько раз больше длины волны. Для радиолокатора, работающего на стометровых волнах, нужны километровые антенны.

Другая причина связана с тем, что для хорошего отражения волн надо, чтобы длина волны была меньше размеров отражателя. Длинные волны огибают малые предметы (как звуковые волны теннисный мячик).

Упр. 1. Какова должна быть минимальная длительность паузы между импульсами влокаторе, дальность действия которого 150 км?

О т в е т: Нельзя посылать очередной импульс до тех пор, пока не возвратится отраженный от самого дальнего объекта сигнал от предыдущего импульса. В данном случае это произойдет через 1000 мкс.

Упр. 2. Начертите, как должен выглядеть график напряжения, поступающего от генератора развертки на пластины горизонтального отклонения.

§ 47. Изобретение радио А. С. Поповым

Существование электромагнитных волн предсказал английский физик Максвелл (около 1870 г.). Впервые сумел их получить и обнаружить немецкий физик Герц (в 1888 г., через 9 лет после смерти Максвелла). Аппаратура, пригодная для беспроводной связи, была изобретена русским физиком А. С. Поповым (1859–1906). Днем рождения радио считается день, когда Попов продемонстрировал созданную им аппаратуру собравшимся в Петербургском университете физикам. Это было в 1895 году (7 мая). Разумеется, приборы Попова не походили на современные: в ту пору не было ни транзисторов, ни других полупроводниковых приборов, без которых нам трудно представить теперь радиоаппаратуру. Тем удивительней, что еще до начала XX века Попову удалось добиться дальности в несколько десятков километров.

Попов — питомец Петербургского университета. В период создания радио он был преподавателем физики в школе военных электриков в г. Кронштадте. Впоследствии (с 1901 г.) он стал профессором, а затем ректором Петербургского электротехнического института.

Значительную роль в развитии и распространении радио в первые годы после его появления сыграла фирма, организованная в Англии итальянским инженером Маркони (в 1897 г.).

ГЛАВА 4

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

§ 48. Исторические сведения о развитии оптики

1. Оптикой называют учение о свете и других диапазонах электромагнитных волн, кроме радиоволн. Долгое время в физике боролись две теории, по-разному отвечавшие на вопрос «что такое свет?» Одни ученые считали, что свет — это поток мельчайших частиц (корпускул), испускаемых светящимся телом. Эти частицы отрываются от любого светящегося тела, например, от Солнца и, попадая в наш глаз, вызывают ощущение света. Различие цветов объясняли тем, что эти частицы могут иметь разные размеры.

Другие ученые считали, что свет — это волны. Согласно этой теории всякое светящееся тело колеблется и передает свои колебания частицам окружающей среды. Сторонникам этой теории пришлось предположить, что весь мир заполнен особой невесомой средой — мировым эфиром, — способной передавать колебания светящихся тел. Различие цветов объясняли тем, что частота колебаний могла быть различной.

Обе теории — корпускулярная и волновая — возникли почти одновременно. Корпускулярную теорию начал разрабатывать Ньютон, а волновую — его современник Гюйгенс. Вначале в физике господствовала корпускулярная теория, но в начале XIX века была открыта способность света огибать препятствия (дифракция света) и способность световых лучей при некоторых условиях гасить друг друга, т. е. порождать темноту (интерференция света). Дифракция света и интерференция — несомненные признаки волновой природы света, и в физике безраздельно утвердилась волновая теория.

2. Вначале предполагалось, что световые колебания — колебания механические и отличаются от звуковых только своей частотой и тем, что могут распространяться в безвоздушном пространстве. Но в конце XIX века работы Максвелла

и Герца заставили отказаться от представления будто свет — это механические колебания некоторой упругой среды. Свет — это электромагнитные волны, отличающиеся от радиоволн только длиной волны. Электрическое и магнитное поля могут существовать и в вакууме, поэтому электромагнитная теория света не нуждается в предположении о существовании упругой среды (эфира), пронизывающей все пространство, т. е. способно существовать «само по себе» даже в самом совершенном вакууме.

3. В XX веке выяснилось, что представление о волнах не исчерпывает всех свойств света. В некоторых случаях свет ведет себя, как поток частиц. Этот вопрос будет разобран дальше (в разделе «Квантовая физика»). Там мы снова вернемся к вопросу о природе света.

§ 49. Световой поток и освещенность

Световые волны, как и любые другие волны, переносят определенную энергию. Количество энергии, переносимое за единицу времени через данную площадку, называют потоком излучения. Однако в оптике нас обычно интересует не весь поток излучения, а только та его часть, которая воздействует на человеческий глаз. Пусть в одном закрытом помещении находится радиопередатчик, в другом — горячий утюг, в третьем — лампа. Может случиться, что полный поток излучения каждого из этих трех излучателей одинаков, например, 1 Вт, но в первых двух случаях в помещениях будет темно (поскольку радиоволны и инфракрасные лучи глазом не воспринимаются), и только в третьем будет светло. Та часть потока излучения, которая воздействует на человеческий глаз (и оценивается по зрительному ощущению), называется световым потоком. Ясно, что его нет смысла измерять в ваттах: ватт может быть много, а света может не быть. Световой поток измеряют в особых единицах — люменах. Световой поток, падающий на единицу площади (т. е. плотность светового потока излучения), называют освещенностью. Единица освещенности — люкс

(1 лк = 1 лм/м²). Норма освещенности школьных парт — 150 лк, школьных коридоров — 30 лк.

Упр. 1. Расстояние от лампы до листа бумаги увеличили в 2 раза. Во сколько раз уменьшилась освещенность листа?

Упр. 2. Полный световой поток 40-ваттной лампы накаливания составляет 400 лм. Какова освещенность на расстоянии 1 м от лампы? Считать, что лампа равномерно излучает по всем направлениям. Отражением от абажура и от стен пренебречь.

О т в е т: 32 лк.

§ 50. Скорость света

1. Нам кажется, что свет мгновенно пробегает расстояние от источника света до освещаемых им предметов. Но еще в эпоху Ньютона из астрономических наблюдений был сделан вывод о том, что скорость света является конечной. В «земных условиях» скорость света впервые сумели измерить только в XIX веке. Идея опыта очень проста. В определенной точке надо произвести короткую вспышку света. Этот свет должен пробежать определенное расстояние, отразиться от зеркала и вернуться обратно. Разделив пройденный путь на время, найдем скорость света. Надо было создать такое устройство, которое автоматически отмечало бы момент посылки сигнала, момент возвращения сигнала и позволяло бы измерять ничтожный промежуток времени, протекший между этими двумя событиями. Эта задача была решена задолго до появления современных электронных устройств.

2. Наиболее известные опыты по измерению скорости света произведены американским физиком Майкельсоном в конце XIX и в начале XX века. На рис. 93 изображена схема одной из его установок. Луч света от мощной дуги S направляется на одну из граней вращающегося многогранного зеркала A , оттуда направляется к неподвижным зеркалам B , отстоящим на несколько километров от зеркала A , возвращается к первому зеркалу и, отразившись от него (от грани 3), попадает в зрительную трубу.

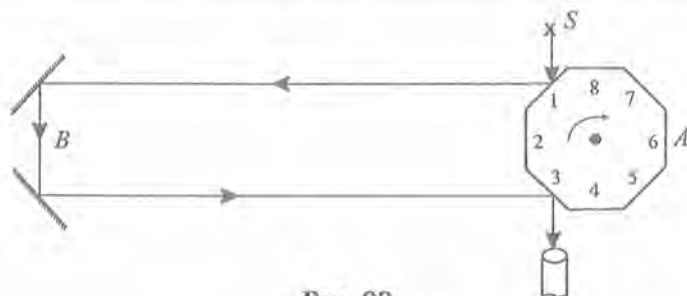


Рис. 93

Если зеркало A неподвижно, то луч света все время попадает на зеркало B . Если же зеркало A вращается, то за один оборот только несколько раз (8 раз, если зеркало восьмигранное) луч света будет направляться к зеркалам B . При этом в зрительной трубе никаких «вспышек» наблюдаться не будет. В самом деле, если бы свет распространился мгновенно, то луч света, попав на грань 1 (когда она находится в «нужном» положении), мгновенно пробежал бы путь $1-B-3$ и попал бы в зрительную трубу. Но так как скорость света конечна, то за время, пока луч пробегает этот путь, зеркало успеет повернуться на некоторый угол, и луч, вернувшийся к зеркалу, отразится гранью мимо трубы. Однако можно подобрать такую скорость вращения, чтобы за то время, пока луч путешествовал к зеркалу B и обратно, вращающееся зеркало успело подставить лучу следующую грань, которая отразит луч света точно в зрительную трубу.

Разделив путь, пройденный светом, на время, за которое зеркало повернулось на одну восьмую оборота, найдем скорость света. Она почти в точности равна 300 000 км/с.

Упр. 1. В опыте Майкельсона (1926) установка была размещена на вершинах двух гор, удаленных друг от друга на 35,3533 км. Наименьшая скорость вращения, при которой луч света попадал в трубу, составляла 530 оборотов в секунду. Рассчитайте по этим данным скорость света. (По современным данным скорость света на 4 км/с меньше значения, полученного Майкельсоном.)

§ 51. Принцип Гюйгенса

На границе двух сред, например, воздуха и воды, волны частью отражаются, частью проникают в другую среду (преломляются). Законы отражения и преломления волн можно вывести на основе принципа Гюйгенса (Гюйгенс — голландский физик, современник Ньютона). Этот принцип состоит из двух частей. Первая часть утверждает, что каждую точку, до которой дошли колебания, можно рассматривать как самостоятельный источник колебаний (вторичных волн). Особенно нагляден смысл этого утверждения, если рассматривать волны на воде. Пусть от точки S расходятся кругами волны по всем направлениям и достигают некоторой точки M . Эта точка ничуть не хуже первоначальной, поэтому от нее (когда в ней возникли колебания) тоже должны расходиться по всем направлениям волны.

Вторая часть принципа относится только к тому случаю, когда фронт волны не имеет никаких разрывов (фронт волны — поверхность, отделяющая область, где происходят колебания, от области, куда они еще не дошли). В этом случае фронт волны в произвольный момент t может быть найден как огибающая вторичных волн для этого момента (рис. 94а).

Принцип Гюйгенса не отвечает на вопрос, почему вторичные волны не расходятся во все стороны от каждой точки и, в частности, почему не распространяются в обратную сторону. Ответ на этот вопрос дал французский физик Френель (в первой четверти XIX века). Он добавил к первой части принципа Гюйгенса представление об интерференции света и показал, что результат интерференции всех вторичных волн, когда фронт волны не имеет разрывов, действительно определяется их огибающей, как это предположил Гюйгенс.

Кроме того, Френель сумел рассчитать, каков будет результат интерференции вторичных волн, когда фронт волны имеет разрывы, т. е. когда свет обходит препятствие или, наоборот, проходит сквозь узкую щель.

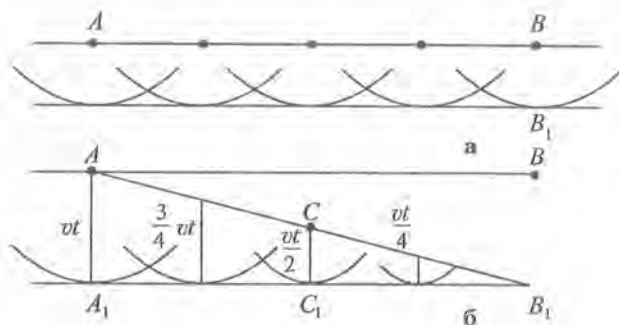


Рис. 94

§ 52. Примеры применения принципа Гюйгенса

1. Применим принцип Гюйгенса к случаю, когда волны распространяются в однородной среде. Пусть к моменту, который мы приняли за начальный, фронтом волны является поверхность AB (рис. 94а). Чтобы найти положение фронта волны спустя время t , примем поверхность AB за источник вторичных волн. Из каждой точки поверхности AB проведем полусферу радиусом vt , где v — скорость волн, и построим огибающую A_1B_1 . Эта огибающая и будет фронтом волны в момент t . Отсюда видно, что если в начальный момент фронт волны был плоским, то он и дальше останется плоским. Нормаль к фронту волны (луч) показывает направление движения волны. Это направление, как видно из рисунка, остается постоянным. Таким образом, в однородной среде волны распространяются прямолинейно.

2. В качестве источника вторичных волн не обязательно выбирать фронт волны. Можно выбрать и такую поверхность, куда волны приходят не одновременно. Например, в рассмотренном ранее примере мы могли выбрать в качестве источника вторичных волн поверхность AB_1 (рис. 94б). К моменту t (считая от того момента, когда фронтом волны была поверхность AB) волна из A успеет дойти до A_1 ,

Стоит запомнить, что при переходе из среды с большей скоростью в среду с меньшей скоростью луч приближается к нормали.

Упр. 1. Меняется ли при переходе из одной среды в другую: а) частота колебаний; б) длина волны?

§ 53. Основные законы лучевой оптики

1. Многие оптические явления и действие многих оптических приборов можно понять, не делая никаких предположений о природе света. Достаточно ввести на основе сравнительно грубого опыта понятие о световом луче и выяснить (тоже из опыта) законы распространения световых лучей. Этот раздел оптики называют лучевой или геометрической оптикой.

Понятие о световом луче вводится на основе такого опыта. Если на пути света поставить преграду с отверстием, то это отверстие вырежет определенный пучок света. Тонкий пучок света назвали лучом. Получить таким способом очень тонкий пучок света (тоньше 0,01 мм) невозможно из-за дифракции света, но большой круг явлений можно объяснить, не учитывая этого обстоятельства. Таким образом, в лучевой оптике принимают, что любой пучок света состоит из отдельных бесконечно тонких лучей, распространяющихся независимо друг от друга.

2. Те законы распространения света, которые мы вывели на основе принципа Гюйгенса, в лучевой оптике рассматриваются как опытные. Эти основные законы таковы:

- а) в однородной среде луч света распространяется прямолинейно;
- б) на границе двух сред часть лучей отражается, часть проникает в другую среду;
- в) при этом (рис. 97) падающий луч, отраженный луч, преломленный луч и нормаль к границе (проведенная через точку падения) находятся в одной плоскости;
- г) угол отражения равен углу падения;

д) как бы ни менялся угол падения, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления остается величиной постоянной для данных двух сред. Это отношение называют показателем преломления второй среды относительно первой

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_{2/1},$$

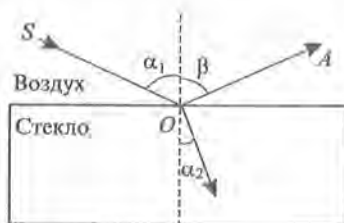


Рис. 97

Волновая теория, как мы знаем, объясняет преломление различием скоростей света в разных средах. При этом, как видно из рис. 96, луч ближе к нормали в той среде, где скорость света меньше.

3. Показатель преломления данного вещества относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления этого вещества. Практически эта величина совпадает с показателем преломления относительно воздуха. При сравнении двух сред ту, у которой абсолютный показатель больше, называют оптически более плотной средой.

4. Обратимость лучей. Из законов отражения следует, что если направить падающий луч по пути отраженного луча (от *A* к *O* на рис. 97), то отраженный луч пойдет по пути падающего. Таким образом, падающий и отраженный лучи взаимно обратимы.

Падающий и преломленный лучи также взаимно обратимы. В виде формулы это можно записать так:

$$n_{1/2} = \frac{1}{n_{2/1}}.$$

Непосредственно из закона преломления обратимость не усматривается (хотя ее можно доказать средствами лучевой оптики). Проще всего сослаться на волновую теорию. Из нее следует, что отношение соответствующих синусов равно отношению скоростей в этих двух средах. Ясно, что если мы повернем преломленный луч «обратно», то первоначальное отношение скоростей также изменится на обратное.

Упр. 1. Докажите, что луч света, пройдя плоско-параллельную прозрачную пластинку, остается параллельным первоначальному направлению.

Упр. 2. Показатель преломления стекла относительно воздуха равен 1,6. Луч падает из стекла в воздух под углом: а) 30° ; б) 60° . Каков будет угол преломления?

О т в е т: а) 53° ; б) задача не имеет решения.

Упр. 3. Каков должен быть предельный угол падения в предыдущей задаче, чтобы она имела решение?

О т в е т: 39° .

§ 54. Полное внутреннее отражение

1. Рассмотрим случай, когда луч света переходит из более преломляющей среды в менее преломляющую (например, из воды в воздух). Нетрудно убедиться, что при этом луч отходит от нормали (в более преломляющей среде скорость света сильнее отличается от скорости в вакууме, чем у менее преломляющей; значит, мы имеем случай, когда свет из среды с меньшей скоростью попадает в среду с большей скоростью). Если постепенно увеличивать угол падения (рис. 98), то и угол преломления будет постепенно увеличиваться, и при некотором угле α_0 преломленный луч настолько отойдет от нормали, что станет скользить вдоль границы раздела этих сред. Угол падения, при котором преломленный луч скользит вдоль границы раздела, называют предельным. Величину предельного угла легко рассчитать, если известен показатель преломления. Для практики особенно важен случай, когда одной из этих сред является воздух. В этом случае, как видно из рисунка,

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = n',$$

где n' — показатель преломления воздуха относительно данного вещества. Но так как в таблицах приводят не этот показатель, а «обратный», т. е. показатель преломления данного вещества относительно воздуха, то, если этот «табличный» показатель обозначить через n , получим:

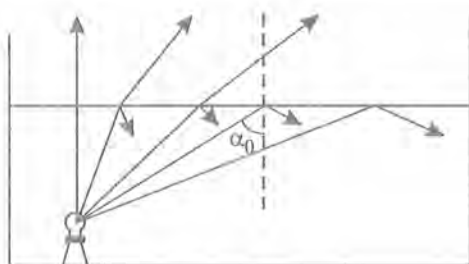


Рис. 98

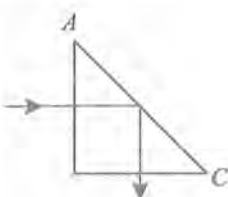


Рис. 99

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n} \rightarrow \sin \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

2. Что произойдет, если луч будет падать под углом больше предельного? Следует ожидать, что в этом случае преломленного луча вовсе не будет (формально это следует из того, что при углах больше предельного синус искомого угла преломления получается больше единицы). Опыт подтверждает, что так оно и есть: в этом случае остается только отраженный луч. Таким образом, *на границе двух совершенно прозрачных сред может случиться, что весь падающий на границу свет отражается. Это явление называют полным внутренним отражением.*

3. У стекла предельный угол меньше 45° . Поэтому луч, падающий на стеклянную призму, как показано на рис. 99, испытает полное внутреннее отражение от поверхности AC. Такие призмы лучше зеркал, так как лучше отражают свет и более долговечны (зеркала могут окисляться и постепенно тускнеть). Призмы полного внутреннего отражения используют во многих оптических приборах: перископах, стереотрубах, призмных биноклях и т. д. Объектив призмного бинокля создает перевернутое изображение рассматриваемого предмета. В каждую трубку бинокля помещают по две призмы, расположенные перпендикулярно друг другу. Все лучи сначала проходят через одну призму, потом через другую. Из рис. 100 видно, что одна из этих призм «верх делает низом», другая «правое делает левым».

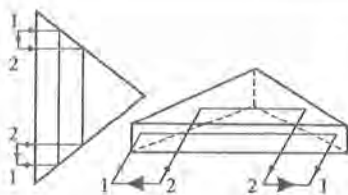


Рис. 100

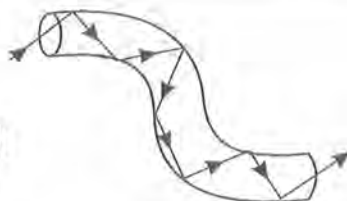


Рис. 101

Если вещество имеет большой показатель преломления, то даже при малых углах падения будет наступать полное внутреннее отражение. Если из такого вещества сделать стержень, изогнутый почти произвольно (рис. 101), то свет, направленный на стержень «с торца», испытав многократное полное отражение от стенок, выйдет через другой торец. Таким образом можно получить световод, направляющий пучок света по любому изогнутому пути. На практике вместо жесткого стержня для этой цели используется пучок тонких (диаметром 1–2 микрометра) прозрачных волокон. Такие световоды широко используются в технике связи. По волоконно-оптическому кабелю передаются модулированные сигналы, причем одновременно могут передаваться много тысяч сигналов (дальность связи без ретрансляторов может превосходить 100 км). Такие кабели применяются для передачи больших объемов информации в системах связи и компьютерных сетях, постепенно вытесняя передачу сигналов по электрическим проводам или с помощью радиоволн; когда мы говорим по междугородному или сотовому телефону, смотрим телевизор, пользуемся Интернетом, то скорее всего какую-то часть пути от точки отправления до нас и обратно сигнал проходит по оптическому волокну. Короткие световоды (длиной порядка метра) используют в медицине. Например, при исследовании желудка туда вводится крохотная лампочка и тонкий световод, по которому передается наружу изображение исследуемого участка.

Упр. 1. Луч света из воды ($n_0 = 1,33$) переходит в стекло ($n_c = 1,6$). Может ли при этом наступить полное внутреннее отражение? (Ответ поясните рисунком.)

Упр. 2. Луч света попал из воздуха в стеклянный шар. Может ли он внутри шара испытать полное внутреннее отражение?

§ 55. Дисперсия света

1. Когда мы говорим о величине показателя преломления одной данной среды относительно другой, речь идет о некоторой средней величине, так как для разных цветов этот показатель различен. Впервые это выяснил Ньютон. Этот факт он положил в основу теории цвета (до Ньютона вопрос о цвете не был предметом исследования точных наук, так как никто не знал, как подойти к исследованию этого вопроса). Ньютон придумал ряд опытов, открывших подход к этой проблеме. Вот некоторые из них:

а) если солнечный луч пропустить через узкую щель, сделанную в стенке темной комнаты, и направить на призму¹ (рис. 102), то на экране за призмой появится широкая полоса, окрашенная в различные цвета. Эту цветную полосу Ньютон назвал спектром белого света²;

б) если вместо плоского экрана поставить вогнутое зеркало такой формы, чтобы все лучи спектра собрались вместе, мы снова увидим белую полосу;

в) если в какой-либо точке экрана (например, там, где оказались желтые лучи) сделать щель и лучи, прошедшие сквозь эту щель, направить на другую призму, то эти лучи только преломятся призмой, цвет же их не изменится (рис. 102, справа).

Этими и некоторыми другими опытами было установлено следующее:

¹ В оптике под призмой обычно подразумевают треугольную призму.

² Для желающих запомнить порядок цветов спектра придумана шуточная фраза: Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидят Фазаны. Первая буква каждого слова соответствует первой букве соответствующего цвета: Красный, Оранжевый, Желтый, Зеленый, Голубой, Синий, Фиолетовый.

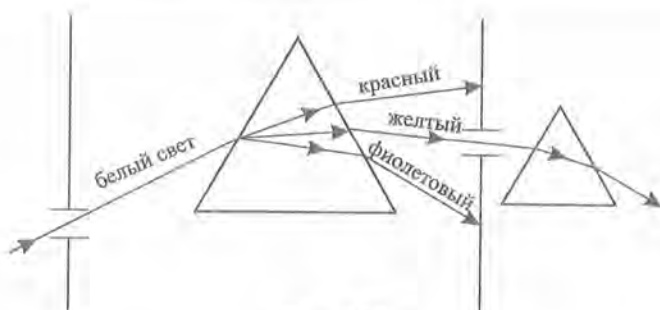


Рис. 102

а) существуют лучи (например, желтые), которые не разлагаются призмой. Такие лучи были названы простыми или монохроматическими (что по-гречески означает «одноцветные»);

б) у разных простых лучей показатели преломления различны (сильней всего преломляются фиолетовые лучи, слабее всего — красные);

в) белый свет не является простым, а представляет собой набор простых лучей.

2. Волновая теория истолковывает результаты опытов Ньютона так. Монохроматический свет — это колебания определенной частоты. В вакууме скорость света одинакова для всех частот. В веществе же скорость света зависит от частоты. Поэтому в стеклянной призме лучи разных цветов преломляются по-разному. *Существование зависимости показателя преломления от частоты света называется дисперсией света.* Вследствие дисперсии белый свет, попадая в стеклянную призму, разлагается на монохроматические лучи.

Дисперсия света в различных веществах происходит по-разному. Например, в кварце дисперсия меньше, чем в стекле. Это значит, что различие показателей преломления красного и фиолетового цвета у кварца меньше, чем у стекла. Стало быть, кварцевая призма меньше «разводит» эти лучи, чем такая же стеклянная.

Дисперсией солнечного света в каплях воды объясняется возникновение радуги.

§ 56. Цвет тела

1. Каким образом можно объяснить, что различные тела, освещенные одним и тем же белым светом, кажутся окрашенными по-разному? Это можно объяснить тем, что тела по-разному отражают и поглощают разные цвета спектра. Если данная краска отражает в равной мере все лучи солнечного спектра, то такая краска будет казаться белой. Если же краска поглощает все лучи спектра, кроме желтого, то краска будет казаться нам желтой. Наконец, если тело совсем не отражает падающие на него лучи, мы его совсем не будем видеть. В этом случае говорят, что тело черное. У такого тела, если оно по-настоящему черное (например, у небольшого отверстия в плохо освещенной бочке или у куска хорошего темного бархата), мы видим только границы, очерченные окружающими телами.

2. Следует иметь в виду, что ощущение определенного цвета, например, оранжевого, может получиться у человека двумя путями: а) если в глаз поступает монохроматический свет, т. е. свет с одной определенной длиной волны (в нашем примере 610 нм); б) если в глаз попадает свет, являющийся смесью нескольких монохроматических лучей, например, красного и желтого. Только с помощью призмы или другого спектрального прибора можно выяснить, является ли этот свет простым или сложным.

§ 57. Интерференция и когерентность

1. Наиболее характерными признаками волновой природы света являются интерференция и дифракция. *Интерференцией называют тот случай наложения волн, когда картина наложения является устойчивой во времени.* Выясним на примере световых волн, почему этот случай выделен особо. Пусть на экран, освещенный одной лампой, направил свет от другой лампы. Как должна при этом измениться освещенность экрана? Теоретически тут возможны два случая. Если произойдет «обычное» наложение волн, то в каждой точ-

ке экрана колебания будут то усиленными, то ослабленными (в частном случае, когда амплитуды обоих колебаний равны, результирующая амплитуда будет то удваиваться, то обращаться в нуль). Если продолжительность каждого «светлого» и каждого «темного» промежутка очень мала (а она действительно мала и составляет одну стомиллионную долю секунды), то глаз не заметит никаких мельканий и весь экран представится ему равномерно освещенным (мы не замечаем куда менее частых мельканий экрана телевизора). Можно показать, что средняя освещенность при этом увеличится и будет равна сумме тех освещенностей, что создавала бы каждая лампа¹.

Теперь рассмотрим, как должен выглядеть экран, если будет происходить интерференция световых волн. После включения второй лампы в одних точках экрана амплитуда все время будет увеличенной, в других — ослабленной. Это значит, что после включения второй лампы в одних точках экрана освещенность увеличится (в 4 раза, если амплитуды обоих колебаний одинаковы), а в других уменьшится (наступит полная темнота, если амплитуды равны). Ясно, что этот случай следует различать от предыдущего (может, впрочем, случиться, что темные и светлые участки будут расположены так тесно, что будут сливаться для нашего глаза).

Различие между интерференцией и «обычным» наложением можно проиллюстрировать и на примере звуковых волн. Пусть в комнате, где был один громкоговоритель, включили второй. Если происходит «обычное» наложение, то в каждой точке звук станет громче. Если же происходит интерференция звука, то после включения второго динамика в одних точках может наступить «могильная тишина», тогда как в других звук станет громче.

¹ Докажем это для частного случая, когда лампы одинаковы и расположены рядом. Примем для простоты, что колебания в данной точке то удваиваются по амплитуде, то полностью гасятся. Энергия колебаний, как известно, пропорциональна квадрату амплитуды, значит, в моменты удвоения амплитуды энергия, а стало быть, и освещенность увеличивается в 4 раза. Теперь учтем, что половину всего времени данная площадка была темной. Значит, средняя освещенность увеличится не в 4 раза, а вдвое.

2. Колебания, способные интерферировать, называют когерентными. Чтобы выяснить, при каких условиях два колебания являются когерентными, рассмотрим графики, изображенные на рис. 103. В случае (а) оба колебания, дошедшие до данной точки, находятся в одинаковой фазе. Результирующее колебание всегда будет усиленным, значит, эти колебания являются когерентными. В случае (б) оба колебания в любой момент находятся в противофазе, значит, они всегда будут гасить друг друга, т. е. тоже будут когерентными. Не то будет в случае (в). В одни моменты колебания будут усиливаться, в другие — гаситься.

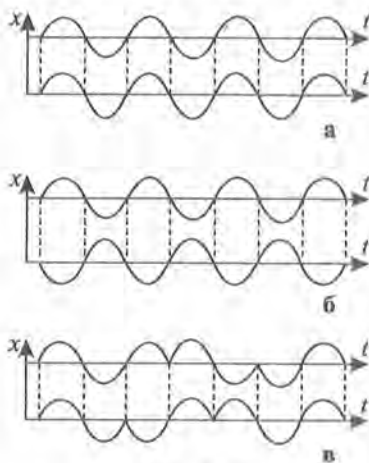


Рис. 103

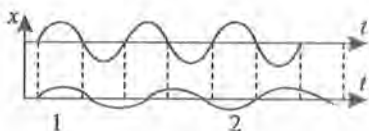


Рис. 104

Такой случай наложения не называют интерференцией, значит, эти колебания не будут когерентными.

Из этого примера видно, что если разность фаз двух колебаний часто меняется (как это было в последнем примере, где разность фаз сначала равнялась нулю, потом скачком изменилась и стала равной половине периода, потом снова стала равной нулю и т. д.), то эти колебания не являются когерентными. Если же разность фаз является постоянной (в первом примере она все время равнялась нулю, во втором — все время составляла половину периода), то колебания когерентны.

Мы рассматривали случай, когда колебания имели одинаковый период. Если периоды колебаний различны (рис. 104), то

сразу ясно, что интерференция быть не может, так как эти колебания то усиливаются (в момент 1), то гасятся (в момент 2).

Таким образом, чтобы колебания были когерентными, надо, чтобы их периоды были одинаковы, а разность фаз сохранялась постоянной.

3. Теперь выясним, почему две лампы не являются когерентными источниками. Можно добиться, чтобы они испускали свет одинаковой длины волны. Для этого можно закрыть их стеклами одинакового цвета, например, красными. Но этого мало. Надо еще чтобы разность фаз оставалась постоянной, а этого добиться невозможно. Свет испускается атомами, причем длительность излучения атома не превышает обычно одной стомиллионной доли секунды. Только после того, как этот атом получит (в результате теплового движения) новую порцию энергии, он начнет излучать новую порцию света (причем с другой начальной фазой). Если представить, что в каждом точечном источнике имеется по одному излучающему атому, то графики колебаний были бы похожими на те, что показаны на рис. 103в. На самом деле свет излучается миллионами атомов, но суть остается такой же: амплитуда результирующего колебания беспорядочно меняется. Освещенность каждой площадки экрана меняется с огромной частотой, но глаз усредняет эту картину и видит площадку освещенной равномерно.

§ 58. Роль разности хода

Пусть имеется два когерентных источника S_1 и S_2 , и пусть колебания в них происходят в одинаковых фазах. Каков будет результат наложения этих колебаний в произвольной точке M (рис. 105): будут ли они гасить друг друга или усиливать? Результат зависит от расположения этой точки. Если она равно удалена от обоих источников, то колебания, пришедшие в эту точку, будут запаздывать по фазе (по сравнению с колебаниями в «своем» источнике) на одну и ту же величину. Таким образом, оба колебания будут находиться в одинаковых фазах и результирующее колебание будет усиленным. Если же

точка M расположена ближе к одному из источников на полволны, то колебания придут в эту точку в противофазе и результирующее колебание будет ослабленным. Другие «крайние» случаи можно свести к этим двум: если разность путей ($r_1 - r_2$) или, как говорят, разность хода равна четному числу полуволин, колебания усилятся, если нечетному, — гасятся¹,

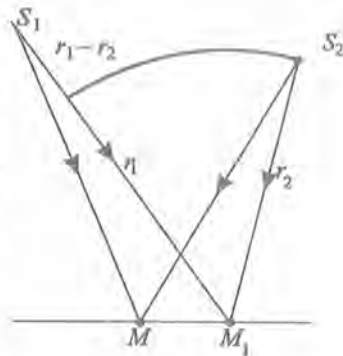


Рис. 105

при $r_1 - r_2 = 2n \frac{\lambda}{2}$ колебания усиливаются,

при $r_1 - r_2 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$ колебания гасятся.

Упр. 1. Перед колодецем, дно которого покрыто полупрозрачным для звука веществом, произнесли звук частотой 500 Гц. Толщина слоя вещества равна 30 см. Часть звуковых волн отражается от поверхности вещества, а часть проникает дальше и отражается ото дна (чтобы лучи не сливались, они на рис. 106 показаны не вертикальными, а наклонными). На сколько сантиметров путь одной отраженной волны больше, чем другой? Скольким полуволинам равна разность хода? Будет ли эхо усиленным или ослабленным по сравнению со случаем, когда дно бесконечно далеко от верхней поверхности

¹ Кому это не ясно, пусть представит двух бегунов, выступивших из точек S_1 и S_2 «с одной ноги» (например, с левой) и имеющих одинаковую длину шага. Пусть их пути сошлись в точке M . Если разность пройденных ими путей равна четному числу шагов (например, если один сделал 100 шагов, а другой 102 шага), то оба ступят в точку M с одной ноги (т. е. придут в эту точку «в одинаковой фазе»). Если же их пути отличаются на 1 шаг, на 3 шага и т. д., то один ступит правой, другой левой ногой (т. е. придут в эту точку «в противофазе»).

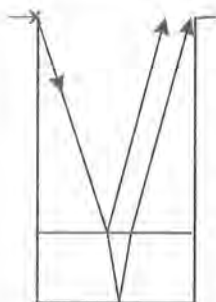


Рис. 106

слоя вещества? Скорость звука в веществе принять 600 м/с.

О т в е т: 60 см; одной полуволне; ослабленным.

Упр. 2. Решите ту же задачу для случая, когда глубина воды в колодце равна: а) 60 см; б) 75 см.

Упр. 3. Перед колодцем произнесли звук, который состоит из двух тонов одинаковой громкости. Частота одного тона 500 Гц, другого — 484 Гц (этому соответствует длина волны в веществе 120 см и 124 см). Поскольку разница в

частотах незначительна, примем, что оба звука воспринимаются человеческим ухом как один и тот же тон. Услышим ли мы эхо этого звука усиленным или ослабленным (по сравнению со случаем, когда дно колодца бесконечно далеко), если толщина слоя вещества: а) 30 см; б) 930 см?

У к а з а н и е. Предварительно рассчитайте разность хода (в полу волнах) для каждого тона.

О т в е т: В первом случае разность хода для обоих тонов равна одной полуволне и звук будет ослабленным. Во втором случае разность хода равна 31 полу волнам для первого тона и 30 — для второго. Интерференции в этом случае практически не будет.

§ 59. Зеркала Френеля

Две отдельные лампы, как мы выяснили, не могут быть когерентными источниками. Если источниками не являются лазеры, то когерентные колебания в оптике удастся получить только одним методом: заставить свет от одного и того же источника пройти до места наложения двумя разными путями. Рассмотрим, например, как это сделано в «зеркалах Френеля». Световые волны от монохроматического точечного источника доходят в этой установке до экрана двумя путями: одна часть отражается от одного зеркала, другая — от друго-

го (рис. 107). Эти две волны являются когерентными. В самом деле, пусть разность хода этих волн, сошедшихся вместе в точке M , равна одной полуволне, так что они будут гасить друг друга. Если теперь фаза колебаний в источнике внезапно изменится, например, на четверть периода, то на такую же величину изменится фаза колебаний в каждой из обеих волн, подошедших к точке M , так что они снова будут в противофазе.

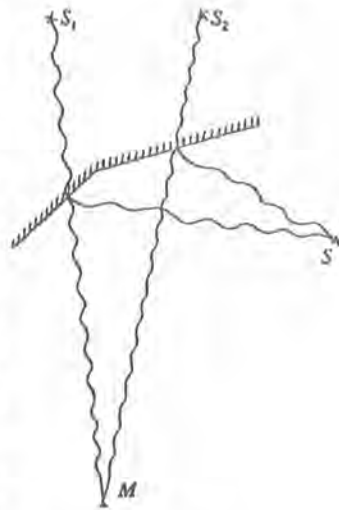


Рис. 107

При расчетах удобно считать, что волны приходят к экрану не от источника S , а от его мнимых изображений S_1 и S_2 . Ясно, что в точке экрана, равноотстоящей от обоих мнимых источников, будет светлая полоса (или лучше сказать, центр светлой полосы), так как разность хода для этой точки равна нулю. В некоторой соседней точке разность хода составит полуволны; там будет центр темной полосы. В еще более далекой точке разность хода составит две полуволны и т. д. Таким образом, на экране возникнут чередующиеся светлые и темные полосы (если одно из зеркал закрыть, то полосы исчезнут).

Упр. 1. Два когерентных источника, расположенные на расстоянии $2l$ друг от друга, удалены от экрана на расстояние L , где $L \gg l$ (рис. 108). На каком расстоянии « x » от центра экрана будет середина первой темной полосы, если длина волны равна λ ?

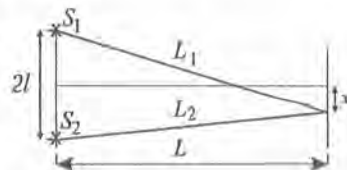


Рис. 108

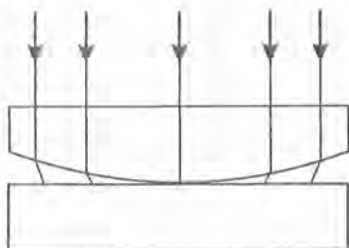


Рис. 112

длинной волны (например, 400 нм, что соответствует фиолетовому свету), ширина полос, а стало быть, и их расположение, изменится. Что будет, если осветить пленку белым светом? Белый свет является сложным, включающим все цвета радуги. Если пленка освещена белым светом, то это равносильно тому, что она одновременно освещена красной лампой, оранжевой, желтой и т. д. Если бы пленка в равной степени отражала все эти цвета, то она представлялась бы нам белой. Но так как для разных цветов разность хода (выраженная в полу волнах) в данной толщине пленки будет различной, то одни цвета будут в данном месте усиливаться, другие — гаситься. При смешении такого набора цветов белого света уже не получится. Если в данном месте пленки больше всего усиливается фиолетовый свет, то цвет пленки в этом месте будет близок к фиолетовому. В том месте, где больше всего усиливается синий цвет, цвет пленки будет близок к синему. Таким образом, при освещении белым светом пленки, имеющей разную толщину, разные участки пленки будут окрашены в разные цвета.

Упр. 1. Чему равна разность хода лучей, отраженных от передней и задней поверхности пленки (рис. 109), если длина волны в воздухе равна 600 нм, показатель преломления пленки равен 2 (а подложки — еще больше), $CA = 300$ нм, $CK = KB = 1500$ нм?

О т в е т: 9 полу волн.

ционные полосы в этом случае имеют форму колец («кольца Ньютона»).

З. До сих пор мы считали, что пленка освещается монохроматическим светом, например, красным ($\lambda = 760$ нм). При этом на пленке, если она имеет форму клина, возникают чередующиеся светлые и темные полосы. Если осветить пленку светом с другой

Упр. 2. Пленка, имеющая форму клина (рис. 111), освещена светом, длина волны которого (в пленке) равна: а) 600 нм; б) 300 нм. Что увидит наблюдатель в отраженном свете (свет или темноту) в местах, где толщина пленки равна: 150 нм, 300 нм, 450 нм?

Упр. 3. Чтобы самолет не отражал волн от радиолокатора (стал как бы невидимкой), можно использовать интерференцию волн, отраженных от передней и задней поверхности защитной пленки, покрывающей самолет. Какова должна быть толщина этой пленки, если длина волны радиолокатора (в пленке) равна 2 см?

Упр. 4. Будет ли меняться ширина колец Ньютона по мере удаления от центра? (Ответ пояснить рисунком.)

§ 61. Применение интерференции

1. Измеряя расстояние между интерференционными полосами, можно определить длину волны (если известны параметры данной установки).

2. Интерференция дает самый точный метод определения расстояний. Чтобы понять идею этого метода, допустим, что одно из двух зеркал Френеля приблизили к экрану (например, с помощью специального винта) так, что разность хода изменилась на полволны. Светлые полосы на экране сменяются в этом случае темными (и наоборот). Это дает возможность измерять перемещения с точностью до долей световой волны, т. е. доли мкм. Подсчитывая, сколько раз темные полосы сменяются светлыми, можно выражать перемещения в длинах световых волн. Таким образом воспроизводился до недавнего времени эталон метра и в настоящее время проверяются мерительные плитки (штитки, применяемые для проверки точных измерительных приборов). Конструкции таких установок, разумеется, отличаются от установок, используемых в зеркалах Френеля.

3. Просветление оптики (термин «оптика» тут означает не учение о свете, а оптические устройства: объективы, окуляры и т. п.). На границе между стеклом и воздухом часть светового потока (около 5%) отражается. В объективе, содер-

жащем 4 линзы (т. е. 8 отражающих поверхностей), потери света на отражение составляют более одной трети, а в более сложных системах — свыше 80%. В военном деле отражение неприятно еще и потому, что демаскирует прибор (появляются «блики»). Если покрыть поверхность линзы пленкой толщиной в четверть длины волны, то лучи, отраженные передней и задней поверхностями пленки, погасят друг друга. Отраженных лучей не будет, значит 100% падающего света проникают в линзу (разумеется, мы рассматриваем «идеальный» случай). Обработанные таким образом приборы называют просветленными. Полного просветления можно достигнуть (если не применять многослойных пленок) только для одной длины волны. Выбирают ту длину волны, которая лучше всего воспринимается глазом (550 нм).

4. Проверка качества полированных поверхностей. На проверяемую поверхность ставят прозрачную эталонную пластинку, слегка наклоненную, чтобы между ней и поверхностью возник воздушный клин. В отраженном свете наблюдают интерференционные полосы. Если на исследуемой поверхности имеется выступ или впадина, то интерференционная полоса в этом месте будет искажена.

5. Интерференционные фильтры в кинопроекторах. Между лампой и кинопленкой во избежание перегрева и порчи пленки желательно ставить фильтр, пропускающий видимый свет и отражающий инфракрасные лучи. Фильтр состоит из стеклянной пластинки и нанесенной на нее пленки. Толщина ее подобрана так, чтобы она пропускала видимые лучи и отражала инфракрасные. Пленку делают многослойной, чтобы отражались инфракрасные лучи с разной длиной волны (толщина каждого слоя равна $1/4$ длины волны, подлежащей отражению).

§ 62. Дифракция волн

1. *Дифракцией называют способность волн огибать препятствия.* Дифракцию звуковых волн мы наблюдаем на каждом шагу, тогда как дифракцию световых волн можно на-

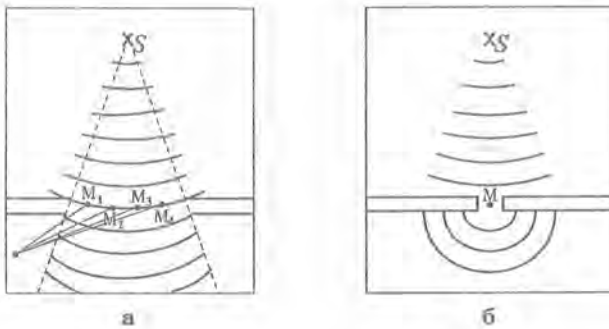


Рис. 113

блюдать лишь в особых условиях. Так, мы не перестаем слышать собеседника, если он завернул за угол дома, но мы перестаем его видеть. Это различие в свойствах звуковых и световых волн обусловлено не тем, что они имеют разную природу (звуковые колебания — механические, а световые — электромагнитные), а тем, что длина световых волн в отличие от звуковых очень мала (от 400 до 760 нм). Размеры обычных предметов во много раз больше длины световых волн, а в этом случае дифракция становится заметной лишь на большом расстоянии от этих предметов. Например, если на пути света расположена непрозрачная перегородка с отверстием размером с монету, то заметное искажение формы тени на экране получилось бы при удалении экрана на несколько километров. Если же размер отверстия составляет сотые доли миллиметра, то дифракцию можно обнаружить, помещая экран в той же комнате.

Различие в дифракционной картине от больших и малых отверстий легко наблюдать на опытах с волнами на воде. Если на пути волн в ванночке в одном случае поставить преграду с широкой щелью (рис. 113а), а в другом — с узкой (рис. 113б), то в первом случае непосредственно за щелью появится резкая «тень» (т. е. область, где колебаний нет), во втором же случае волны расходятся по всем направлениям.

Чтобы объяснить дифракцию волн от узкой щели (рис. 113б), можно рассуждать так. Точка M , до которой дошли колебания

от S , ничем не хуже этой «первоначальной» точки. Если от точки S расходились кругами волны по всем направлениям, то и от M , когда в ней начались колебания, должны расходиться волны. Это рассуждение приводит к выводу, что каждую точку, до которой дошли колебания, можно рассматривать как самостоятельный источник колебаний (это утверждение составляет первую часть принципа Гюйгенса).

Может показаться непонятным, почему от широкой щели все же получается тень. Для объяснения надо учесть интерференцию волн. Широкую щель можно рассматривать как совокупность множества узких щелей: $M_1, M_2, M_3 \dots$. Чтобы выяснить, будут ли в данной точке происходить колебания или нет, надо рассчитать, каков будет результат интерференции волн, пришедших в данную точку от разных точек щели. Такой расчет впервые сумел сделать Френель. Результат находится в соответствии с опытом: вне пунктирных линий колебания почти полностью погасаются.

2. Вследствие дифракции тень от предмета может не подходить на предмет и иметь вид довольно сложного узора. В простейшем случае, когда свет падает на круглый маленький диск (рис. 114), вместо сплошной круглой тени на экране получается ряд светлых и темных колец (интересно, что в самом центре «геометрической тени» возникает яркое светлое пятно). При прохождении света сквозь малое круглое отверстие вместо четкого яркого кружка на экране также возникают чередующиеся кольца. Форму дифракционной картины и освещенность отдельных ее частей удалось (для этих и многих других случаев) рассчитать, используя первую часть принципа Гюйгенса и рассматривая результат интерференции «вторичных волн», дошедших до данной точки от каждой точки волнового фронта, окружающего диск (или — в случае отверстия — фронта волны в этом отверстии).

3. Если размеры предмета или размеры отверстия во много раз больше длины волны, то обычно дифракция никак не проявляется. Но иногда она сказывается и в этих случаях. Так, вследствие дифракции света изображение точки, даваемое линзой (идеальной с точки зрения геометрической оптики), получается не в виде точки, а в виде пятна (окружен-

ного рядом менее ярких колец). Изображения двух достаточно близких точек могут слиться при этом в единое пятно. Сколько бы мы ни увеличивали это изображение с помощью добавочных линз, мы не сможем эти точки различить отдельно и узнать, сколько их было и как они

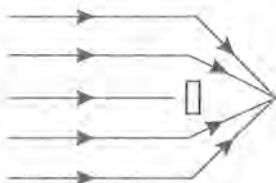


Рис. 114

расположены друг относительно друга. Попытки увидеть новые подробности, взглянув на изображение, даваемое одним микроскопом, через другой микроскоп, так же бесплодны, как попытки прочесть неразборчивую подпись, увеличив ее в тысячи раз. Ничего нового при таком увеличении мы не обнаружим. Расчет показал, что вследствие дифракции ни один микроскоп не может дать возможности различить раздельно (или, как говорят оптики, разрешить) детали,

отстоящие друг от друга ближе, чем на $\frac{\lambda}{2}$. В объекте,

который меньше этой величины, мы не можем различить никаких подробностей. Если же объект во много раз меньше этой величины, то мы вообще не получим его изображения, даже искаженного дифракцией.

Аналогичные ограничения накладывает дифракция на возможности телескопа. Если угол, под которым видны две звезды, меньше определенной величины, то их невозможно различить раздельно.

4. В настоящее время сравнительно широкое применение нашли электронные микроскопы, где изображение создается не светом, а потоком электронов, пронизывающих исследуемый объект. Это изображение делается видимым при помощи люминесцирующего (как в кинескопе телевизора) экрана. Электроны (как это выяснили в 20-х годах XX века) обладают волновыми свойствами, поэтому у электронного микроскопа, как и у оптического, существует предел «разре-

шающей силы», обусловленной дифракцией электронов. Однако длина «электронных волн» во много раз меньше световых, поэтому и предел этот соответственно выше. Разрешающая сила современных электронных микроскопов в тысячи раз выше, чем у оптических (это позволяет получать увеличения в 1 000 000 раз).

§ 63. Дифракционная решетка

1. Одним из приборов, где используется дифракция света, является дифракционная решетка. Этот прибор широко используется при исследовании спектров разных веществ и для измерения длин световых волн. Дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных узких щелей, разделенных равными непрозрачными промежутками (рис. 115). Ее можно сделать из стекла, роль непрозрачных промежутков играют царапины, нанесенные особой машиной (в лучших таких решетках число царапин достигает полутора тысяч на каждый миллиметр; новейшая технология, использующая интерференцию лазерных лучей на фоторезисторах, довела число штрихов до 6000 на 1 мм). Расстояние между серединами соседних щелей d называют периодом решетки.

На решетку нормально к ее плоскости направляют от удаленного точечного источника пучок параллельных лучей. Рассмотрим сначала случай, когда эти лучи монохроматиче-

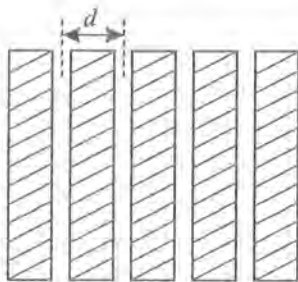


Рис. 115

ские, т. е. содержат излучение только одной определенной длины волны, например, соответствующей красному цвету. Проходя сквозь щели решетки, эти лучи попадают на линзу, в фокальной плоскости которой расположен экран (рис. 116). Линза с экраном установлена на поворотном столике, решетка же закреплена неподвижно. Если столик установлен точно

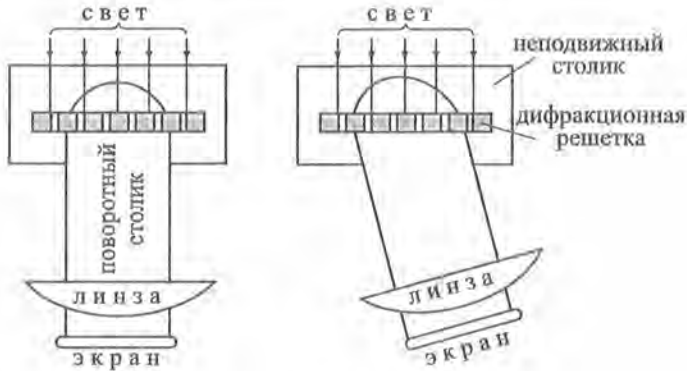


Рис. 116

посередине, то в середине экрана появляется узкая светлая полоса (параллельная щелям решетки). Если столик поворачивать, то в середине экрана будет появляться попеременно то темная, то светлая полоса в зависимости от того, на какой угол повернут столик. Выясним, почему так получается.

Каждую щель дифракционной решетки можно рассматривать как самостоятельный источник света, от которого исходят волны по всем направлениям. Выберем среди этих направлений какое-либо одно, составляющее угол φ с направлением падающих на решетку лучей, и установим столик вдоль этого направления (рис. 117). Все показанные на рисунке лучи этого пучка соберутся в фокусе линзы. Что получится в этой точке: свет или темнота? Это зависит от того, придут ли сюда лучи из разных щелей в одной фазе или в противоположных фазах. Выясним, как это связано с величиной угла φ .

Проведем плоскость AB , перпендикулярную пучку, и выясним, с какой разностью хода приходят к этой плоскости лучи, прошедшие сквозь соседние щели. Эти лучи вышли из одной, бесконечно далекой точки источника и, следовательно, подошли к щелям в одинаковых фазах. Из рис. 117 видно, что к плоскости AB эти лучи придут с разностью хода, равной

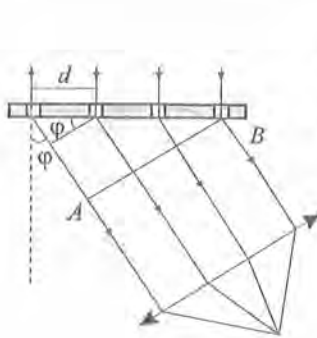


Рис. 117

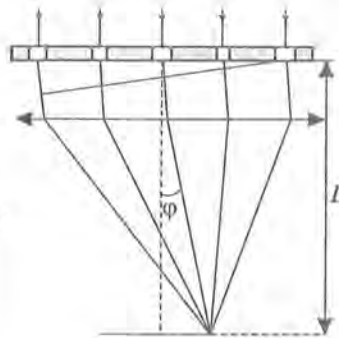


Рис. 118

$d \sin \varphi$. Можно показать (мы примем это «на веру»), что разность хода, с которой приходят лучи к плоскости AB , сохранится и после того, как эти лучи сфокусируются линзой. Другими словами, линза не вносит добавочной разности хода по сравнению с той, что была в плоскости AB .

Если разность хода двух соседних лучей равна нечетному числу полуволин, то эти два луча, сойдясь в одной точке, погасят друг друга. Так же попарно погасятся и другие пары лучей. В этом случае в середине экрана будет темнота. Если же угол φ таков, что разность хода соседних лучей равна четному числу полуволин, то колебания придут в середину экрана в одинаковой фазе. В этом случае в центре экрана появится светлая полоса. Это будет при условии, что

$$d \sin \varphi = 2n \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где n — любое целое число; 0, 1, 2, 3 ... Полоса, возникающая при $n = 0$, называется нулевой; полоса, соответствующая $n = 1$, называется первой и т. д. Очевидно, имеются две первые полосы, расположенные симметрично по отношению к нулевой, две вторые и т. д.

2. Если экран не очень узкий, то можно, не вращая столика, одновременно наблюдать на экране ряд полос: нулевую, первые, вторые и т. д. Из рис. 118 видно, что формула (1) справедлива и для этого случая.

Упр. 1. Рассчитайте, при каких значениях $\sin \varphi$ будут получаться светлые полосы, если период решетки равен 10 000 нм, а длина волны 500 нм.

О т в е т: 0; 0,05; 0,10 и т. д.

§ 64. Спектр дифракционной решетки

Мы видели, что если решетку осветить монохроматическим светом, то на экране появятся светлые полосы: нулевая, первые, вторые и т. д. Если осветить решетку светом с другой длиной волны, то светлые полосы появились бы в других местах. Например, при фиолетовом свете первая светлая полоса появится при меньшем угле, чем при красном, так как длина волны фиолетового света меньше, чем красного.

Что будет, если осветить решетку белым светом? Это равносильно тому, что решетка одновременно освещена всеми цветами радуги — от красного до фиолетового. Ясно, что нулевая полоса будет белой, так как при $\varphi = 0$ разность фаз лучей, проходящих к плоскости AB (перпендикулярной пучку), равна нулю для лучей любого цвета. Поэтому для лучей любого цвета в середине экрана будет светлая полоса, а при смешивании в одном месте всех цветов радуги получается белый свет.

Если столик повернуть, то разность хода для лучей с данной длиной волны уже не будет равна нулю. При некотором угле она станет равной одной полуволне, а при дальнейшем увеличении угла достигнет двух полуволн. Первым это условие будет выполнено для фиолетовых лучей, так как их длина волны наименьшая. Если разность хода для фиолетовых лучей будет равна двум полуволнам, то соответствующая полоска будет фиолетовой, так как остальные лучи в этом месте полностью или частично погасятся. При дальнейшем увеличении угла наступит момент, когда усиливаться будет

синий цвет и т. д. вплоть до красного. Таким образом, на экране появятся один за другим все цвета спектра. Его называют спектром первого порядка. При дальнейшем увеличении угла снова поочередно начнут появляться все цвета спектра от фиолетового до красного — спектр второго порядка и т. д. Расчет (см. *упр. 1* к этому параграфу) показывает, что спектры высоких порядков перекрываются: еще до того, как закончилось разворачивание спектра одного порядка, начнет разворачиваться спектр следующего порядка.

Упр. 1. На решетку с периодом 10 000 нм падает нормально к ней белый свет, т. е. все цвета спектра от фиолетового (длина волны 400 нм) до красного (760 нм). Рассчитайте, при каких значениях $\sin \varphi$ появится на экране первая фиолетовая и первая красная полоса, вторая фиолетовая и вторая красная, третья фиолетовая и третья красная. Результаты расчета занесите в следующую таблицу:

$\sin \varphi$	1	2	3
Для фиолетового			
Для красного			

Упр. 2. Пусть расстояние от решетки до экрана $L = 50$ мм (рис. 118). Пользуясь данными таблицы (см. *упр. 1*), рассчитайте по формуле $x = L \sin \varphi$, на каком расстоянии от центра экрана появятся начало и конец спектра первого порядка, второго и третьего. По этим данным постройте в масштабе 1:1 картину спектра дифракционной решетки, как это намечено вчерне на рис. 119.

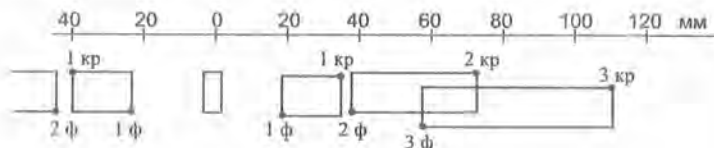


Рис. 119

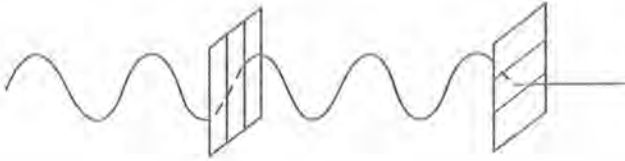


Рис. 120

§ 65. Поляризация света

1. Дифракция и интерференция свойственны как продольным, так и поперечным волнам, и в теории дифракционной решетки или зеркал Френеля ничего не изменилось бы, если бы световые волны были не поперечными, а продольными. Но существуют процессы, где это различие проявляется. Рассмотрим это сначала на примере механических волн. Если на пути резинового шнура, колебания которого происходят в некоей плоскости (рис. 120), поставить решетку, прутья которой параллельны этой плоскости, то колебания будут свободно передаваться через решетку. Если же повернуть решетку на 90° (как показано на том же рисунке), то колебания дальше передаваться не будут. В случае же продольной волны (например, продольной волны, бегущей по пружине) как ни поворачивать решетку, ничего не изменится. Таким образом, свойства продольной волны симметричны по отношению ко всем плоскостям, проведенным через направление луча, для поперечных же волн такой симметрии нет, так как в одной из этих плоскостей происходят колебания. Про колебания, которые происходят в определенной плоскости P , говорят, что они поляризованы в этой плоскости.

Световые волны, как и другие электромагнитные волны, являются поперечными (отметим заодно, что ощущение света в глазу и потемнение фотопленки вызывается вектором \vec{E}). Обычные источники света создают такие колебания, которые совершаются во всевозможных плоскостях (рис. 121).

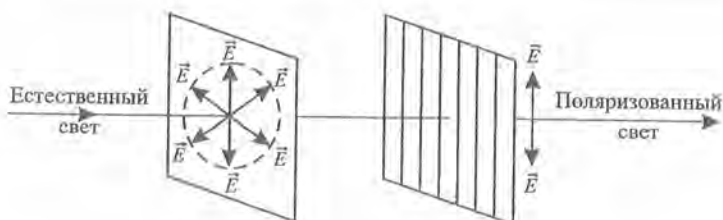


Рис. 121

Такой свет называют естественным или неполяризованным. При отражении света или при прохождении его через некоторые вещества он может стать поляризованным. Это значит, что теперь вектор \vec{E} колеблется только в одной определенной плоскости. Пластинку, выделяющую поляризованный свет, называют поляроидом.

Если пропустить сквозь поляроид естественный свет, то при любых поворотах поляроида интенсивность прошедшего сквозь него света будет одинаковой, но если пропустить естественный свет сквозь два поляроида, расположенных один за другим, то при повороте одного из них яркость пятна на экране будет постепенно меняться и, когда оба поляроида будут перпендикулярны друг другу, на экране будет полная темнота. Механическая аналогия этого явления такова (рис. 120). Если создавать в резиновом шнуре поперечные колебания так, чтобы они происходили то в одной плоскости, то в другой, то в третьей и т. д., то сквозь первую решетку пройдут только колебания, поляризованные в одной плоскости. При повороте второй решетки амплитуда прошедшей сквозь нее волны будет меняться и уменьшится до нуля, когда прутья решетки будут перпендикулярны друг другу.

2. Расскажем о некоторых применениях поляризованного света. В сахаряметрах используются свойства некоторых веществ поворачивать плоскость поляризации. Между двумя поляроидами, установленными накрест, ставят ванну с раствором сахара. При этом поле зрения просветляется. Угол поворота плоскости поляризации пропорционален концентрации сахара в ра-

створе. Измерив угол поворота, при котором темнота восстанавливается, можно сразу определить концентрацию сахара.

Если поляроиды станут дешевыми, для них можно найти много других применений. Например, чтобы устранить слепящее действие фар встречных автомашин, можно бы устанавливать на фарах и на смотровых стеклах поляроиды «параллельно» друг другу, но так, чтобы плоскость поляризации прошедшего света составляла 45° с горизонтом (рис. 122). Водитель будет видеть предметы, освещенные собственными фарами, свет же от встречных фар, как видно из рисунка, будет невидим.

3. Колебания, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, не интерферируют друг с другом. Это используется в технике связи на радиорелейных линиях для одновременной передачи сигналов в двух противоположных направлениях на одной и той же длине волны (эти линии работают на сантиметровых и дециметровых радиоволнах). Один ретранслятор посылает в сторону соседа волны, поляризованные горизонтально, а тот ему — поляризованные вертикально. Они не мешают друг другу распространяться в одном и том же пространстве.



Рис. 122

§ 66. Шкала электромагнитных волн

Видимый свет занимает небольшую часть шкалы электромагнитных волн (рис. 123). Вся шкала охватывает следующие диапазоны (в порядке убывания длины волны): радиоволны, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские, гамма-лучи. Границы диа-

в) при повышении температуры максимум излучения и «граница» излучения смещаются в сторону коротких волн;

г) при повышении температуры излучение в любом интервале возрастает¹.

Эти результаты находятся в соответствии с фактами, хорошо известными из повседневного опыта. Любое нагретое тело, например утюг, излучает энергию в виде невидимых инфракрасных лучей. Мы «ощущаем» это излучение по тому теплу, которое возникает в нашей коже, когда лучи поглощаются. При повышении температуры (до 600–700°С) начинает излучаться также видимый свет — сначала только красный (мы говорим: тело накалено докрасна). Суммарное излучение при этом возрастает — тело «пышет» жаром. При дальнейшем повышении температуры, помимо красного, начинают излучаться волны с меньшей длиной волны: оранжевые, желтые и т. д. Когда в составе излучения будут все цвета спектра (в определенной пропорции), мы видим тело накаленным добела. Если бы мы могли накалить тело еще сильнее, максимум излучения сместился бы еще дальше в сторону коротких волн, и тело стало бы голубым (самые горячие звезды кажутся нам голубыми).

Упр. 1. Рассмотрите следующую таблицу. В верхней строчке указана температура тела, а в нижней — волна, на которую приходится максимум излучения.

T	4 К	273 К (0°С)	1000 К	3000 К	6000 К	10^4 К	10^5 К
λ_{max}	0,72 мм	10,5 мкм	2900 нм	960 нм	480 нм	290 нм	29 нм

¹ Строго говоря, эти графики относятся к некоторым идеальным излучателям, которые физики называют «абсолютно черными телами». Так называют тело (даже если оно накалено добела), способное поглощать все падающие на него лучи. Излучение реального тела в любом интервале волн не может превышать излучение абсолютно черного тела в этом интервале.

Упр. 2. Объясните, в каком случае к. п. д. лампы накаливания выше: при температуре нити 1000 К или 3000 К?

Упр. 3. Как, исследуя спектр звезды, можно определить ее температуру?

Упр. 4. Опыт и теория показывают, что суммарная энергия, излучаемая телом, пропорциональна T^4 (закон Стефана—Больцмана). При $T = 6000$ К (температура поверхности Солнца) каждый квадратный сантиметр поверхности абсолютно черного тела излучает поток энергии в 7,4 кВт. Каков будет этот поток при $T = 600$ К? 60 000 К?

§ 68. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи

1. Инфракрасными называли невидимые лучи, расположенные за красной частью спектра (т. е. лучи, длина волны которых больше 760 нм). Они были обнаружены (в 1800 г. английским астрономом В. Гершелем) по тепловому действию. Когда за красную границу солнечного спектра поместили зачерненную полоску, то она нагрелась. Впоследствии обнаружили, что источником инфракрасных лучей является любое тело. Если излучаемая энергия достаточно велика, мы можем обнаружить ее по тому теплу, которое возникает в нашей коже, когда она поглощает эти лучи.

В технике инфракрасные лучи используются для быстрой сушки материалов и изделий. При обычной (не инфракрасной) сушке сначала нагревается воздух, затем поверхность изделия, затем следующий по глубине слой и т. д. Чтобы ускорить сушку, надо воздух нагреть сильнее, но тогда между отдельными слоями изделия возникают большие перепады температур, что приводит к появлению трещин, короблению и т. п. При инфракрасной сушке используется то обстоятельство, что многие вещества в некоторой степени прозрачны для инфракрасных лучей, поэтому внутренние слои можно прогревать одновременно с поверхностными, независимо от них. Если слои тела имеют разную структуру, то можно подобрать такую длину волны, чтобы наиболее интенсивное выделение тепла происходило в определенном слое (например, можно

сварить вкрутую желток яйца, оставив белок сырым). Для большинства материалов наиболее интенсивное поглощение энергии, связанное с выделением тепла, происходит в диапазоне инфракрасных волн.

Наиболее широко инфракрасный нагрев используется при сушке лакокрасочных изделий: кузовов автомашин, изоляции катушек и других электротехнических изделий. Иногда так сушат текстильные изделия, пластмассы, химические продукты и т. д. Время сушки сокращается в несколько раз (до 10 раз) по сравнению с сушкой в обычных печах.

2. В качестве источника инфракрасных лучей обычно используют лампу накаливания. Нить ее накаливают до такой температуры, при которой интенсивное излучение происходит в нужной нам области спектра. Часть баллона лампы делают в виде отражателя (этой части придают форму параболоида и покрывают тонким слоем серебра или алюминия).

Широко используются печи для приготовления пищи инфракрасным нагревом (электрогрили, электротостеры, электрошашлычницы). Подбирается такая длина волны, чтобы излучение проникало в продукты на наибольшую глубину. Продукты располагаются на решетках и практически не соприкасаются с нагретой поверхностью, поэтому отпадает необходимость в жирах. Вкусовые качества заметно отличаются от «обычных» (в лучшую сторону), так как нагрев происходит в других условиях и при более низкой температуре, чем обычно.

3. Тело, температура которого выше окружающей среды, может быть обнаружено по его инфракрасному излучению. Это используется в военной технике для обнаружения судов, самолетов, ракет, а также для самонаведения управляемых снарядов. Приемником инфракрасного излучения может служить терморезистор, помещенный в фокусе вогнутого параболического зеркала. Возникший ток усиливается электронным устройством и используется (в случае управляемого снаряда) для управления рулями. Если даже самолет, за которым «гонится» снаряд, будет рыскать, снаряд сумеет его поразить (дальность действия такого снаряда составляет около 15 км).

При запуске межконтинентальных ракет выделяется (в течение около 5 минут) столько тепла, что несколько спутников, снабженных инфракрасной аппаратурой, могут обнаружить запуск, в какой бы точке земного шара он ни был произведен.

4. С помощью инфракрасных лучей можно фотографировать в полной темноте. Для этого надо пользоваться специальными фотоматериалами, так как обычные к таким лучам нечувствительны. Чтобы получить моментальный снимок, надо включить мощный источник инфракрасных лучей. Можно использовать и обычный источник, закрыв его эбонитом или другим фильтром, прозрачным для инфракрасных лучей и непрозрачным для видимых.

В военной технике используются инфракрасные прицелы, действующие в полной темноте. Лучи, созданные прожектором инфракрасных лучей, отражаются от цели, улавливаются телескопом и преобразуются с помощью электронно-оптического преобразователя в видимое изображение. Дальность действия определяется мощностью прожектора (для прицела, устанавливаемого на автомате, она достигает 100 м, для танка — 1 км).

5. Ультрафиолетовыми называют невидимые лучи, расположенные за фиолетовой частью спектра (т. е. лучи, длина волн которых меньше 400 нм). Они были открыты вскоре после открытия инфракрасных лучей (в 1801 г.). Характерные свойства этих лучей таковы:

- а) они вызывают свечение (люминесценцию) многих веществ;
- б) сильно ионизируют воздух;
- в) обладают сильной химической и биологической активностью.

Свечение, вызванное ультрафиолетовыми лучами, используют в люминесцентных лампах. Эти лампы заполнены парами ртути. При пропускании тока атомы ртути, возбужденные ударами электронов, испускают ультрафиолетовые лучи. Стенки лампы покрыты изнутри составами (люминофорами), которые светятся под действием этих лучей.

Благодаря действию ультрафиолетовых лучей Солнца воздух на большой высоте сильно ионизирован. Этот слой (ионосфера) во многом определяет условия распространения радио-

волн разных диапазонов. У самой поверхности Земли ионизация незначительна, так как лучи сильно поглощаются в верхних слоях.

Химическая активность лучей проявляется в том, что они разрушают некоторые красители (обесцвечивают окрашенные изделия), вызывают почернение фотопленки (разлагают бромистое серебро), кислород могут превращать в озон.

Биологическая активность проявляется в том, что многие бактерии гибнут под действием ультрафиолетовых лучей, а у некоторых происходит задержка роста и размножения. Многие нежелательные изменения в тканях человека замедляются или даже прекращаются под действием ультрафиолетовых лучей. Загар также возникает под действием этих лучей. Ультрафиолетовые лампы используют для стерилизации воздуха в операционных и перевязочных, а также в рабочих помещениях пищевой и фармацевтической промышленности. Используют их также в лечебной практике. Ультрафиолетовые лучи могут вызвать и вредные действия, например, ожоги. Особенно вредно действуют они на сетчатку глаза, поэтому при работе с такими лучами принимают ряд мер предосторожности.

В качестве источника ультрафиолетовых лучей чаще всего используют ртутные газоразрядные лампы. Стекло непрозрачно для таких лучей, прозрачен кварц. При исследовании ультрафиолетового спектра надо применять кварцевые призмы или дифракционные решетки.

§ 69. Рентгеновские лучи

1. Электромагнитные волны, длина волны которых меньше ультрафиолетовых, называют рентгеновскими (по фамилии немецкого физика Рентгена, открывшего их в 1895 г.). Рентгеновские лучи возникают, в частности, при торможении быстрых электронов. Рентгеновская трубка состоит из вакуумного баллона, в котором расположены два электрода: катод и анод (рис. 126). Накаленный с помощью нити накала катод испускает электроны, которые ускоряются высоким напряжением (несколько десятков тысяч вольт), приложенным между

анодом и катодом. Попадая на анод, электроны тормозятся и испускают рентгеновские лучи.

Свойства рентгеновских лучей сходны со свойствами ультрафиолетовых: они вызывают свечение (люминесценцию) некоторых веществ, сильно ионизируют воздух, действуют на фотопленку, обладают сильной химической и биологической активностью, причем все эти свойства они обнаруживают в более сильной степени, чем ультрафиолетовые лучи.

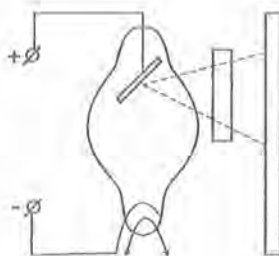


Рис. 126

Рентгеновские лучи способны проникать через многие вещества, непрозрачные для видимого света. Это широко используется в медицине: изображение внутренних органов можно наблюдать на люминесцирующем экране или на фотопленке. Схема установки для просвечивания показана на рис. 126. Таким же способом можно просвечивать ответственные детали, обнаруживая скрытые внутри дефекты, например, раковины (т. е. пустоты) в отливках.

Рентгеновские лучи используют для уничтожения клеток, пораженных раком. Но эти лучи могут оказывать и вредное действие: облучение большой дозой может привести к тяжелым заболеваниям. Поэтому при работе с рентгеновскими лучами применяют ряд защитных мер: используют свинцовые экраны, защитные стекла с большим содержанием свинца, одежду из резиновой ткани, содержащей свинец, и т. п.

2. Длина волны рентгеновских лучей в тысячи раз меньше, чем у видимого света, поэтому обнаружить их волновые свойства обычными дифракционными решетками при нормальном падении лучей нельзя (это то же самое, что использовать для видимых лучей решетку Летнего сада). Роль пространственной дифракционной решетки может играть кристалл с его правильно расположенными атомами. При пропускании рентгеновских лучей сквозь кристалл на фотопленке возникает дифракционная картина в виде определенного узора (рис. 127). По этим узорам удалось рассчитать

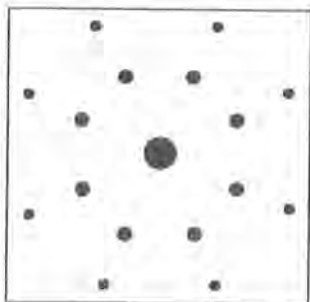


Рис. 127

длину волны рентгеновских лучей.

С другой стороны, зная длину волны, можно определить расположение атомов в тех кристаллах, где это расположение неизвестно.

3. Волны короче рентгеновских называют гамма-лучами. Впервые они были обнаружены среди излучений радиоактивных веществ.

ГЛАВА 5

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 70. Инерциальные системы отсчета (повторение)

При формулировке законов физики мы пользовались инерциальной системой отсчета. Так называется система отсчета, в которой справедлив закон инерции, а с ним и остальные законы Ньютона. В такой системе отсчета законы природы принимают наиболее простой вид. Любая система, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно инерциальной, также является инерциальной. Землю с достаточной для большинства случаев точностью можно считать инерциальной системой. В тех случаях, когда неинерциальностью Земли нельзя пренебречь (например, при расчете движения спутников и космических кораблей), инерциальной считают гелиоцентрическую систему, т. е. такую систему отсчета, где центр координат мысленно помещен в центре Солнца, а оси направлены к трем удаленным звездам. Эту систему отсчета мы будем условно называть «покоящейся».

§ 71. Принцип относительности Галилея и принцип относительности Эйнштейна

1. Галилей первый отметил, что в равномерно движущемся корабле все механические явления происходят так же, как на земле. Если на таком корабле играть в бильярд или в теннис, или в футбол, то все будет происходить точно так же, как если бы он стоял неподвижно. Какие бы тонкие наблюдения ни проводились в таком корабле (имеется в виду, что он движется действительно равномерно — без качки и вибрации) над мячиками, над волчками, над любыми другими движущимися или покоящимися телами, мы не заметили бы никаких отклонений от тех результатов, которые вытекают из законов механики, установленных на Земле. Тот факт, что все механические явления происходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета, называют принципом относительности Галилея. Иногда удобна «отрицательная» формулировка этого принципа: никакими механическими опытами нельзя установить, покоится ли данная система относительно «покоящейся системы» или движется с постоянной скоростью.

2. Тот факт, что принцип относительности ограничен только механическими явлениями, представляется логически неудовлетворительным. Хотя мы для удобства изучения разделяем происходящие в природе процессы на механические, электрические, оптические и т. п., следует признать, что «чисто механических» явлений не существует. Классическим примером чисто механического явления является упругий удар шаров. Но силы, действующие между атомами шаров, относятся к электромагнитным, и если бы законы электромагнетизма в разных инерциальных системах отсчета были разными, то и законы удара в разных системах были бы разными. Кроме того, информацию о любом механическом явлении мы получаем с помощью света (используя иногда сложные оптические системы: зеркала, микроскопы, телескопы, интерферометры), стало быть, опять-таки нет смысла говорить о «чисто механических» явлениях. Таким образом, если природа устроена так, что ее законы одинаковы во всех инерциальных системах, то, видимо, это должно относиться

ко всем явлениям природы, а не только к механическим. Таким образом, можно предположить, что все явления природы (а не только механические) происходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Это утверждение называют принципом относительности Эйнштейна. Этот принцип также допускает «отрицательную» формулировку: никакими опытами (не только механическими, но и любыми другими) нельзя установить, покоится ли данная система относительно «покоящейся системы» или же движется с постоянной скоростью. Играем ли мы в теннис, смотрим ли в зеркало, ставим ли опыт по электромагнитной индукции — все без исключения явления происходят одинаково, по одним и тем же законам, во всех инерциальных системах отсчета.

Упр. 1. В вагоне, движущемся равномерно, уронили яблоко. Не противоречит ли принципу относительности Галилея тот факт, что траектории яблока в разных системах будут разными: относительно вагона яблоко движется прямолинейно, а относительно Земли — по параболе?

О т в е т: Когда мы говорили, что все механические явления в двух системах происходят одинаково, то подразумевалось, что начальные условия были при этом одинаковыми. В нашем примере начальные условия были разными: в системе отсчета, связанной с вагоном, начальная скорость яблока равнялась нулю, а в системе, связанной с Землей, яблоко обладало начальной скоростью, направленной горизонтально.

§ 72. Постоянство скорости света

Опыт показывает, что скорость света в вакууме одинакова для всех наблюдателей и не зависит от относительного движения источника и наблюдателя. Это видно, например, из наблюдений за двойными звездами. Пусть одна из звезд, входящих в такую систему, сначала удалялась от Земли со скоростью v , а через некоторое время стала приближаться к ней (рис. 128). Если бы скорость света складывалась с относительной скоростью звезды относительно Земли, подобно тому, как

скорость камня, брошенного из автомашины, складывается со скоростью машины, то скорости света в этих случаях были бы разными. В одном случае скорость света относительно Земли равнялась бы $c + v$, а в другом — $c - v$. При огромных расстояниях, характерных для звезд, могло бы случиться, что второй луч, хотя он вышел после первого, на долгом пути до Земли обгонит первый или придет одновременно с ним. Тогда мы увидели бы эту звезду во втором положении раньше, чем в первом или одновременно в двух положениях. Однако такого раздвоения или иных нерегулярностей никогда не наблюдалось. Двойные звезды согласно наблюдениям с Земли движутся так, как это предписывается законами Ньютона. Это доказывает, что свет никогда не обгоняет свет, т. е. что скорость света (в вакууме) всегда одинакова.



Рис. 128

§ 73. Кажущаяся несовместимость двух постулатов

1. В основу теории относительности Эйнштейн положил два постулата: а) во всех инерциальных системах отсчета законы природы одинаковы, или иначе, никакими опытами нельзя установить, покоится ли данная система отсчета относительно «покоящейся системы» или движется с постоянной скоростью; б) скорость света в вакууме одинакова для всех наблюдателей. На первый взгляд, эти постулаты кажутся несовместимыми. В самом деле, представим, что в вагоне, который движется относительно Земли со скоростью v (рис. 129), включили прожектор. Согласно постулату о равноправии всех инерциальных систем свет будет убежать от прожектора с такой же скоростью $c = 300\,000$ км/с, как при неподвижном вагоне. Скорость света относительно Земли составит, следовательно,

$$c' = c + v.$$

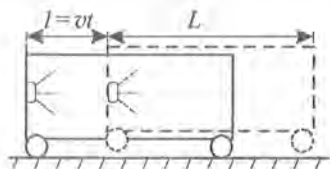


Рис. 129

Например, если длина вагона 300 000 км, а скорость вагона $v = 30\,000$ км/с (ради наглядности мы взяли такие фантастические данные), то за одну секунду свет достигнет стенки, которая с точки зрения земного наблюдателя отстоит на $(300\,000 + 30\,000)$ км от начального положения про-

жектора. Но это противоречит постулату о постоянстве скорости света: ведь для наблюдателя на Земле она должна остаться равной 300 000 км/с.

2. Выясним, где в этих рассуждениях мы могли допустить ошибку. Для этого повторим их еще раз и попробуем найти слабый пункт этой цепочки рассуждений:

а) за одну секунду задняя стенка вагона прошла путь $l = 30\,000$ км;

б) за это время луч света прошел путь, который складывается из длины рельсов (до задней стенки) и длины движущегося вагона L . Поделив этот путь на время, мы нашли скорость света.

Обратим внимание на следующие обстоятельства:

а) наблюдатели на Земле, чтобы найти скорость света, измерили длину неподвижных рельсов и прибавили ее к длине движущегося вагона. Это расстояние они поделили на время

$$c' = \frac{l + L}{t_{\text{неп}}} = \frac{l}{t_{\text{неп}}} + \frac{L_{\text{дв}}}{t_{\text{неп}}} = v + c;$$

б) пассажиры вагона нашли скорость света, поделив измеренную ими длину вагона на измеренный ими промежуток времени

$$c = \frac{L_{\text{неп}}}{t_{\text{дв}}}$$

При этом мы предполагали, что длина движущегося вагона $L_{\text{дв}}$ совпадает с длиной вагона $L_{\text{неп}}$, измеренной неподвижным относительно него наблюдателем, а время $t_{\text{дв}}$, измеренное по движущимся часам, совпадает с временем $t_{\text{неп}}$, измеренным по неподвижным часам. Эти предположения и привели к противоречию. Их надо отбросить, если оба постулата мы считаем справедливыми.

3. Чтобы совместить оба постулата, надо, как мы видели, признать, что либо расстояния, либо промежутки времени, либо то и другое в движущейся системе не такие, как в неподвижной. Дальше мы увидим, что верно последнее утверждение. Это значит, что если где-то и когда-то прошли два события, например, открылись окна в двух концах вагона, то расстояния и промежутки времени между этими событиями, измеренные в разных системах отсчета, будут разными. Не существует «абсолютной» длины тела относительно к системе отсчета, и не существует единого, абсолютного времени. Таким образом, нельзя представлять пространство как нечто «жесткое», поскольку расстояние между двумя точками пространства в разных системах отсчета будет разным. То же относится и ко времени. Не существует единого для всех «мирового времени». Имеется столько разных времен, сколько есть разных систем, движущихся друг относительно друга. Те представления о пространстве и времени, которые сложились у нас на основе повседневного опыта, оказались лишь приближенными. Это связано с тем, что в повседневной жизни нам приходится иметь дело только со скоростями, очень малыми по сравнению со скоростью света. При таких скоростях различия в расстояниях и промежутках времени в неподвижных и в движущихся системах настолько малы, что их не могут обнаружить даже самые чувствительные приборы.

Наша ближайшая задача — найти, как преобразуются расстояния и времена при переходе из одной системы отсчета к другой. Но сначала проанализируем вопрос о том, как надо сравнивать показания часов, расположенных в разных местах данной системы отсчета.

§ 74. Синхронизация часов

1. Для измерения времени и расстояний необходимо, чтобы в данной системе отсчета были часы. Почему часы нужны для измерения расстояний? Во-первых, потому, что расстояния можно измерять с помощью радиолокатора или по времени прохождения света (по формуле $x = ct$). Во-вторых, часы нужны и при измерениях с помощью линеек. Чтобы измерить длину движущегося тела, надо одновременно отметить координату его начала и конца. Ясно, что если отметить эти координаты в разные моменты, то найденную длину нельзя считать длиной этого тела. Таким образом, в разных точках данной системы надо поместить часы. Чтобы можно было сравнивать их показания, надо на всех часах установить единое начало отсчета времени.

Будем считать, что у нас имеется много одинаковых часов, которые ходят одинаково, когда они собраны в одном месте. Поставим стрелки всех часов на нуль (или на другое начальное время) и разнесем часы по разным местам (одни часы оставим в начале координат, т. е. в точке O). Однако движение могло нарушить ход часов, чем более, чем часть пути часы двигались ускоренно (влияние больших ускорений на ход часов легко обнаружить, например, швырнув их о стенку). Если бы существовали сигналы, распространяющиеся мгновенно, мы могли бы использовать их, чтобы установить на всех часах единое начало отсчета времени. Поскольку таких сигналов не существует, нам надо выбрать способ, с помощью которого мы установили бы на всех часах единое начало отсчета. Установление единого начала отсчета времени в заданной системе называется синхронизацией часов. Условимся применять следующий способ синхронизации. Отправим световой сигнал из начала координат O в момент, который мы приняли за начальный. Когда сигнал дойдет до часов, отстоящих на $300\,000$ км, установим на них 1 с, когда дойдет до часов, где $x_2 = 600\,000$ км, установим на них 2 с, когда дойдет до часов с координатой x , установим на них $t = \frac{x}{c}$.

После того, как часы синхронизированы, можно проверить, ходят ли они одинаково. Для этого можно спустя некоторое время T_0 послать новый сигнал; каждые часы должны показать время, на T_0 больше, чем при приеме первого сигнала. Показания часов в тот момент, когда там произошло интересное нас событие, можно передавать в точку O по телевизору или по радио (или записывать, а потом пересылать любым способом).

2. До Эйнштейна не понимали, что до тех пор, пока не установлен способ синхронизации часов, бессмысленно ставить вопрос, когда именно произошло событие в далекой от наблюдателя точке, раньше или позже, чем некоторое другое событие в точке O , и насколько именно раньше или позже.

Иногда высказывалось мнение, что данное Эйнштейном определение одновременности и выбор метода синхронизации часов являются произвольными. Эйнштейн как-то заметил, что произвольность наших определений напоминает произвольность слов, которые мы помещаем в клеточки разгадываемого кроссворда. На первый взгляд, кажется, что возможностей много, но потом выясняется, что существует столько ограничений, что выбор практически оказывается вынужденным. Все это относится и к определению одновременности и синхронности¹.

§ 75. Относительность одновременности

После того, как в каждой системе отсчета расставлены и синхронизированы часы, у каждого из наблюдателей появилась возможность сравнивать, какое из двух событий, происшедших в разных местах, наступило раньше и какое позже. Покажем теперь, что два события, одновременные в одной системе отсчета, неодновременны в другой. Пусть пассажир

¹ В качестве примера приведем только одно из ограничений. Если часы A идут синхронно с часами B , а часы B — с часами C , то часы A и C также должны идти синхронно. Опыт показывает, что это условие выполняется при сделанном Эйнштейном выборе.

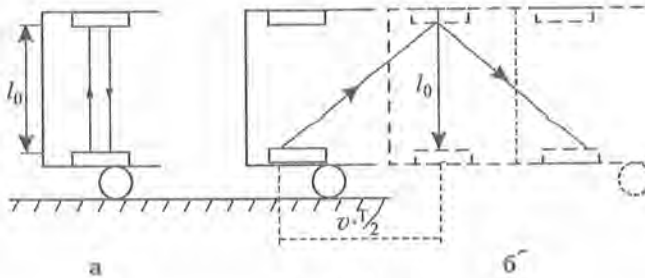


Рис. 132

Тут не только нарушен постулат о равноправии всех инерциальных систем, а возникло явное противоречие. Такого явно не может быть.

2. С точки зрения пассажира (рис. 132а) промежуток времени T_0 между двумя тиканьями его собственных часов

$$T_0 = \frac{2l_0}{c}.$$

Наблюдатель на Земле (рис. 132б) обнаружит, что свет движется не вдоль катета, а по гипотенузе. А так как скорость света для земного наблюдателя такая же, как для пассажира, то он воспримет промежуток времени T между этими событиями как более длительный (во столько раз, во сколько гипотенуза больше катета). Чем больше скорость, тем больше это различие. Из рис. 132 видно, что

$$\left(v \frac{T}{2}\right)^2 + l_0^2 = \left(c \frac{T}{2}\right)^2$$

(все величины в этой формуле измерены наблюдателем на Земле — им самим или его помощниками, расставленными на пути движения вагона). Исключив из этих двух формул l_0 получаем

$$v^2 T^2 + c^2 T_0^2 = c^2 T^2, \text{ откуда}$$

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

Промежуток времени T_0 между двумя событиями, измеренный в той системе отсчета, где эти события произошли в одной точке (или хотя бы имели одинаковую координату x), называют собственным. Собственное время всегда является наименьшим. Для запоминания (какое из времен больше) можно отметить, что если бы пассажир мог двигаться со скоростью света, то во всех других системах время стало бы течь бесконечно медленно, т. е. течение времени остановилось бы.

Если два события как в одной, так и в другой системе произошли в разных точках, то промежуток времени между ними ни в одной из этих систем не является собственным. В этом случае для пересчета времени из одной системы в другую надо пользоваться более общей формулой (так называемым преобразованием Лоренца). См. также *упр. 6* к этому параграфу.

3. Могут ли часы, основанные на каком-либо ином принципе, идти «вразнобой» со световыми? Пусть эти другие часы отрегулированы так, что на Земле они ходили одинаково со световыми. Если в поезде эти часы станут отставать или уходить вперед от световых, то по величине этого расхождения можно судить о скорости поезда. Но согласно первому постулату, это невозможно. Значит, любой способ измерения времени — по пульсу пассажира, по нарастанию его аппетита после еды, по скорости роста его бороды и т. д. — приведет к тому же результату, что и измерения по световым часам. Значит, разумно считать, что замедлился (с точки зрения земного наблюдателя) сам темп времени в поезде. Пассажир по своим часам и по своему самочувствию мог прожить год, а на Земле «за это время» могло пройти и 100 лет (расчет показывает, что такое большое «замедление времени» произойдет при скорости, лишь на ничтожную величину — на 15 км/с — отличающейся от скорости света $c = 300\,000$ км/с).

4. Из первого постулата, утверждающего равноправность всех инерциальных систем, следует, что эффект «замедления времени» является взаимным: если наблюдатель на Земле прожил по своему времени один год, то с точки зрения пассажира поезда прошло сто лет.

Нет ли тут противоречия? Полезно напомнить, что несколько веков назад, когда стало утверждаться мнение о шарообразности Земли, многие усматривали противоречие в факте «взаимности» антиподов. Если мы считаем, что ходим «нормально», а антиподы — вниз головой, то антиподы должны признать, что так оно и есть: они ходят вниз головой, а мы — нормально. Между тем, антиподы считают, что низ у них под ногами, и это они ходят «нормально», мы же ходим вниз головой. Противоречие существует только для тех, кто считает, что существует «абсолютный верх». На самом же деле, это понятие относительно: то, что является верхом для одного наблюдателя, может быть низом для другого. Только ограниченность жизненного опыта малой областью пространства приводит к ошибочному абсолютизированию этого понятия.

Упр. 1. Рассчитайте, при какой скорости произойдет «замедление времени» в 100 раз. Считать $c = 300\,000$ км/с.

У к а з а н и е. Использовать приближенную формулу $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$, если $x \ll 1$.

Упр. 2. При какой скорости «темп времени» замедлится вдвое?

Упр. 3. Космический корабль летит далеко от Земли, перпендикулярно линии, соединяющей его с Землей, со скоростью 260 000 км/с (при такой скорости, как следует из предыдущей задачи, темп времени «замедляется» вдвое). «Домосед», находящийся на Земле, и космонавт могут наблюдать друг за другом по телевидению. «Домосед» запустил свой проигрыватель в тот момент, когда увидел, что космонавт запустил свой. Сколько пластинок успеет он прокрутить, пока космонавт, по его наблюдениям, прокрутил одну; две или половину (все пластинки одинаковые)?

О т в е т: Две, четыре или одну.

Упр. 4. Космонавт (см. *упр. 3*) слышит, что певец на пластинке взял ноту «ля» основной октавы (440 Гц). Какой тон услышит через свой телевизор «домосед»?

О т в е т: 220 Гц (поперечный эффект Доплера).

Упр. 5. Если один из братьев-близнецов отправится путешествовать с достаточно большой скоростью, то после возвращения на Землю он с точки зрения земных наблюдателей окажется заметно моложе своего брата (например, на 20 лет), но с точки зрения путешественника моложе должен оказаться тот брат, что оставался на Земле. При «очной ставке» может осуществиться только одна из этих возможностей. Где мы тут ошиблись?

О т в е т: Системы «Земля» и «Космический корабль» здесь не являются равноправными. Землю условно можно принять за инерциальную систему, но космический корабль, чтобы вернуться к Земле, некоторое время должен был двигаться ускоренно. Все это время корабль не являлся инерциальной системой, так что равноправия тут нет. Подробный анализ этой ситуации показал, что космонавт действительно окажется моложе своего брата-домоседа.

Упр. 6. От задней стенки вагона одновременно послали два световых сигнала. Первый отразился от зеркала, установленного посередине вагона, и вернулся обратно спустя T_0 (по часам пассажира). Второй сигнал за это время дошел до передней стенки вагона. С точки зрения земного наблюдателя первый сигнал вернулся спустя время

$$T_1 = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \text{ Верно ли,}$$

что время распространения второго сигнала также равно (с точки зрения земного наблюдателя) этому выражению?

О т в е т: Неверно. Прибытие к цели обоих сигналов (первого — к задней стенке, второго — к передней) произошло одновременно с точки зрения пассажира. С точки зрения земного наблюдателя второй сигнал (как видно из рис. 130) прошел больший путь, чем первый, т. е. дошел до цели позже. Поэтому $T_2 > T_1$.

§ 77. Относительность расстояний

Длина тела в той системе отсчета, где оно неподвижно, называется собственной. Эту длину обозначают l . Какова бу-

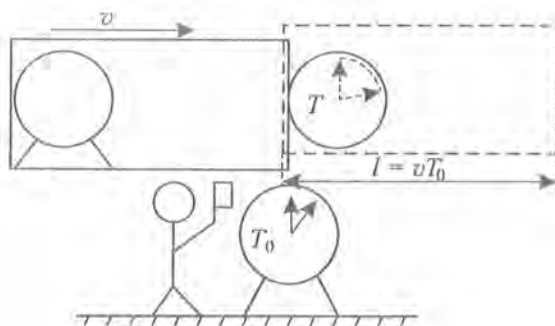


Рис. 133

дет длина того же тела с точки зрения наблюдателя, относительно которого это тело движется со скоростью v (в продольном направлении)? Чтобы выяснить это, измерим длину вагона в системе, связанной с Землей, и в системе, связанной с вагоном. Пусть вагон проехал мимо наблюдателя, стоящего на Земле (рис. 133). Сначала мимо него проехала передняя стенка, потом задняя. Эти два события произошли для него в одной точке, т. е. промежуток между этими событиями (T_0) является для него собственным. По его расчетам, за это время передняя стенка ушла от того места, где он стоит, на расстояние

$$l = vT_0$$

Это и будет длиной вагона с точки зрения земного наблюдателя. С точки зрения пассажира промежуток времени между этими же событиями будет больше:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Значит, расстояние, которое земной наблюдатель проехал (с точки зрения пассажира) от передней до задней стенки, будет таким:

$$l_0 = vT.$$

Это и будет длиной вагона с точки зрения пассажира¹. Поскольку T_0 меньше T , длина вагона для земного наблюдателя меньше собственной

$$\frac{l}{l_0} = \frac{T_0}{T} = \frac{T_0}{T_0/\sqrt{1-v^2/c^2}}; \quad l = l_0\sqrt{1-v^2/c^2}. \quad (2)$$

Таким образом, собственная длина является наибольшей. Ясно, что эффект этот также является взаимным. Для запоминания (какая из длин больше) можно отметить, что если вагон смог бы двигаться со скоростью света, он стал бы «безразмерным».

Упр. 1. Стержень, расположенный параллельно земной поверхности, движется в продольном направлении со скоростью 260 000 км/с (при такой скорости $\sqrt{1-v^2/c^2} = 1/2$). В тот момент, когда стержень пролетал над люком, собственный диаметр которого несколько меньше собственной длины стержня (например, на 10%), по концам стержня ударили сверху вниз. Провалится он в люк или нет? С точки зрения земного наблюдателя длина стержня почти вдвое меньше диаметра люка, и он провалится. С точки зрения наблюдателя, связанного со стержнем, диаметр люка вдвое меньше длины стержня, и он в него не пролезет. Кто прав?

О т в е т: В системе «Земля» все правильно. В системе, связанной со стержнем, удары по его концам сделаны не одновременно. (Можно для наглядности представить, что эти удары сделаны по сигналу, посланному из некоторой точки О. Чтобы сигналы прошли к обоим концам одновременно с точки зрения земного наблюдателя, надо, чтобы точка О была ближе к переднему концу стержня.) Сначала сделан удар по переднему концу, и он первым нырнет в люк, затем по заднему — он тоже нырнет туда же.

¹ Из равноправия обеих систем следует, что скорость вагона относительно Земли равна скорости Земли относительно вагона (так что значение v в обеих формулах одинаково по модулю). Если бы это было не так, например, одна из этих скоростей равна 100 км/с, а другая 200 км/с, то непонятно, из-за какого отличия между системами возникло такое различие.

§ 78. Реальны ли релятивистские эффекты?

1. Формулы и эффекты, которые являются следствиями теории относительности, называют релятивистскими (от латинского *relativus* — относительный). При $v \ll c$ релятивистские формулы переходят в «классические».

2. Иногда спрашивают, являются ли «сокращение длин» и «замедление времени» реальными эффектами или кажущимися? Этот вопрос имеет столько же смысла, сколько и вопрос: является ли движение поезда реальным или кажущимся? Относительно одних систем отсчета поезд неподвижен, относительно других — движется. Что же происходит с поездом «на самом деле» (безотносительно к системе отсчета): движется он или нет? Такой вопрос бессмыслен, так как природа устроена так, что на этот вопрос не может быть никакого ответа. Подобно этому, бессмыслен вопрос: какова же истинная длина тела (или каков же истинный промежуток времени между данными событиями) безотносительно к той или иной системе отсчета?

Приведем еще пример относительности некоторых понятий. Моя бабушка является чьей-то тетей. Кто же такая она на самом деле: бабушка или тетья? Что происходит с моей бабушкой, когда кто-то узнает, что она его тетья? Является ли реальным превращение моей бабушки в тетю?

§ 79. Релятивистский закон сложения скоростей

В механике Ньютона скорости, направленные вдоль одной линии, складываются алгебраически. Например, если вагон движется вправо со скоростью v и от задней стенки вагона удаляется пуля с относительной скоростью u , то скорость пули относительно Земли будет $u' = u + v$. Ясно, что при релятивистских скоростях (т. е. скоростях, сравнимых со скоростью света) эта формула не может быть верной, так как при сложении скорости света с любой другой скоростью должна снова получиться скорость света. Расчет показал, что в общем случае

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

При $u \ll c$ и $v \ll c$ получается «обычная» формула сложения скоростей $u' = u + v$. Если $u = c$, то формула дает

$$u' = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} = c.$$

Упр. 1. Два электрона движутся навстречу друг другу со скоростями 200 000 км/с (каждый). На сколько сблизятся они за одну секунду с точки зрения: а) земного наблюдателя; б) наблюдателя, движущегося вместе с одним из электронов?

О т в е т: а) на 400 000 км; б) на 277 000 км.

§ 80. Зависимость массы тела от его скорости

Представим себе неподвижного наблюдателя, следящего по телевизору за тем, что происходит внутри вагона, движущегося вдали перпендикулярно лучу зрения. Пусть в вагоне произвели выстрел вертикально вниз так, что пуля пробила пол. С точки зрения наблюдателя вертикальная составляющая перемещения пули будет такой же, как в вагоне, но

время полета пули в $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ раз больше ее собственного времени. Значит, вертикальная составляющая скорости пули в момент ее удара о пол с точки зрения нашего наблюдателя в

$\sqrt{1 - v^2/c^2}$ (например, в 100 раз) меньше ее собственной скорости. Как же пуля, обладающая столь малым импульсом, могла пробить пол? Наш наблюдатель припишет это увеличению массы пули. Расчет показывает, что масса пули или любого другого движущегося тела увеличивается во столько раз, во сколько замедляется собственное время ее движения для неподвижного наблюдателя:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m_0 — масса покоя, т. е. масса тела в той системе, где оно покоится, v — скорость тела относительно наблюдателя. Из этой формулы видно, что масса тела растет с ростом скорости и является такой же относительной величиной, как скорость, время, расстояние. В обыденной жизни мы этого не замечаем, так как ощутимый прирост массы наступает лишь при релятивистских скоростях, т. е. при скоростях, сравнимых со скоростью света. Даже в сверхзвуковом самолете прирост массы составляет меньше одной десятитысячной доли грамма. Со скоростями, близкими к скорости света, приходится иметь дело в современных ускорителях. В этих ускорителях масса частиц (протонов, электронов и т. п.) возрастает в десятки и даже в сотни раз по сравнению с массой покоя. Зависимость массы частицы от ее скорости приведена в следующей таблице. Скорость света при расчете принята равной $c = 299\,792$ км/с.

Скорость тела, км/с	m / m_0	Разница между скоростью света и скоростью тела, км/с	m / m_0
1000	1,000005	2	274
100 000	1,06	1	387
260 000	2	0,1	1225
299 700	40	0,01	3870

Упр. 1. Масса движущейся линейки возросла на 20%. Во сколько раз изменилась ее длина?

§ 81. Взаимосвязь массы и энергии

1. Мы видели, что при увеличении кинетической энергии тела возрастает его масса. Расчет показал, что изменение массы связано с изменением его кинетической энергии следующей формулой

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Эйнштейн показал, что это соотношение справедливо и в том случае, если тело получает энергию в любой форме (а не только в форме кинетической энергии). Например, заведенный будильник имеет большую массу, чем незаведенный, нагретая вода — большую массу, чем холодная, масса вещества после химической реакции больше или меньше, чем до нее в зависимости от того, шла она с поглощением или с выделением тепла.

Для изменения массы тела только на 1 г необходимо изменение его энергии на огромную величину $\Delta E = \Delta mc^2 = = 10^{-3}(3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13}$ Дж. Такую энергию вырабатывает мощная электростанция, подобная Волжской ГЭС (2500 Мвт) за десять часов непрерывной работы. Изменение энергии в окружающих нас телах в миллиарды раз меньше этой величины, поэтому мы не замечаем, что при изменении энергии тел меняется их масса. Масса движущегося поезда отличается от покоящегося на миллиардную долю грамма. При сжигании тонны бензина выделившееся тепло уносит с собой меньше одной миллионной доли грамма. С другой стороны, если тела выделяют энергию, то незначительное уменьшение их массы сопровождается выделением колоссального количества энергии. Если бы сумели найти процесс, при котором удалось бы уменьшить массу тела только на один грамм, получив эквивалентное количество энергии, то ее хватило бы для питания автомашины несколько десятков лет, даже если бы она работала круглосуточно. Масса одного кубометра песка эквивалентна энергии, выработанной всеми электростанциями нашей страны за несколько десятилетий.

Из устройств, используемых в технике в настоящее время, с заметным изменением массы (связанным с изменением энергии тел) приходится иметь дело в ускорителях элементарных частиц и в устройствах, использующих ядерные реакции: атомных электростанциях, атомных и водородных бомбах.

2. Если бы всю массу тела удалось использовать для получения энергии, то эта энергия, очевидно, равнялась бы

$$E = mc^2.$$

Такова, по Эйнштейну, полная энергия тела¹.

¹ В полную энергию не входит потенциальная энергия во внешнем поле, если таковая имеется.

Упр. 1. Найдите релятивистскую формулу кинетической энергии тела.

Решение. От полной энергии тела надо отнять его энергию покоя:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Упр. 2. Покажите, что при $v \ll c$ релятивистская формула кинетической энергии переходит в обычную.

Указание: $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$, если $x \ll 1$.

Упр. 3. К концу 10-х годов этого столетия выработка электроэнергии в России составит не менее 2000 миллиардов кВт·ч. Какова масса этой энергии?

Упр. 4. На сколько грамм увеличится суммарная масса всех автомашин нашей страны, если они начнут двигаться из состояния покоя со скоростью 72 км/ч? Число машин принять равным 25 миллионам, а среднюю массу — 2 тоннам.

Ответ: 0,11 г.

Упр. 5. На сколько увеличится масса одной тонны воды, если ее: а) нагреть от 0° до 100°С; б) выпарить (при 100°С).

Упр. 6. Излучаемая Солнцем энергия каждую секунду уносит 4 миллиона тонн массы. Земля получает одну двухмиллиардную долю этого излучения. Рассчитайте, сколько кВт мощности, получаемой от Солнца, приходится на каждого жителя нашей планеты (число жителей принять равным 5 миллиардам).

Упр. 7. Выразите массу покоя электрона ($9,1 \cdot 10^{-31}$ кг) и протона ($1,7 \cdot 10^{-27}$ кг) в электрон-вольтах. Электрон-вольт — энергия, которую приобретает электрон, пробежав разность потенциалов в 1 В. Из формулы $\Delta E_k = A = qU$ следует, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Ответ: 0,51 МэВ; 940 МэВ.

§ 82. Скорость света в вакууме — предельная скорость распространения взаимодействий

Во многие релятивистские формулы входит $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Если скорость v тела больше c , то подкоренное выражение становится отрицательным и формулы теряют смысл. Отсюда можно сделать вывод, что ни одно тело нельзя разогнать до скорости, превышающей скорость света в вакууме. Физическая причина заключается в том, что когда скорость тела приближается к скорости света, его масса неуклонно растет. Чтобы ускорить тело до скорости света, нужна бесконечная сила.

Нельзя сказать, что теория относительности отрицает возможность существования сверхсветовых скоростей любого вида. Чтобы уточнить, о какой предельной скорости тут идет речь, вспомним, где эта скорость впервые вошла в релятивистские формулы. Это произошло (явно или неявно), когда мы определяли одновременность событий и способ синхронизации часов. В обоих случаях скорость c фигурировала как скорость распространения сигнала, способного воздействовать на стрелки часов, или иначе, как скорость передачи взаимодействия из одних точек в другие. Таким образом, из теории относительности следует, что тела и сигналы, передающие воздействие, не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Скорость света в вакууме есть максимально возможная скорость распространения взаимодействия.

Можно привести много примеров сверхсветовых скоростей, не противоречащих теории относительности. Рассмотрим один такой пример. Пусть электроны вылетают из электронного прожектора со скоростью 100 000 км/с и долетают до полукруглого экрана, удаленного на 1 миллион километров. Рассчитаем, с какой скоростью будет двигаться светлое пятно на экране, если прожектор за 1 секунду повернули на 180° (будем считать $\pi = 3$). Примем за начальный момент тот, когда прожектор, направленный в сторону экрана, был неподвижен и начал испускать электроны.

Светлое пятно против прожектора появится через 10 с, а пятно в противоположной точке — еще через 1 с. Значит, за 1 с пятно пробежало путь $s = \pi R = 3\,000\,000$ км.

Упр. 1. Попробуйте набросать несколько эпизодов фантастической повести, где житель Земли попадает впросак, оказавшись в мире, отличающемся от нашего только тем, что там предельная скорость $c = 18$ км/ч.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА 6

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

§ 83. Внешний фотоэффект и его применение в технике

1. Электромагнитное излучение может выбивать электроны из вещества, поглощающего это излучение. *Выбивание из вещества электронов под действием света называют фотоэлектронной эмиссией, или внешним фотоэффектом.* Мы будем рассматривать только фотоэффект в металлах.

Для использования фотоэффекта применяют фотоэлементы. Фотоэлемент состоит из стеклянного баллона, из которого выкачан воздух (если фотоэлемент — вакуумный), и двух электродов: катода и анода. Катод делают из вещества, из которого легко выбиваются электроны, например, из цезия; это вещество тонким слоем наносят на внутреннюю поверхность баллона (рис. 134). Аноду придают такую форму, чтобы он не заслонял весь свет, падающий на катод (например, форму кольца или форму сетки). Если между катодом и анодом включить батарею, то тока не возникнет, пока фотоэлемент находится в темноте. Но если катод осветить, он начнет испускать электроны, и в цепи возникнет ток. Чем больше освещенность катода, тем больше ток.

2. Фототоки очень малы (микроамперы), и при практическом использовании их приходится усиливать с помощью транзисторов. Если усиленный ток направить в обмотку электромагнитного реле, то реле будет срабатывать каждый раз, когда

фотоэлемент, будет меняться 440 раз в секунду. С такой же частотой будет меняться ток в цепи фотоэлемента. Этот ток усиливается транзисторами и подается в катушку громкоговорителя.

Чтобы можно было записать любой звук (а не только звук струны), можно эту струну поместить между полосоми магнита и включить последовательно с микрофоном. На провод с таким током, помещенный в магнитном поле, действует сила Ампера ($F = Blv \sin \alpha$), и если ток в микрофоне будет колебаться, то с той же частотой будет колебаться струна (рис. 137а).

Упр. 1. К каким контактам реле (рис. 135) надо подключить цепь электрического звонка, чтобы звонок: а) звонил только на свету; б) звонил только в темноте.

§ 84. Фоторезисторы

1. В полупроводниках за счет энергии поглощения света могут выбиваться электроны из межатомных связей. При этом может резко увеличиться число электронов и дырок, а значит, и проводимость полупроводника. Это явление называют внутренним фотоэффектом, а полупроводники, в которых он используется, — фоторезисторами. В металлах внутренний фотоэффект практически не наблюдается, так как у них концентрация свободных электронов настолько велика, что она не может заметно увеличиться под действием света.

2. Фоторезисторы используются для тех же целей, что и фотоэлементы, использующие внешний фотоэффект. Схема фотореле на фоторезисторе совпадает со схемой, изображенной на рис. 135, с той разницей, что отпадает необходимость в усилителе (не показанного на схеме).

§ 85. Полупроводниковые фотоэлементы

1. Так называют полупроводники, работающие без источников внешнего напряжения и создающие собственную ЭДС под

действием излучения. Они представляют собой полупроводниковые диоды, использующие внутренний фотоэффект. Под воздействием света на электронно-дырочном переходе и прилегающих к нему областях происходит рождение пар: электронов и дырок. Известно, что в p - n переходе существует внутрен-

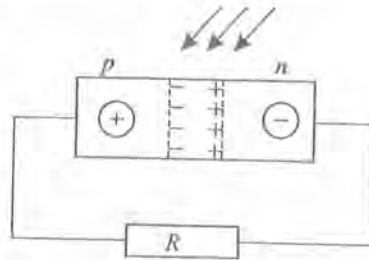


Рис. 138

нее электрическое поле, препятствующее переброске через него основных носителей и способствующее переброске неосновных носителей (рис. 138). Возникшие в p - и n -области электроны и дырки диффундируют по всем направлениям, в том числе и к p - n переходу. Те из неосновных носителей, что не успели рекомбинировать, перебрасываются из одной области в другую. Основные же носители остаются в тех областях, где они родились. В результате под действием света происходит разделение зарядов: в p -области накапливаются избыточные дырки, и в n -области — электроны. Возникает ЭДС, которую называют фото-ЭДС. С увеличением светового потока фото-ЭДС растет и может достигать нескольких десятых долей вольта.

2. Кремниевые фотоэлементы используют в качестве преобразователей энергии солнечных лучей в электрическую. Их ЭДС достигает 0,5 В, а к. п. д. 20%. Соединяя элементы последовательно или параллельно, получают мощности до нескольких киловатт. Солнечные батареи из кремниевых фотоэлементов являются основными источниками питания на искусственных спутниках Земли, космических кораблях, автоматических метеостанциях, ретрансляторах линий связи, расположенных в труднодоступных местностях, и т. д. Иногда их используют в переносных приемниках и телевизорах. Часто их используют вместе с аккумуляторами, которые заряжаются в солнечное время и питают аппаратуру ночью или в облачные дни.

Полупроводниковые фотоэлементы используют в приборах для измерения освещенности (люксметрах) и в экспоно-

метрах — приборах, определяющих выдержку при фото- и киносъемках. Особенно широко они используются в устройствах сигнализации и управления автоматическими процессами в производстве, а также для ввода и вывода информации в ЭВМ.

§ 86. Исследование внешнего фотоэффекта

1. Вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента. Если создать определенную освещенность катода и менять напряжение между катодом и анодом (рис. 139), то ток в цепи будет меняться. График этой зависимости (вольт-амперная характеристика фотоэлемента) представлен на рис. 140. Ход ее объясняется так. Катод под действием света испускает электроны, но если анодной батареи нет, то почти все они возвращаются на катод, лишь ничтожная доля попадает на анод и (если цепь остается замкнутой) доходит через внешнюю цепь до катода (точка *B* на графике). Если в баллоне создать хотя бы слабое тормозящее поле (для этого полярность батареи, показанной на рис. 139, надо сменить на обратную), этот ток прекратится (точка *A* на графике). Если же включить анодную батарею так, чтобы поле, ею созданное, не тормозило, а, наоборот, ускоряло вылетающие из катода электроны, то ток возрастет (точка *C*). При этом доля возвращающихся на катод электронов сократится. При достаточно большом напряжении ни один электрон, вылетевший из катода, не вернется на катод. В этом случае число электронов, ежесекундно достигающих анода, сравняется с числом электронов, ежесекундно покидающих катод (точка *D*). При дальнейшем повышении напряжения ток расти не будет. Это явление называют насыщением.

2. Имея вольт-амперную характеристику фотоэлемента, можно рассчитать скорость выбитых электронов и их число. Чтобы рассчитать скорость электронов, надо знать ту тормозящую разность потенциалов U_3 , при которой ток полностью прекращается (точка *A* на рис. 140). Выбитые из катода электроны обладают определенной кинетической

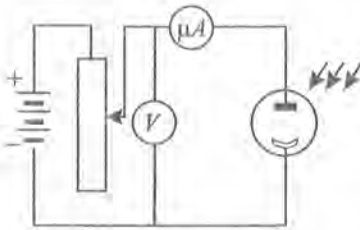


Рис. 139

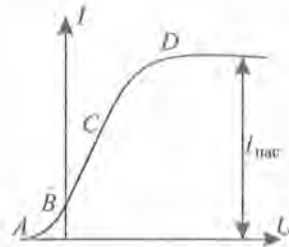


Рис. 140

энергией $\frac{mv^2}{2}$. Для того, чтобы электрон не сумел долететь до анода и повернул назад, надо, чтобы работа сил поля eU_3 была достаточной для уменьшения кинетической энергии электрона до нуля:

$$eU_3 \geq \frac{mv^2}{2}$$

Измерив величину задерживающего напряжения и зная массу и заряд электрона, можно рассчитать искомую скорость.

3. Чтобы измерить число электронов, выбитых из катода за время t , сначала рассчитаем суммарный заряд всех электронов, выбитых за это время. Это можно сделать двумя способами. С одной стороны, этот заряд равен $I_{\text{нас}} t$ (ток насыщения надо брать потому, что только в этом случае в создании тока участвуют все электроны, выбитые из катода). С другой стороны, суммарный заряд данных электронов равен их числу, умноженному на заряд одного электрона.

$$I_{\text{нас}} \cdot t = Ne.$$

Отсюда находим число электронов, выбитых за данное время (например, за 1 с).

§ 87. Законы фотоэффекта. Кванты света

1. Опытным путем было установлено следующее:

а) скорость выбитых фотоэлектронов зависит от частоты падающего света: чем больше частота, тем больше скорость выбитых электронов. Если частота падающего света меньше определенной величины (называемой красной границей данного вещества), то ни один электрон не может вылететь из катода;

б) с увеличением освещенности катода (светом данной частоты) растет число выбитых электронов, но не их скорость.

2. Волновая теория не может объяснить законов фотоэффекта. Сам по себе факт вырывания электронов не противоречит волновой теории. Подобно тому, как волны на воде могут выбивать камешки из берега, электромагнитные волны могут передавать свою энергию электронам, выбивая их из данного тела. Удивительным является то, что при возрастании освещенности скорость электронов не возрастает, а при уменьшении — не убывает. Ведь чем больше освещенность катода (т. е. чем больше энергия падающих на катод электромагнитных волн), тем больше сила, с которой электромагнитное поле световой волны действует на данный электрон. Если бы волны на воде следовали законам фотоэффекта, камешки выбивались бы с берега с одной и той же скоростью независимо от того, какова энергия падающих на них волн, большая или совершенно ничтожная.

По-видимому, каждый электрон может взять от падающего света только определенную порцию энергии независимо от того, много или мало энергии несет данный поток света. Это означает, что свет при фотоэффекте ведет себя так, как если бы он был потоком частиц. В самом деле, если бы на берег обрушивались не волны, а пули, то независимо от того, попадает ли на данный берег сотня пуль в минуту или одна пуля, скорость выбитых камешков будет одинаковой, разным будет только количество выбитых камешков.

3. Казалось бы, что после успехов волновой теории исключена возможность рассматривать свет как поток частиц.

Однако под давлением бесспорных фактов физики вынуждены были признать, что при фотоэффекте (а также в других случаях, связанных с поглощением или испусканием света) свет ведет себя как поток отдельных неделимых частиц. Эти мельчайшие порции излучаемой или поглощаемой энергии называли квантами света, или фотонами.

Чтобы согласовать эту теорию с фактами, пришлось предположить, что энергия E кванта определяется частотой ν света

$$E = h\nu,$$

где h — $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с — постоянный коэффициент («постоянная Планка»)†.

Если сравнить кванты красного света с потоком мелкой дроби, то кванты фиолетовых лучей надо сравнить с потоком пуль, ультрафиолетовых — с потоком снарядов, рентгеновских — с потоком еще более сокрушительных снарядов (например, атомных бомб).

4. Легко убедиться, что квантовая теория правильно объясняет законы фотоэффекта:

а) с увеличением частоты света увеличивается энергия фотона, а значит, и энергия выбитого электрона. Если частота очень мала, то энергии кванта окажется недостаточно для отрыва электрона из металла; чтобы вырвать электрон из металла, надо совершить определенную работу, называемую работой выхода;

б) с увеличением освещенности энергия кванта не увеличивается (энергия кванта зависит только от частоты света).

† Планк (1858–1947) — выдающийся немецкий физик. В 1900 г. он ввел в волновую теорию света предположение о том, что световые волны, испускаемые по всем направлениям источником, испускаются им не непрерывно, а с паузами. Суммарная энергия, испускаемая между двумя паузами, $E = h\nu$. В 1905 г. Эйнштейн (1879–1955) придал этой формуле другой смысл. Он предположил, что свет может существовать только в виде отдельных «частиц излучения» — фотонов. (Если бы наше зрение было бы сверхчувствительным, то согласно Планку мы видели бы, что данный участок освещенной поверхности то весь целиком освещается, то погружается в темноту. Согласно же Эйнштейну мы видели бы, что то в одних, то в других точках этой поверхности вспыхивают и гаснут яркие точки. Энергия каждой вспышки $E = h\nu$.)

Значит, увеличение освещенности может происходить только за счет увеличения числа падающих на катод фотонов, что приводит к увеличению числа выбитых электронов.

Применив закон сохранения энергии к взаимодействию электрона с фотоном, Эйнштейн получил уравнение фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Это уравнение читается так: энергия кванта расходуется на работу выхода и на придание электрону кинетической энергии.

5. Мы считали, что электрон может получить энергию только от одного фотона. После появления лазеров были получены плотности потока излучения, которые на несколько порядков превысили то, что можно было получить раньше. При этом удалось наблюдать многофотонный фотоэффект, в ходе которого электрон, вылетающий из металла, получает энергию не от одного, а от нескольких фотонов. В этом случае в левую часть уравнения Эйнштейна вместо энергии одного кванта надо подставлять суммарную энергию всех N квантов ($Nh\nu$).

Упр. 1. При освещении фотокатода желтым светом он испускает электроны. Будут ли испускаться электроны при освещении катода:

- а) фиолетовыми лучами;
- б) ультрафиолетовыми;
- в) красными?

Достаточно ли имеется данных, чтобы ответить на каждый из этих вопросов?

Упр. 2. Будет ли меняться число выбиваемых из катода электронов и их скорость, если: а) приближать и отодвигать лампу накаливания от фотоэлемента; б) повышать и понижать напряжение, поданное на лампу?

Упр. 3. Работа выхода цезия равна 1,8 эВ. Чему равна красная граница ν_0 фотоэффекта для цезия? (Об электрон-вольте см. *упр. 7* к § 83.)

Решение. Надо найти ту частоту падающего света, при которой электроны не будут выбиваться из катода. Ясно, что это произойдет в том случае, когда энергия кванта будет меньше работы выхода: $h\nu_0 \leq A$. Отсюда граничная частота $\nu_0 = A/h = 4,4 \cdot 10^{15}$ Гц.

Упр. 4. Опыт показывает, что при освещении катода светом данной частоты скорости выбитых электронов получаются разными (так как электронам, находящимся у самой поверхности легче вырваться наружу, чем электронам, расположенным в глубине). О какой же скорости шла речь, когда мы утверждали, что скорость выбитых электронов зависит от частоты света?

Ответ: Речь шла о максимальной скорости выбитых электронов. В самом деле, при измерении скорости электронов (см. § 88) мы усиливали тормозящее поле до тех пор, пока ток полностью не прекращался, т. е. даже самые быстрые электроны не могли долететь до анода. Таким образом, расчетом находилась скорость самых быстрых электронов.

Упр. 5. Начертите график зависимости кинетической энергии выбитого из катода электрона от частоты падающего света. Как найти по этому графику:

- а) работу выхода;
- б) красную границу фотоэффекта;
- в) постоянную Планка?

Упр. 6. В рентгеновской трубке электрон, ускоренный напряжением U , тормозится при ударе об анод, и часть своей энергии испускает в виде кванта рентгеновских лучей (другая часть может идти на нагревание анода). Примените закон сохранения энергии к случаю, когда вся энергия электрона идет на создание одного кванта, и рассчитайте максимальную частоту рентгеновских лучей (помимо напряжения, считать неизвестными массу электрона, его заряд и постоянную Планка).

Указание. Кинетическая энергия электрона в момент удара об анод равна eU .

Упр. 7. Выразите в электрон-вольтах энергию кванта фиолетового света ($\lambda = 400$ нм) и среднюю кинетическую

энергию теплового движения молекулы ($\frac{3}{2}kT$) при комнатной температуре (27°C). Сравните эти величины.

О т в е т: 3,1 эВ. Энергия кванта в 80 раз больше.

§ 88. Корпускулярные свойства фотона

1. Согласно теории относительности масса любой частицы связана с ее энергией соотношением

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Отсюда следует, что фотон обладает

$$\text{массой } m = \frac{h\nu}{c^2} \text{ и импульсом } p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Этот импульс направлен по световому лучу. Когда фотон поглощается каким-нибудь атомом, он передает этому атому свою массу, импульс и энергию. И наоборот, когда атом испускает свет, каждый фотон получает от этого атома свою массу, импульс и энергию.

2. Необходимость рассматривать свет как поток отдельных частиц, обладающих определенным импульсом, возникает при истолковании эффекта Комптона (А. Комптон — американский физик, открывший и объяснивший этот эффект в 1923 г.). Комптон направлял узкий пучок рентгеновских лучей на тело, содержащее свободные (или слабо связанные с атомами) электроны. Согласно волновой теории электроны данного тела должны совершать вынужденные колебания той же частоты, что и падающие лучи, и переизлучать эти волны по всем направлениям. Комптон измерял длину волны этих, как говорят, рассеянных лучей под разными углами (рис. 141). Вопреки предсказаниям волновой теории оказалось, что в рассеянных лучах наряду с излучением первоначальной длины λ_0 содержались также лучи с большей длиной волны λ . Разность $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ не зависела ни от длины первоначальной вол-

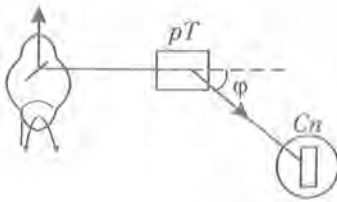


Рис. 141

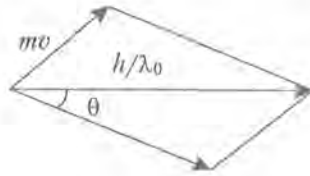


Рис. 142

ны, ни от природы рассеивающего вещества, а зависило только от направления рассеяния.

Все особенности эффекта Комптона удалось объяснить, рассматривая его как упругое столкновение фотона со свободным электроном. Применяв к нему закон сохранения энергии и закон сохранения импульса (рис. 142), имеем

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2, \quad \text{где } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 - 2\frac{h}{\lambda_0} \cdot \frac{h}{\lambda} \cos\theta = (mv)^2,$$

где m_0c^2 — энергия свободного электрона, который мы считаем до соударения покоящимся, mc^2 — полная энергия электрона после соударения. Из первого уравнения видно, что энергия рассеянного фотона $h\nu$ меньше энергии первичного фотона, т. е. $\nu < \nu_0$, ($\lambda > \lambda_0$). Решив совместно оба уравнения, можно найти зависимость $\Delta\lambda$ от θ (решение требует громоздких выкладок, поэтому мы его опускаем). Результаты оказались в превосходном согласии с опытом.

3. Из формулы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ следует, что масса покоя

фотона равна нулю. Особенностью фотона является также то, что в отличие от любых других частиц его нельзя ни ускорить, ни замедлить и в любой системе отсчета его скорость одинакова и равна c .

Упр. 1. Проверьте формулу (1) по размерности.

Упр. 2. Какова должна быть длина волны рентгеновских лучей, чтобы энергия фотона равнялась энергии покоя электрона?

О т в е т: $-2 \cdot 10^{-10}$ м.

Упр. 3. Как объяснить, что в эффекте Комптона, помимо фотонов с уменьшенной энергией, наблюдались также фотоны с первоначальной энергией?

О т в е т: При упругом ударе о стенку шарик отскакивает с той же кинетической энергией, с какой он налетел на стенку. Масса атома в десятки тысяч раз превосходит массу электрона. Поэтому столкновение фотона с электроном, прочно связанным с атомом, равносильно столкновению со стенкой.

Упр. 4. Почему для видимых лучей не наблюдается эффект Комптона?

У к а з а н и е. Используйте результат *упр. 2* и *упр. 3*.

§ 89. Корпускулярно-волновой дуализм

1. Долгое время в физике боролись две теории, по-разному отвечавшие на вопрос, что такое свет: корпускулярная и волновая. Корпускулярная считала, что свет — это поток мельчайших частиц (по-латыни *corpuscula* — частица). Эта теория не смогла объяснить дифракцию и интерференцию света. Поэтому, когда волновая теория сумела объяснить и рассчитать эти явления (это произошло в XIX веке), корпускулярная теория была оставлена. Кванты света некоторыми свойствами напоминают корпускулы, но ясно, что квантовая теория не может быть простым возрождением старой корпускулярной теории. Во-первых, явления дифракции и интерференции неопровержимо доказывают, что свет обладает волновыми свойствами. Во-вторых, в основную формулу квантовой теории света ($E = h\nu$) входит частота, значит, даже не упоминая о дифракции и интерференции, мы вынуждены признать, что «что-то» здесь колеблется. Таким образом, свет обнаруживает и волновые, и корпускулярные свойства. Эту двойственность называют корпускулярно-вол-

явлением дуализмом (последнее слово означает по-латыни двойственность). Только синтез тех и других свойств дает полное представление о свете.

2. Чем меньше длина волны, тем больше импульс и энергия фотона и тем резче выступают его корпускулярные свойства. Чем больше длина волны, тем легче обнаруживается дифракция и интерференция волн, т. е. их волновые свойства. Например, у радиоволн энергия фотона настолько мала, что «зернистость» радиоволн никак не обнаруживается, зато дифракцию и интерференцию этих волн обнаружить легко.

3. Нам трудно представить, как волновые свойства света «уживаются» с корпускулярными. Если свет является электромагнитными волнами, то напряженность поля должна периодически меняться при переходе от одних точек пространства к другим, т. е. любая порция света должна быть размазана в пространстве, подобно облаку. Если же порция света является корпускулой, то она должна в каждый момент занимать четко очерченный объем, подобно песчинке. Эти два представления (волны и частицы) казались настолько несовместимыми, что один известный физик (Брэгг) полушутя заявил, что видит только один выход из этих затруднений: по понедельникам и средам, когда он ставит опыты по дифракции и интерференции, считать, что свет — это волны, а по вторникам и четвергам, когда исследует фотоэффект, считать, что свет — поток частиц.

Современная физика научилась преодолевать подобные противоречия. Однако тот, кто собирается знакомиться с идеями физики XX века, должен быть готов к полному отказу от наглядности (в том смысле, как понимали наглядность в XIX веке). Когда речь идет о фотонах, электронах и других элементарных частицах, физик отказывается отвечать на вопрос: «На какие знакомые нам в повседневной жизни предметы по своим свойствам фотон (или электрон)?». Природа не обязана повторяться, и фотон не обязан быть таким, чтобы его было с чем сравнивать. Разумеется, мы можем проводить аналогии, но надо смириться с тем, что любая модель будет иметь ограниченную применимость. Эта «ненагляд-

ность» современной физики ничуть не мешает физикам все глубже постигать свойства фотонов, электронов и других элементарных частиц (как одному университетскому преподавателю физики, слепому от рождения, не помешал «постигнуть» оптику тот факт, что он никогда не мог представить, как выглядит солнечный спектр).

4. Французский физик Де Бройль предположил (в 1924 г.), что формула $p = \frac{h}{\lambda}$, выведенная Эйнштейном для фотонов, применима также к электронам и любым другим частицам. Это значит, что движущемуся электрону соответствует длина волны

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Хотя природа «волн Де Бройля» некоторое время не была ясна, опыты подтвердили наличие у электронов волновых свойств. Удалось наблюдать дифракцию и интерференцию электронов при прохождении их через кристалл, причем рассчитанная по дифракционной картине длина волны соответствовала формуле Де Бройля. Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм характерен не только для света, но и для вещества. Для макроскопических тел длина волны Де Бройля настолько мала, что их волновые свойства никак не проявляются.

§ 90. Давление света

1. Из того факта, что фотон обладает определенным импульсом ($p = \frac{h}{\lambda}$), следует, что на тело, поглощающее или отражающее свет, действует определенная сила \vec{F} , пропорциональная $\Delta\vec{p}$ ($F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$). Еще до появления квантовой теории существование светового давления предсказала электромагнитная теория света. Из этой теории следует, что когда волна

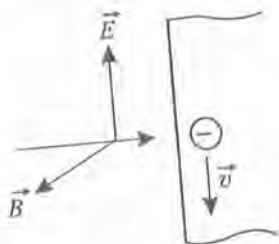


Рис. 143

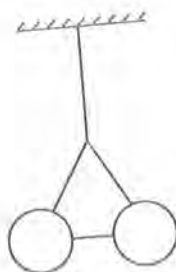


Рис. 144

падает нормально к поверхности тела (рис. 143), электрическая составляющая \vec{E} электромагнитного поля вызывает движение электронов параллельно поверхности тела, а магнитная составляющая \vec{B} создает силу Лоренца, направленную, как видно из рисунка, вглубь тела. Поскольку электроны не могут выскочить из тела, эта сила передается телу. Обе теории (волновая и квантовая) приводят к одинаковым количественным результатам.

2. Световое давление очень мало (в средних широтах в солнечный полдень $p = 5 \cdot 10^{-6}$ Па для поверхности, полностью отражающей свет), поэтому его долго не удавалось обнаружить. Впервые это сумел сделать русский физик П. Н. Лебедев (в 1900 г.). В вакуумном сосуде помещалась пара легких крылышек, подвешенных на тонкой нити (рис. 144). На одно из крылышек направлялся с помощью линз и зеркал свет от электрической дуги. По углу закручивания нити определялась сила.

Основная трудность заключалась в том, что из-за малости светового давления этот эффект маскировался другими. Один из таких побочных эффектов заключался в том, что остатки газа в сосуде нагревались по-разному, и их движение могло вызвать закручивание нити, во много раз превосходящее то, что вызвано давлением света. Лебедеву удалось преодолеть все трудности и не только доказать наличие светового давления, но и измерить его.

ГЛАВА 7

АТОМНАЯ ФИЗИКА

§ 92. Как установили строение атома

1. Долгое время считали, что атом является неделимой, вечно существующей частицей. Но после открытия электрона (1897), масса которого почти в 2000 раз меньше массы самого легкого атома (атома водорода), стало ясно, что электроны входят в состав всех атомов и могут отрываться от них. Так выяснилось, что атомы не являются неделимыми.

Еще большая ломка старых представлений произошла после открытия радиоактивности (1896). Удалось доказать (1903, Резерфорд), что радиоактивность сопровождается распадом атомов: атомы радиоактивного вещества выбрасывают из себя атомы гелия, превращаясь при этом в атомы какого-то нового вещества. Это навело на мысль, что атомы всех веществ содержат какие-то общие части, которые могут комбинироваться по-разному, образуя те или иные атомы. Таким образом, атомы не являются однородными, сплошными шариками, а имеют сложное строение.

2. Строение атомов сумел установить английский физик Резерфорд на основе опытов по рассеиванию альфа-частиц (1909–1913). Альфа-частицы представляют собой дважды ионизированные атомы гелия He^{++} (или, выражаясь по-современному, ядра гелия). Они вылетают из атомов радиоактивных веществ с колоссальной скоростью (20 000 км/с) и способны проникать глубоко внутрь атомов. Самым важным было то, что следы альфа-частиц можно наблюдать на экране, если он покрыт специальным веществом (сернистым цинком). В точке, куда попадает эта частица, возникает вспышка, которую можно наблюдать через лупу в хорошо затемненной комнате.

Резерфорд обстреливал альфа-частицами тонкие листочки разных металлов (толщиной около микрометра) и наблю-

дал по вспышкам на экране, под какими углами рассеиваются альфа-частицы, пролетевшие через листок. Когда листка не было, альфа-частицы летели прямолинейно и вспышки наблюдались только в центре экрана, против отверстия, где содержался источник альфа-частиц. Но когда на пути альфа-частиц

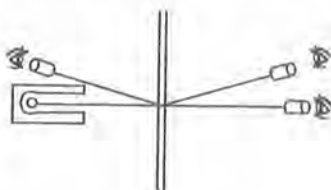


Рис. 145

ставили листок, вспышки можно было наблюдать при разных углах (рис. 145). Экран с микроскопом устанавливали под разными углами и каждый раз подсчитывали число вспышек за равные промежутки времени. Важнейшие результаты этих измерений таковы:

а) подавляющее число альфа-частиц проходило сквозь листок, почти не отклоняясь от первоначального направления, хотя атомы в металле расположены очень плотно;

б) среди частиц, отклонившихся от первоначального направления, имелись частицы, рассеянные под всевозможными углами, и некоторые частицы даже отлетали обратно.

Первый результат Резерфорд объяснил тем, что атом не сплошь заполнен веществом, а почти «пустой». Второй результат — отбрасывание частиц обратно — нельзя было объяснить столкновениями с электронами. Масса альфа-частицы в тысячи раз (в 7,5 тысяч раз) больше массы электрона, так что столкновение альфа-частицы с электроном не может заметно искривить ее траекторию (как столкновение теннисного мяча с пылинкой не может искривить траекторию мяча). Резерфорд пришел к выводу, что в центре атома имеется массивное тело, заряженное положительно. Это тело он назвал ядром. Чтобы объяснить возникновение колоссальных кулоновских сил, способных отбросить альфа-частицу обратно, пришлось допустить, что она может подходить очень близко к центру ядра, т. е. что ядро имеет очень малые размеры (в десятки тысяч раз меньше размеров атома).

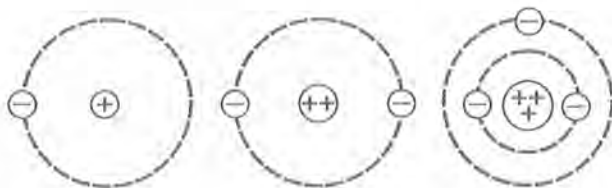


Рис. 146

3. Анализируя результаты этих и других опытов, Резерфорд пришел к следующим выводам. Атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и из электронов, вращающихся вокруг ядра по круговым орбитам. Размеры ядра составляют ничтожную долю атома (если атом водорода «раздуть» до размеров футбольной площадки, то ядро имело бы размер горошины, расположенной в центре площадки, а электрон был бы другой горошиной, облетающей первую по краю площадки). Заряд ядра совпадает с атомным номером данного элемента в таблице Менделеева (если за единицу заряда принять элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Число электронов равно заряду ядра, так что в целом атом является нейтральным. Проще всего устроен атом водорода. Заряд его ядра равен единице, а на орбите находится один электрон. У гелия заряд равен двум, а на орбите находятся два электрона и т. д. (рис. 146). На каждой орбите может быть ограниченное число электронов, так что число орбит растет по мере роста атомного номера.

Упр. 1. Чтобы оценить верхний предел размеров атомного ядра, рассчитайте, на какое расстояние R от его центра должна приблизиться к ядру золота альфа-частица, чтобы полностью затормозиться. Первоначальная скорость альфа-частицы $20\,000$ км/с, масса $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $2e$. Заряд ядра Ze , где $Z = 80$, массу ядра считать бесконечной.

О т в е т: $R = \frac{4KZe^2}{mv^2} = 3 \cdot 10^{-14}$ м.

Упр. 2. Рассчитайте кинетическую и потенциальную энергию электрона в атоме водорода и их сумму (которую можно назвать энергией E атома в данном состоянии). Считать известным радиус орбиты R , заряд ядра $+e$, заряд электрона $-e$. Начертите также график зависимости $E(R)$.

О т в е т: $E = -K \frac{e^2}{2R}$.

§ 93. Излучение и поглощение энергии атомом. Постулаты Бора

1. Модель атома, предложенная Резерфордом, была не в ладах с твердо установленными законами классической физики. Так, было известно, что если заряд движется ускоренно, то он излучает электромагнитные волны. На этом основано действие антенны: заставляя электроны в антенне двигаться взад и вперед, т. е. ускоряться и тормозиться, мы тем самым заставляем их излучать радиоволны. Другим примером может служить рентгеновская трубка: когда электроны тормозятся в результате удара об анод, они испускают рентгеновские лучи. В некоторых ускорителях («бетатронах») пучок электронов движется с огромной скоростью по окружности. Движение по окружности (даже равномерное) всегда является ускоренным, а так как ускорение это (в бетатронах) велико, то электроны излучают заметную долю своей энергии.

Поскольку электрон движется по окружности, т. е. с определенным центростремительным ускорением, он должен излучать энергию. Но если он теряет энергию, он должен падать по спирали на ядро, как падает на Землю спутник, если он теряет энергию вследствие трения о воздух. Атом должен погибнуть за долю секунды, создав при этом вспышку света. Но ничего подобного не происходит, атомы существуют миллиарды лет.

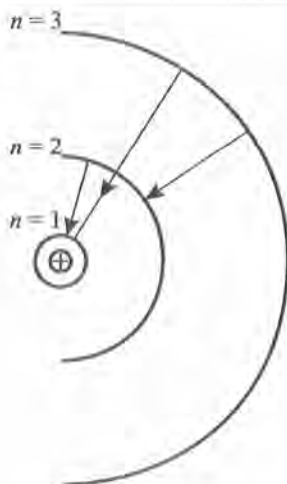


Рис. 147

орбит: R_1, R_2, R_3, \dots (рис. 147), причем пока электрон находится на данной орбите, он не излучает энергии, т. е. энергия атома остается постоянной²;

б) электроны могут перескакивать с одной орбиты на другую. Из законов механики следует, что при переходе на более близкую орбиту энергия электрона уменьшается. Поэтому перескок на более близкую орбиту сопровождается излучением энергии, а на более далекую — поглощением энер-

2. Чтобы найти выход из этих противоречий, Бор¹ предположил (в 1913 г.), что в мире атома господствуют иные (или во всяком случае более общие) законы, чем те, которые управляют поведением крупных тел. Бор попытался угадать некоторые из этих законов и сформулировал их в виде двух постулатов. Применительно к атому водорода (или точнее, к Резерфордской модели этого атома) эти постулаты формулируются так:

а) электрон в атоме водорода может находиться не на любых расстояниях от ядра, а только на одной из разрешенных

¹ Нильс Бор (1885–1962) — датский физик. Наряду с Максом Планком (1858–1947) и Альбертом Эйнштейном (1879–1955) Бор является одним из создателей физики XX столетия.

² Согласно Бору, разрешены только те орбиты, для которых $2\pi R_n = n \frac{h}{mv}$ (т. е. те, на которых укладывается целое число волн Де Бройля). Здесь n — любое целое число, начиная с единицы. Представление о разрешенных орбитах противоречит механике Ньютона (например, спутник, подчиняющийся механике Ньютона, можно запустить на любую орбиту).

гии. Частота испускаемого или поглощаемого света определяется законом сохранения энергии:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n,$$

где E_m — энергия электрона на более далекой орбите R_m , а E_n — на близкой R_n . Перескок электрона на более близкую орбиту может происходить самопроизвольно, обратный же перескок — только после получения соответствующей порции энергии (поглотив фотон или квант энергии другого вида, например, при столкновении с другим атомом).

3. Для всевозможных расчетов важно знать не радиусы разрешенных орбит, а величину энергии, соответствующую данному состоянию атома. Набор значений разрешенных энергий называют энергетическими уровнями атома. Эти уровни изображают в виде горизонтальных линий, расположенных одна под другой (рис. 148). Наивысший уровень (13,6 эВ) соответствует выбитому из атома электрону. Вне атома энергия выбитого электрона может быть любой (заштрихованная область на рисунке).

Самый низкий уровень называют основным, так как при отсутствии внешнего воздействия атом всегда возвращается к этому уровню. (Это соответствует общему правилу: наиболее устойчивое состояние соответствует минимуму потенциальной энергии.) Если атом находится в состоянии с более высокой энергией, атом называют возбужденным.

Теория Бора позволяет рассчитать уровни энергии атома водорода и, следовательно, частоты излучаемых им волн. Совпадение с опытом оказалось поразительно точным.

4. Перед тем как вычислять потенциальную энергию любого тела, надо условиться, какой уровень мы будем считать за нулевой. В зависимости от этого выбора энергию тела придется считать либо положительной, либо отрицательной. Например, энергия ведра, вытягиваемого из колодца, будет положительной, если за начало отсчета принять дно колодца, но будет отрицательной, если за начало отсчета принять уровень земли. Однако при любом начале отсчета энергия (как и высота подъема) ведра в более высокой точке A будет больше, чем в нижней точке

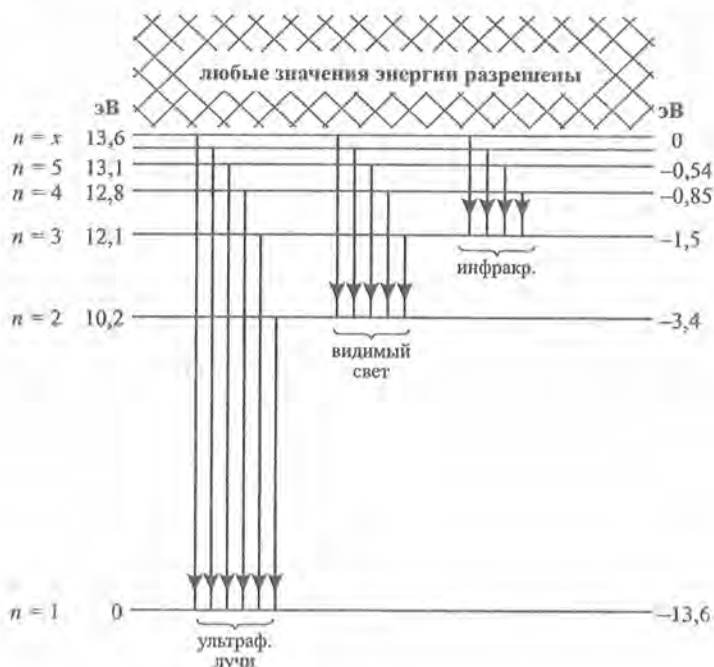


Рис. 148

V (на одну и ту же величину, не зависящую от выбора нулевого уровня).

На рис. 148 за нулевой уровень принят уровень энергии атома в основном состоянии. Тогда энергии всех остальных уровней будут выражаться положительными числами. Однако такой выбор не всегда удобен, так как потенциальная энергия электрона, находящегося вне атома, не будет в этом случае иметь одного определенного значения, а будет зависеть от того, в каком атоме (в атоме водорода, в атоме калия и т. д.) выбрали мы начало отсчета. Желательно выбрать такой нулевой уровень, который был бы общим для всех электронов. Поэтому нулевую энергию условились приписывать электронам, находящимся бесконечно далеко от

атомов. В этом случае можно воспользоваться единой шкалой энергии для всех электронов, где бы они ни находились. Но так как энергия электрона вблизи ядра меньше, чем вдали, то энергия внутриатомных электронов будет выражаться при этом отрицательными числами (см. шкалу в правой части рис. 148).

Совершенно аналогично энергия ведра, стоящего на земле, выражалась бы разными числами, если бы за нуль отсчета принимать дно того или иного колодца. Но можно без всяких оговорок указывать энергию ведра, если за нулевой уровень принять уровень земли. При этом энергию ведра в колодце придется считать отрицательной.

5. Если рассмотреть не атом водорода, а атом другого элемента, то диаграмма энергетических уровней там будет иметь более сложный вид. Однако и в этом случае энергия атома не может быть произвольной, а может принимать только ряд определенных значений: E_1, E_2, E_3 и т. д. В этом главная суть первого постулата Бора. Переход с одного энергетического уровня на другой сопровождается испусканием или поглощением кванта энергии $h\nu_{mn} = E_m - E_n$ (второй постулат).

Упр. 1. Может ли невозбужденный атом водорода поглотить квант с энергией 5 эВ? 11 эВ? 12,1 эВ? 20 эВ? (Здесь и далее использовать диаграмму рис. 148.)

О т в е т: Может только 12,1 и 20 эВ (в последнем случае кинетическая энергия выбитого электрона составит 6,4 эВ).

Упр. 2. В каком случае атом водорода испустит квант большей частоты: когда электрон перескочит с третьего уровня на второй или со второго на первый?

Упр. 3. Предположим, все атомы водорода в данном сосуде были возбуждены до уровня $n = 3$ (соответствующего 12,1 эВ). Сколько сортов разных фотонов будет испускать этот газ? Каковы будут энергии этих фотонов?

О т в е т: 3 сорта.

Упр. 4. Рассчитайте минимальную длину волны, излучаемую атомом водорода.

О т в е т: 90 нм.

Упр. 5. Согласно Бору, разрешены только те орбиты, на которых укладывается целое число волн Де Бройля: (где $n = 1, 2, 3, \dots$). Сопоставьте это уравнение со вторым законом Ньютона: $\frac{mv^2}{R_n} = K \frac{e^2}{R_n^2}$. Исключите из этой системы скорость v электрона и найдите выражение для R_n .

О т в е т:
$$R_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 K m^2}.$$

§ 94. Основные типы спектров испускания

1. Зная вид диаграммы энергических уровней, можно судить о том, каков будет спектр испускания и поглощения данного вещества. Спектром испускания называют спектр, полученный от источников света. Исследуют спектры с помощью спектрографа или спектроскопа. Главной частью этих приборов является призма или дифракционная решетка. В спектрографе спектр фотографируют, а в спектроскопе непосредственно рассматривают.

2. Наблюдения показали, что существуют три основных вида спектров: линейчатые, полосатые и непрерывные. Линейчатый спектр состоит из ряда резко очерченных цветных линий, отделенных друг от друга широкими темными полосами. Каждой линии соответствует определенная длина волны. Для каждого химического элемента характерен присущий только ему набор линий. Полосатый спектр состоит из ряда цветных полос, разделенных темными промежутками (рис. 149). Каждой полосе соответствует некоторый интервал длин волн. Для каждого данного вещества характерны свои полосы. При использовании спектральных аппаратов с большой разрешающей способностью наблюдатель увидит, что эти полосы в подавляющем большинстве случаев распадаются на отдельные, тесно расположенные линии. В непрерывном спектре представлены все цвета (все длины волн), причем переход от одного цвета к другому совершается постепенно.



Рис. 149

Линейчатые спектры получаются от одноатомных газов. Одноатомными являются пары всех металлов и инертные газы. Но и другие газы чаще всего испускают линейчатый спектр, так как, чтобы заставить газ светиться, надо его либо накалить, либо пропускать через него ток. В обоих случаях молекулы газа обычно распадаются на отдельные атомы. Полосатые спектры излучает газ, молекула которого состоит из двух или нескольких атомов, а непрерывный — вещества, у которых все атомы тесно сближены, т. е. твердые и жидкие тела и сильно сжатые газы.

3. Существование линейчатых спектров следует из постулатов Бора. Согласно первому постулату внутренняя энергия атома не может принимать любые значения, а может принимать только дискретный (т. е. не непрерывный) ряд значений: E_1, E_2, E_3, \dots . Значит и частота испускаемого света, определяемого формулой $h\nu_{nm} = E_m - E_n$, может принимать не любые значения, а только вполне определенные. Например, если все атомы водорода возбуждены до уровня $n = 3$ (рис. 148), то будут испускаться фотоны только трех сортов, соответствующие переходам $E_3 - E_1$, $E_3 - E_2$ и $E_2 - E_1$ (т. е. фотоны с энергиями 12,1 эВ, 1,9 эВ и 10,2 эВ). В спектре испускания этого газа будут только три линии.

У молекул больше энергетических уровней, чем у всех вместе взятых атомов, из которых она состоит, и они группируются более сложными способами, поэтому молекулярные спектры сложнее атомарных. Если же тело состоит из многих тесно расположенных атомов, то расстояние между его энергетическими уровнями становится настолько малым (во много раз меньше миллиардной доли электрон-вольта), что спектр практически становится непрерывным. Поэтому у твердых и жидких тел, а также у сильно сжатых газов (каки-

ми являются, например, внутренние слои Солнца и звезд) спектр непрерывный.

Упр. 1. Сколько линий будет наблюдаться в спектре испускания водорода, если все атомы возбуждены до уровня $n = 4$?

О т в е т: 6.

Упр. 2. Один раз электрон в атоме водорода перескочил с 5-го уровня ($E_5 = 13,1$ эВ) на первый, другой раз — с 4-го ($E_4 = 12,8$ эВ) на первый. На сколько длина волны в первом случае отличается от длины волны во втором случае?

О т в е т: $\Delta \lambda = \frac{hc\Delta E}{E_4 E_5} = 1,1$ нм.

Упр. 3. Будут ли различаться две линии, о которых шла речь в предыдущем упражнении, если разрешающая способность спектрографа 2 нм?

Упр. 4. Каково общее число спектральных линий в спектре водорода?

О т в е т: Формально — бесконечное, так как число уровней энергии бесконечно, Но разрешающая способность любого спектрального аппарата ограничена. Это значит, что две близкие спектральные линии невозможно различить отдельно, они будут сливаться в одну. Поэтому кванты, возникающие при переходе с очень высоких уровней (например, с 50-го на 1-й, с 100-го на 1-й и т. д.), практически неразличимы.

§ 95. Спектры поглощения

1. Если между источником непрерывного спектра и призмой (или дифракционной решеткой) поместить цветное стекло или раствор краски (рис. 150), то в спектре могут исчезнуть некоторые участки. Обычно эти участки имеют вид широких темных полос. *Такой спектр называют спектром поглощения данного вещества.* Если вместо цветного стекла на пути лучей поместить одноатомный газ, то вместо темных полос получаются тонкие темные линии. Положение темных линий в спектре поглощения газа точно совпадает с положением свет-

лых линий в спектре испускания этого газа.

Для получения атомарного спектра поглощения исследуемого вещества это вещество помещают в плоскопараллельную ванночку (кювету) с прозрачными окнами, накаливаемую электрической печкой. Если температура

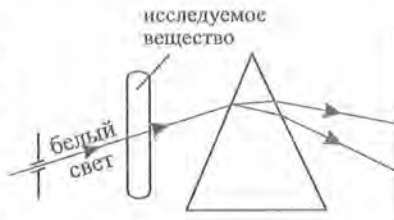


Рис. 150

исследуемого газа выше температуры источника света, то на фоне сплошного спектра могут появиться не темные, а наоборот, более яркие линии. Темные линии в спектре поглощения только кажутся нам такими по контрасту с более ярким фоном сплошного спектра (подобно тому, как темные пятна на Солнце на самом деле являются яркими источниками света).

2. Тот факт, что атом способен поглощать свет только такой длины волны, которую он может излучать, непосредственно следует из постулатов Бора, так как поглощение и излучение энергии соответствует переходам между одними и теми же энергетическими уровнями. Атом способен излучать и поглощать только те фотоны, частота которых удовлетворяет условию

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

Если же частота света такова, что не соответствует ни одному переходу, то такой свет атом не может ни излучать, ни поглощать.

Упр. 1. Атомы, поглотившие свет определенной частоты, затем снова излучают его. Почему же свет этой частоты дает в спектре темную линию, т. е. менее яркую полоску, чем при отсутствии поглощения?

О т в е т: Газ, даже полностью переизлучающий свет, который он поглощает, перехватывает свет, который шел к приемнику света, и излучает его по всем направлениям. Ясно, что только часть первоначального потока дойдет до приемника.

§ 96. Спектральный анализ

1. Чтобы узнать, входит ли в состав данного вещества определенный химический элемент, можно небольшое количество этого вещества ввести в пламя горелки (или электрической дуги) и превратить его в пар. Вещество в таком состоянии дает линейчатый спектр, причем у каждого химического элемента есть свои «оптические приметы» в виде характерных для него линий спектра. В специальных атласах указано, какому химическому элементу принадлежит линия с данной длиной волны, а в спектральных приборах можно установить шкалу, указывающую длину волны каждой линии. Таким образом, наблюдая спектр данного вещества, можно выяснить, присутствует ли интересующий нас химический элемент в данном веществе. Определение химического состава вещества по его спектру называют спектральным анализом.

2. Выгодными особенностями спектрального анализа по сравнению с химическими методами являются:

- а) простота и быстрота анализа (иногда достаточно одной минуты, чтобы получить нужные данные);
- б) высокая чувствительность (можно обнаруживать присутствие миллионных долей миллиграмма примеси);
- в) универсальность: на одной и той же аппаратуре можно проанализировать различные вещества, тогда как при химических методах анализа для каждого вещества надо иметь свой набор реактивов.

Спектральный анализ широко применяется в металлургии, в машиностроении, при разведке руд и минералов, в научных исследованиях и в астрофизике. В металлургии его применяют для анализа смеси, загружаемой в печь, для контроля процесса плавки (это возможно благодаря исключительной скорости спектральных определений) и для анализа готовой продукции. На машиностроительных заводах спектральный анализ позволяет быстро сортировать на складах сталь по маркам, а в особо ответственных случаях каждый кусок стали, предназначенный для ответственных частей машин, подвергается спектральному анализу.

Спектральный анализ используется для контроля чистоты особо чистых материалов, где недопустима даже ничтожная доля примеси (например, при производстве полупроводников или материалов для атомной техники).

3. Спектральный анализ можно применять не только для качественного, но и для количественного анализа. Можно определять концентрацию примеси в стали (например, примесь хрома) и в других веществах, сравнивая интенсивность линий основного элемента и примеси (хрома и железа в нашем примере).

4. Исключительную роль играет спектральный анализ в астрономии, так как только этот метод позволяет узнать химический состав тел, удаленных от наблюдателя на миллионы километров. Когда научились получать четкие спектры, заметили, что солнечный спектр перерезан множеством темных линий. Источником сплошного спектра являются сильно сжатые внутренние слои Солнца. В паружных, более холодных слоях происходит поглощение отдельных участков спектра. Измеряя длину волны темных линий, можно установить, какому химическому элементу они принадлежат. Так был установлен состав солнечной атмосферы и атмосферы звезд. Интересно отметить, что один из химических элементов — гелий — сначала был открыт на Солнце и лишь спустя несколько десятилетий был обнаружен на Земле.

Изучение спектров звезд позволяет узнать также температуру звезды (для этого надо определить, в каком интервале длин волн излучается максимум энергии) и движется ли звезда к нам или от нас и какова скорость этого движения. Если звезда приближается к Земле, то линии поглощения смещаются к фиолетовому концу, если удаляется — к красному. Это явление (эффект Доплера) разбирается подробно в курсе астрономии.

Упр. 1. Можно ли узнать состав вещества, из которого сделана нить электрической лампы накаливания, по ее спектру?

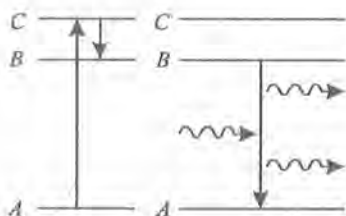


Рис. 151

ни, время жизни которых во много тысяч раз превышает нормальное. Но долгоживущие уровни являются таковыми потому, что переходы с этих уровней в основное состояние происходят много реже, чем у обычных уровней. Это значит, что вероятность перехода с этого уровня на основной во много тысяч раз меньше, чем у

обычных уровней. А это (как показывает теория) означает, что вероятность обратного перехода (т. е. вероятность возбуждения такого состояния) во много тысяч раз меньше, чем вероятность возбуждения других состояний. Поэтому на практике возбуждение нужного уровня производится «окольным путем» через третье возбужденное состояние. Поясним это на примере первого созданного (в 1960 г.) лазера. Рабочим телом там был рубиновый стержень размером с карандаш. В состав рубина входят (помимо других веществ) ионы хрома. У иона хрома много энергетических уровней, но для работы лазера важны три уровня: основной (A на рис. 151) и два возбужденных (B и C). Уровень B является долгоживущим (его среднее время жизни в 100 000 раз превышает время жизни остальных возбужденных уровней). Рубин освещают лампой (рис. 152), дающей очень короткую вспышку света разных частот. При достаточной мощности лампы большинство ионов хрома переходит в состояние C¹. Затем небольшая часть ионов перейдет в основное состояние, но подавляющее большинство перейдет на уровень B и застрянет там. Выделившиеся при этом переходы небольшие кванты энергии передаются кристаллической решетке (без излучения фотонов). Кинетическая энергия атомов решетки при этом увеличивается, т. е. тело слегка нагревается.

¹ На самом деле уровень C у хрома является не линией, а полосой. Это сильно облегчает накачку.

Несмотря на то что средняя длительность жизни ионов хрома на уровне B велика, некоторые из них очень скоро возвращаются в основное состояние (подобно тому, как некоторые люди умирают задолго до достижения средней продолжительности че-

ловеческой жизни). Поскольку вынужденное излучение происходит во много раз быстрее, чем спонтанное, первые возникшие фотоны успеют вызвать лавины новых фотонов задолго до того, как основная масса возбужденных ионов вернется в основное состояние. Возникшие лавины имеют разные направления, так как первоначальные фотоны возникали случайно, независимо друг от друга. Те лавины, что образуют большие углы с осью стержня, выйдут через его боковую поверхность. Те, что параллельны оси или почти параллельны, дойдут до торцов. Торцы тщательно отполированы и представляют строго параллельные друг другу зеркала. Одно зеркало непрозрачное, другое пропускает наружу несколько процентов (8%) падающей на него энергии. Лавины фотонов поочередно отражаются от этих зеркал. Чем ближе направление лавины к направлению оси, тем больше отражений она испытает, прежде чем вылетит через боковые стенки. После каждого отражения фотоны размножаются и мощность пучка усиливается. Мощный пучок света вызывает значительное просветление полупрозрачного зеркала, и пучок вырывается наружу.

В этом лазере каждую минуту делалось несколько накачек. После каждой накачки возникал импульс лазерного излучения. Существуют другие типы лазеров, где осуществлена непрерывная накачка. В этом случае лазерное излучение может возникать как в виде непрерывного света, так и в виде регулярной последовательности импульсов. Момент посылки импульса и длительность импульса могут регулироваться специальными оптическими затворами.



Рис. 152

2. В создании лазеров выдающуюся роль сыграли работы русских ученых. Русский физик В. А. Фабрикант первый выдвинул идею (в 1940 г.) о возможности усиления электромагнитных волн путем создания среды с инверсной населенностью. Возможность использования обратной связи для превращения усилителя в генератор обосновали (в 1952 г.) Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский физик Ч. Таунс. Вскоре после этого (в 1954 г.) ими же были созданы первые квантовые генераторы в радиодиапазоне ($\lambda = 1,25$ см), названные мазерами. Затем в России (А. М. Прохоровым) и в США (Ч. Таунсом и А. Шавловым) была обоснована (в 1958 г.) возможность создания квантовых генераторов в оптическом диапазоне. Первый лазер был создан в 1960 г. в США (Г. Мейманом), а через несколько месяцев появился и у нас. В 1964 году Н. Г. Басов (р. 1922 г.), А. М. Прохоров (р. 1916 г.) и Ч. Таунс (р. 1915 г.) были удостоены Нобелевской премии «за фундаментальные исследования в области квантовой радиофизики, которые привели к созданию генераторов и усилителей нового типа — мазеров и лазеров».

§ 99. Некоторые свойства лазерного излучения

1. Вследствие дифракции любой узкий пучок света будет обязательно расходиться. Наименьший возможный угол расходения, как показывает теория, равен $\frac{\lambda}{d}$ радиан, где λ — длина волны, а d — первоначальный диаметр пучка. Расходимость пучков, полученных с помощью линз или зеркал, всегда больше этого выражения, и только в лазерах реализуется минимальная расходимость, определяемая приведенной формулой.

Пример. Если длина волны 500 нм, а диаметр пучка 1 мм, то угол расходимости не может быть меньше $5 \cdot 10^{-4}$ радиан. Это значит, что на расстоянии 100 м пятно будет иметь диаметр 5 см, на расстоянии 1000 м — 0,5 м и т. д.

2. В лучевой оптике считается, что параллельный пучок света может быть сфокусирован с помощью линз или зеркал в одну точку. Волновая теория уточняет этот результат: вследствие

дифракции получится не точка, а пятнышко, размер которого не может быть меньше длины волны. Но это опять-таки предельный случай, который до появления лазеров никогда не был реализован на практике. Одна из причин связана с тем, что обычный параллельный пучок на самом деле содержит множество пучков, ориентированных под разными углами к оси центрального пучка. Только в лазере этот пучок практически параллелен (и к тому же монохроматичен), так что только лазерные пучки можно сфокусировать в такое крохотное пятнышко.

3. Возможность создания очень узких пучков, очень коротких импульсов (вплоть до 10^{-12} с) и высокая монохроматичность излучения создали возможность получать немыслимые ранее концентрации энергии (в пространстве, во времени и в данном спектральном интервале). Имеются лазеры, мощность которых (в импульсе) многократно превышает суммарную мощность всех электростанций нашей страны. Непрерывно излучающие лазеры имеют мощность до 100 кВт.

4. Излучение, создаваемое большинством лазеров, обладает высокой монохроматичностью, т. е. содержит всего одну длину волны, соответствующую разности энергий уровней, между которыми возникла инверсия. Обычные (тепловые) источники света излучают «смесь» различных длин волн.

§ 100. Применение лазеров

1. Лазерным лучом достаточной мощности любой материал можно расплавить или прожечь, а при еще большей мощности — испарить. Это используется для резки самых различных материалов: металлов, пластмасс, дерева, тканей и т. д. Не исключено, что сверхмощные лазеры в будущем могут осуществить сверхскоростную проходку горных пород.

2. Раньше сложной задачей было сверление узких отверстий в твердых материалах. Например, при производстве ручных механических часов надо делать в рубиновых камнях отверстия диаметром 0,1 мм и меньше. С помощью специальных сверл одно отверстие делалось 15 минут. Автоматическая лазерная установка делает это за одну секунду. Для по-

лучения тонких проволочек их протягивают сквозь узкие отверстия в алмазе. Механическое сверление алмаза длилось до 10 часов, лазер это делает за несколько минут. Очень хрупкие материалы вообще невозможно сверлить механическим способом, а лазером можно.

3. Для лазерной сварки используют как мощные лазеры, сваривающие кузова автомашин, газопроводы, суда и т. п., так и маломощные, например, для приваривания тончайших проволочек к пленкам в микросхемах. Лазерный луч используется и при создании микросхем, чтобы выжечь часть тонкой пленки, напыленной на подложку, создав определенный узор, образующий данную микросхему. Лазерный луч способен вырезать дорожки шириной до 0,2 мкм.

4. В медицине лазерный «скальпель» применяют для рассечения тканей при операциях. Он стерилен и почти бескровен, так как одновременно заваривает мелкие кровеносные сосуды. Лазерный луч не давит на ткани, поэтому их не надо поддерживать рукой или инструментом. Лазерный луч может быть использован и при сшивании тканей. Широко применяют лазер и при лечении глазных болезней: для приварки сетчатки к главному дну, если она отслоилась (это происходит так быстро, что больной не успевает почувствовать боль), для прокола радужной оболочки при лечении глаукомы (в этом случае луч не прожигает оболочку, а пробивает ее созданной лучом ударной волной). Лучи некоторых лазеров стимулируют биологические процессы в организме, что открывает новые перспективы их использования.

5. Лазерные лучи используются в качестве геодезических приборов при проходке тоннелей, при разметке сооружений и т. п. В частности, при постройке Останкинской телевизионной башни в Москве с помощью направленного вверх лазерного луча контролировалась вертикальность башни и исследовались отклонения от вертикали под действием ветра и солнечного нагрева.

6. Без лазера невозможно создавать голографические изображения предметов.

7. Лазеры используются для передачи информации по волоконно-оптическим кабелям, для считывания и записи информации на CD и DVD дисках и т. п.

Здесь перечислена лишь небольшая доля всех применений лазеров.

ГЛАВА 8

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 101. Состав ядра атома

1. Атом любого вещества состоит из ядра и электронной оболочки. Ядро состоит из протонов и нейтронов (их общее название — нуклоны). Протон является положительно заряженной частицей. Его заряд равен по абсолютной величине заряду электрона: $e = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Нейтрон, как показывает название, электрически нейтрален. Массы каждой из этих частиц почти в 2000 раз больше массы электрона (масса протона в 1836 раз больше, а нейтрона — в 1839), так что практически вся масса атома сосредоточена в его ядре. Размеры ядра в десятки тысяч раз меньше размеров атома (атомы имеют размеры порядка 10^{-10} м, а ядра — 10^{-14} – 10^{-15} м).

2. Число протонов в ядре определяет атомный номер данного элемента в периодической системе Менделеева. Первым в таблице стоит водород. Его ядро состоит из одного протона. Вторым стоит гелий. Его ядро состоит из двух протонов и двух нейтронов и т. д. (рис. 153). У легких элементов почти поровну протонов и нейтронов, тяжелые же ядра перегружены нейтронами. Полное число частиц (нуклонов) в ядре называется массовым числом, так как оно почти точно совпадает с атомной массой данного элемента (данного изотопа). За единицу атомной массы когда-то принимали массу самого легкого атома — водорода. Теперь за единицу принимают $1/12$ долю массы атома углерода (изотопа С-12), что менее чем на 1% отличается от старой (водородной) единицы массы. Атом-

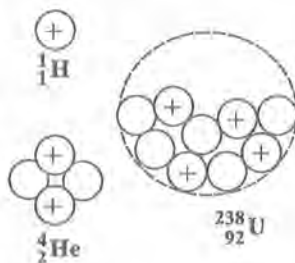


Рис. 153

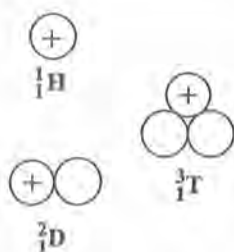


Рис. 154

Существуют ядра с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов. Электронные оболочки у таких атомов одинаковы, поэтому химические свойства таких атомов одинаковы. Эти атомы называются изотопами данного элемента. Все изотопы данного элемента занимают одно и то же место в таблице Менделеева.

Изотопы имеются у всех без исключения химических элементов, в том числе у водорода. На рис. 154 показано ядро обычного водорода и двух его изотопов: тяжелого водорода — дейтерия и сверхтяжелого — трития. Встречающиеся в природе или добытые из соединений химические элементы обычно являются смесью нескольких изотопов. Например, природный уран, который является сырьем для атомной промышленности, является смесью двух (в основном) изотопов: урана-238 и урана-235.

Упр. 1. Сравните число протонов и число нейтронов в изотопах урана.

Упр. 2. Какие изотопы легче отделить друг от друга: изотопы водорода или изотопы урана?

ный номер и массовое число часто записывают возле символа химического элемента: ${}^1_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ или в общем виде ${}^A_Z\text{X}$.

§ 102. Изотопы

§ 103. Ядерные силы

У радиоактивных элементов ядра самопроизвольно могут распадаться. У остальных элементов ядра весьма устойчивы, разрушить их крайне трудно. Это указывает на наличие колоссальных сил, действующих между нуклонами. Расчет показывает, что эти силы не могут быть гравита-

ционными (они в миллиарды миллиардов раз больше гравитационных). Ясно также, что это не электростатические силы, так как такие силы действуют только между протонами и, кроме того, стремятся раздробить ядро, а не сцементировать его. Пришлось признать, что существует еще один класс сил — ядерные силы. Они действуют между любой парой нуклонов. Ядерные силы между двумя протонами примерно в 100 раз превышают силу их электростатического взаимодействия. Взаимодействие ядерных частиц называют сильным взаимодействием, так как сильнее этих сил ничего нет в природе. Другой особенностью этих сил является их короткодействие. Даже при небольшом увеличении расстояния эти силы практически исчезают, поэтому можно считать, что в ядре они действуют только между непосредственными соседями.

§ 104. Радиоактивность

1. Радиоактивностью назвали свойства урана и некоторых других элементов (в частности, всех элементов конца таблицы Менделеева, начиная с № 84, т. е. полония) испускать невидимые лучи¹. Эти лучи, как и рентгеновские, воздействуют на фотопластинки, ионизируют воздух, вызывают люминесценцию ряда веществ и оказывают сильное биологическое действие (разрушают молекулы в клетках, так как ионизируют атомы, входящие в их состав).

В магнитном поле эти лучи расщепляются на три части. Установка, при помощи которой это обнаружено, показана на рис. 155. Радиоактивный препарат *R* находится в свинцовом контейнере, в котором прорезана узкая щель. На фотопластинке, помещенной против щели, возникает ее изображение в виде узкой полоски. Если включить сильное магнитное поле

¹ Это явление открыл в 1896 г. французский физик Беккерель. В первое десятилетие после этого открытия наибольший вклад в исследование радиоактивности внесли супруги Пьер и Мария Кюри (Франция) и Резерфорд (английский физик, в ту пору работавший в Канаде).

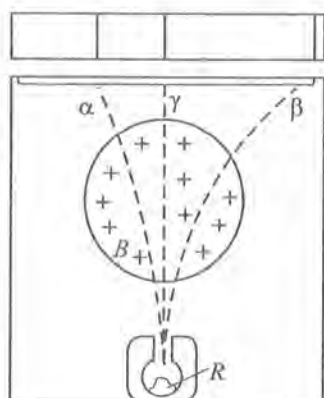


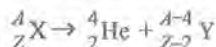
Рис. 155

(направленное от нас за чертеж), то на пластинке появляются три полоски вместо одной. Это означает, что лучи расщепляются на три части. Они были названы альфа-, бета- и гамма-лучами. Пользуясь правилом левой руки, легко видеть, что альфа-лучи являются потоком положительно заряженных частиц, а бета-лучи — отрицательных. Альфа-лучи оказались потоком положительно заряженных атомов гелия He^{++} (это важнейшее открытие было сделано в 1903 г.

Резерфордом), бета-лучи — потоком электронов, а гамма-лучи — электромагнитными волнами наподобие рентгеновских, но с более короткой длиной волны.

Наименьшей проникающей способностью обладают альфа-лучи: они полностью задерживаются листком бумаги. Проникающая способность бета-лучей примерно в 100 раз больше, а гамма-лучей — еще в 100 раз больше.

2. Радиоактивность является самопроизвольным превращением одних атомных ядер в другие. Это превращение сопровождается излучениями, исходящими из ядра. Альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов (рис. 153). Поэтому при испускании альфа-частицы (или, как говорят, при альфа-распаде) атомный номер элемента уменьшается на 2 единицы, а массовое число — на 4. Это условно записывают так:

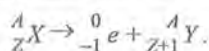


Здесь X — материнское ядро, Y — дочернее, Z — атомный номер элемента, A — его массовое число.

Испускание ядром бета-частицы, т. е. электрона вовсе не означает, что в состав ядра входят электроны. Подобно этому, испускание фотонов атомами вовсе не означает, что фо-

тоны входят в состав атомов. Они рождаются в момент испускания. Бета-распад возникает в результате превращения одного из ядерных нейтронов в протон. При этом согласно закону сохранения заряда должна возникнуть отрицательная частица с зарядом $-e$. Этой частицей является электрон (помимо электрона, излучается еще одна мелкая частица — антинейтрино). Отсюда, казалось бы, следует, что нейтрон состоит из протона и электрона (и антинейтрино), но этому противоречит ряд фактов. Так, протон в атомном ядре, получив от соседних частиц добавочную энергию (и увеличив тем самым свою массу), в свою очередь может превратиться в нейтрон (излучив при этом пару других мелких частиц). Эта способность превращаться из одних частиц в другие (или иначе: способность рождаться и уничтожаться) характерна не только для нейтрона, протона, электрона, но и для всех остальных частиц, которые называют элементарными.

Очевидно, при бета-распаде атомный номер элемента увеличивается на единицу, а массовое число остается неизменным:



Эти закономерности альфа- и бета-распада называют правилами смешения. Они были установлены опытным путем (в 1913 г. английским химиком Содди) задолго до того, как был установлен состав атомного ядра.

Альфа- и бета-лучи не могут одновременно испускаться одним и тем же ядром. Но существуют такие вещества (например, изотоп полония ${}^{216}_{84} \text{Po}$), у которых одна часть ядер испытывает альфа-распад, а другая — бета-распад. Что касается гамма-излучения, то оно сопутствует (но не всегда) альфа- и бета-распаду. Например, радий ${}^{226}_{88} \text{Ra}$ испускает альфа- и гамма-лучи, но полоний ${}^{210}_{84} \text{Po}$ испускает только альфа-лучи¹. Обычно радиоактивный образец содержит, помимо

¹ Существуют ядра (так называемые изомеры), испускающие только гамма-лучи, но это явление не называют радиоактивностью.

данного вещества, еще и продукты его распада (как правило, тоже радиоактивные), поэтому обычно образцы излучают все три вида лучей.

3. Доля атомов, распавшихся за единицу времени, есть величина постоянная для данного вещества. Например, если за год распалось $1/4$ всех атомов, то в следующем году распадется $1/4$ остатка, затем $1/4$ нового остатка и т. д.

Время, за которое распадается половина первоначального числа атомов, называется периодом полураспада T . Он составляет от долей микросекунды до миллиардов лет (например, для радия $T = 1600$ лет, для урана $T = 4,5$ миллиарда лет). Зная период полураспада T и число атомов N_0 в начальный момент, легко рассчитать число нераспавшихся атомов к моменту t . Результат представлен в виде таблицы:

t	0	T	$2T$	$3T$	$t = nT$
N	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{2 \cdot 2}$	$\frac{N_0}{2 \cdot 2 \cdot 2}$	$\frac{N_0}{2^n}$

Отсюда видно, что $N = N_0 \cdot 2^{-n}$ или $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$.

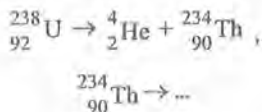
Время существования данного ядра может колебаться от долей секунды до миллиардов лет, но можно рассчитать среднее время жизни ядра. Эта величина

$$\tau = 1,4 T.$$

4. Некоторые радиоактивные ядра родились, по-видимому, миллиарды лет тому назад, другие же рождаются на наших глазах, но доля ядер, распадающихся за единицу времени, остается одинаковой для всех ядер данного вещества независимо от времени их рождения. Все ядра равны перед законом радиоактивного распада. Ядро, родившееся только что, и ядро, просуществовавшее миллиарды лет, имеют одинаковый шанс распасться. Выходит, что ядро распадается не потому, что оно состарилось или имеет какой-то дефект, которого не имеют другие ядра. Физики думают, что если бы мы сумели узнать о ядре все, что только пожелаем (при усло-

вии, что эти пожелания не противоречат законам природы), мы все равно не смогли бы предсказать, когда именно оно распадется. Но возможность точных предсказаний служит показателем того, что между двумя данными явлениями существует причинная связь. В физике микромира этого нет, распадом ядра управляет случай. Выходит, что причинность в том смысле, как понимали ее в XIX столетии, тут не соблюдается. Но понятие причинности, как и многие другие понятия, поддается обобщению. Поскольку существуют вполне определенные законы вероятности, и этим законам подчиняется радиоактивный распад, наличие этих законов можно считать проявлением причинности в обобщенном смысле.

Упр. 1. Ядро урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ (назовем его ядром № 1) испытывает альфа-распад. Полученное дочернее ядро (№ 2) испытывает бета-распад. Полученное новое ядро (№ 3) тоже испытывает бета-распад, ядро № 4 — альфа-распад и № 5 — тоже альфа-распад. Эти превращения можно записать в виде цепочки ядерных реакций. Пользуясь таблицей Менделеева, запишите эти реакции. Первые полторы строчки этой цепочки приводятся ниже.



Упр. 2. Докажите, что кинетическая энергия, выделяемая при альфа-распаде, делится между альфа-частицей и ядром обратно пропорционально их массам.

§ 105. Ядерные реакции

1. Так как ядра всех элементов построены из одних и тех же частиц (протонов и нейтронов), то, по-видимому, откалывая от ядер отдельные частицы или, наоборот, присоединяя к ним новые частицы, можно создавать из одних химических элементов другие. Превращения одних ядер в другие называ-

ют ядерными реакциями. Все ядерные реакции (если не считать самопроизвольного распада ядер при радиоактивных превращениях) происходят в результате взаимодействия ядер с частицами (включая гамма-кванты) или друг с другом.

2. Впервые в истории искусственное превращение элементов осуществил Резерфорд (в 1919 г.). Он обстреливал альфа-частицами разные вещества (для этого вблизи мишени, сделанной из данного вещества, помещался источник альфа-частиц) и сумел разгадать результаты этих реакций. Форму записи ядерных реакций поясним примером.

Пример. При попадании альфа-частицы в ядро азота из него вылетает протон. Пользуясь таблицей Менделеева, запишите реакцию: ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^1_1\text{H} + ?$

Решение: В реакции участвовало $2 + 7 = 9$ протонов. Один из них отделился в виде ядра водорода, следовательно, в неизвестное ядро вошли 8 протонов. По таблице Менделеева находим, что восьмым номером является кислород. Поэтому вместо вопросительного знака надо поставить символ ${}^{17}_8\text{O}$.

Обстреливая альфа-частицами разные вещества, удалось осуществить много ядерных реакций. Однако возможности этого способа ограничены. Во-первых, с помощью альфа-частиц не удастся расщеплять ядра тяжелых элементов, так как в тяжелых ядрах много протонов и они так сильно отталкивают альфа-частицу, что она не может проникнуть туда. Во-вторых, энергия альфа-частицы сравнительно невелика (от 4 до 7 МэВ), тогда как для многих экспериментов (даже с легкими ядрами) надо иметь частицы с более высокой энергией.

3. Огромное количество разнообразных ядерных реакций удалось осуществить с помощью ускорителей, где заряженные частицы (чаще всего протоны) разгоняются электрическим полем и затем направляются в мишень. В ускорителях удалось осуществить ядерные реакции с участием всех элементов периодической системы. Ускорители являются основными инструментами, с помощью которых удастся получить

сведения о строении ядра и о ядерных силах. Существуют также ускорители электронов. Электроны не вызывают ядерных превращений, но, исследуя, как они рассеиваются ядрами, получают сведения о размерах ядер, о распределении зарядов в ядре и другие данные.

Простейшим ускорителем является рентгеновская трубка (рис. 126). Если между анодом и катодом приложить напряжение 100 кВ, то энергия электронов, подлетающих к аноду, будет 100 кэВ. Для ядерных исследований нужны частицы с энергией, по крайней мере, в несколько МэВ. Самые мощные ускорители сообщают частицам энергию в сотни миллиардов электрон-вольт. На таких ускорителях изучают свойства не ядер, а самих элементарных частиц. С помощью ускорителей удалось открыть много новых элементарных частиц, изучить их взаимные превращения и другие свойства. Стоимость мощного ускорителя сравнима со стоимостью крупного завода, а размеры достигают нескольких километров. Такие ускорители играют роль сверхмикроскопов, позволяя заглянуть не только внутрь ядра, но и внутрь мельчайших частиц (протонов, нейтронов и т. д.), которые мы называем элементарными. Только ускорители позволяют изучать свойства материи на самом глубинном уровне.

4. Среди всех ядерных реакций едва ли не самые важные те, которые вызываются нейтронами. На заре ядерной физики (в 30-х годах XX века) источником нейтронов являлась ампула, заполненная смесью радиоактивного вещества с бериллием. При обстреле альфа-частицами бериллий испускал нейтроны. В настоящее время потоки нейтронов получают в результате ядерных реакций в ускорителях и в ядерных реакторах.

Поскольку у нейтрона нет электрического заряда, ничто не мешает ему подойти близко к любому ядру, легкому или тяжелому. Кроме того, в отличие от заряженных частиц, в реакциях могут принимать участие не только быстрые, но и медленные нейтроны.

Упр. 1. При попадании альфа-частицы в ядро бериллия из ядра вылетает нейтрон (1_0n). Напишите реакцию.

Упр. 2. Некоторые ядра урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ при попадании в них нейтрона испытывают бета-распад. Полученное ядро оказывается тоже бета-радиоактивным. Выясните, какой элемент возникает в результате этих двух реакций.

§ 106. Радиоактивные изотопы и их применение

1. В результате ядерных реакций, осуществленных на ускорителях, было получено много изотопов, не встречающихся в природе. Подавляющая часть искусственно созданных изотопов является радиоактивными¹. Радиоактивные изотопы находят широкое применение в народном хозяйстве, в медицине и в научных исследованиях. Некоторые ускорители построены специально для производства радиоактивных изотопов. Часть таких изотопов получают в ядерных реакторах.

2. Радиоактивные изотопы, испускающие гамма-лучи, могут применяться вместо громоздких рентгеновских установок для просвечивания изделий, так как свойства гамма-лучей сходны со свойствами рентгеновских лучей (своих соседей в спектре электромагнитных волн). По одну сторону проверяемого изделия помещают источник гамма-лучей, а по другую — фотопленку. Такой метод просвечивания называют гамма-дефектоскопией. Таким способом в настоящее время проверяется черное и цветное литье, готовые изделия (стальные изделия толщиной до 300 мм) и качество сварных швов.

Такие же изотопы применяются для измерения уровня разных жидкостей в аппаратах и для автоматического поддержания нужного уровня. По одну сторону аппарата помещают изотоп (обычно Co-60), а по другую — счетчик гамма-квантов. Жидкость поглощает гамма-лучи гораздо сильнее, чем

¹ В настоящее время известно более 2000 изотопов более 100 химических элементов. Из них в природе встречаются 280 стабильных и 46 радиоактивных. Стабильные изотопы встречаются только у элементов с атомным номером $Z \leq 83$. Из искусственно созданных изотопов более 150 принадлежат трансурановым (т. е. с $Z > 92$) элементам, не встречающимся на Земле.

воздух, поэтому легко узнать, опустился уровень ниже требуемого или нет. Если опустился, то включается автомат, который восстановит нормальный уровень. Аналогичные устройства используют для контроля уровня чугуна в вагранках и доменных печах.

С помощью радиоактивных изотопов легко на ходу и без соприкосновения измерять толщину металлической ленты или прокатываемых листов металла и автоматически поддерживать толщину постоянной. Под движущейся лентой, выходящей из-под вальцов машины, помещают источник бета-частиц, а над лентой — счетчик. Чем толще лента, тем сильнее она поглощает и рассеивает бета-частицы. Изменение толщины ленты ведет, следовательно, к изменению тока в счетчике. Этот ток усиливается и направляется либо в измерительный прибор, либо в автомат, который мгновенно сблизит или, наоборот, раздвинет вальцы. Приборы подобного типа используются также в бумажной, резиновой и кожевенной промышленности.

3. В химии и биологии широко используется то обстоятельство, что химические свойства всех изотопов данного элемента одинаковы, поэтому если к элементу с обычным изотопным составом добавить необычный изотоп (стабильный или радиоактивный), то обычное течение химических и биологических процессов не нарушится, и во всех реакциях этот изотоп участвует «на равных правах» с другими. Дальнейшую судьбу этих добавленных изотопов легко проследить, поэтому их назвали изотопными индикаторами или «мечеными атомами». Если изотоп радиоактивный, то место нахождения этих атомов легко обнаружить с помощью счетчика; если изотоп стабильный, то, исследуя изотопный состав веществ после реакции, можно узнать, где находятся «меченые атомы». Возможности, которые открыл исследователям метод «меченых атомов», в химии и биологии исключительны. Поясним это несколькими примерами.

Давно химики хотели выяснить, откуда берется кислород, выделяемый растениями. Растения поглощают углекислый газ и воду, и в каждом из этих соединений имеются атомы кислорода. Чтобы выяснить, какому из этих соединений раньше при-

надлежал кислород, надо как-то пометить атомы кислорода, входящие в одно из этих соединений. В качестве такой «метки» использовали изотоп ^{18}O . В одном опыте этим изотопом обогатили воду, а в другом — углекислый газ. Затем проверили изотопный состав кислорода, выделенного растением. В первом случае он оказался обогащенным изотопом ^{18}O , во втором случае он остался обычным. Так узнали, что атомы выделяемого растениями кислорода берутся только из воды.

Особенно быстро можно проводить исследования с радиоактивными изотопами. Поскольку счетчики излучения способны регистрировать каждый отдельный радиоактивный акт (т. е. распад одного атома), при исследованиях можно ограничиться столь малыми примесями радиоактивного вещества, что его присутствие будет совершенно безопасным для живого организма. Вводя через рот или впрыскивая в вену разные вещества, содержащие радиоактивные изотопы, и поднося счетчик к разным частям тела, определяют скорость проникновения этих веществ в различные органы и ткани. Так, впрыскивая в вену одной руки натрий (в виде хлорида), выяснили, что уже через 75 секунд он начал выделяться с потоком на другой руке. Подбавляя в пищу радиоактивный изотоп, удалось установить, через сколько времени те или иные вещества всасываются желудком и разносятся током крови по организму.

С помощью «меченых атомов» получены более точные представления об обмене веществ в организмах. Раньше невозможно было узнать, обновляются ли атомы, из которых построены кости животных, например, атомы фосфора. Подбавляя в пищу животных соединения, содержащие в незначительных количествах радиоактивный фосфор, выяснили, что часть атомов фосфора действительно замещает старые атомы. Так, поднося счетчик к зубам животных, установили, что уже через несколько часов после принятия пищи в зубах появились «меченые атомы».

С помощью «меченых атомов» легко удалось уточнить роль света и удобрений в развитии растений и проследить те пути, которыми движутся через листья или корни отдельные элементы питательных веществ.

В медицине радиоактивные изотопы используются как при диагностике (т. е. для распознавания болезней), так и для лечения. Например, щитовидная железа избирательно поглощает йод, вводимый в организм. Добавляя к йоду малые количества его радиоактивного изотопа, врач с помощью регистрирующей аппаратуры сразу получает данные о скорости накопления йода в щитовидной железе и тем самым устанавливает, правильно ли она функционирует. Раковые опухоли иногда разрушаются под действием кобальтовых «пушек», содержащих радиоактивный изотоп $Co-60$. При этом повреждаются и здоровые ткани, прилегающие к опухоли, но при небольших повреждениях они полностью восстанавливаются.

Гамма-излучение $Co-60$ может полностью уничтожать в продуктах питания все микроорганизмы, практически не изменяя клеток продуктов. Это используется для стерилизации пищевых продуктов. Облучение не изменяет качеств продуктов питания (витаминности, калорийности и др.). Срок хранения картофеля и лука после облучения увеличивается на несколько месяцев, а мясные продукты могут долго храниться без замораживания.

4. Созданы радионуклидные источники электрической энергии. Они используют тепло, выделяемое в образце, поглощающем излучения. С помощью термоэлементов это тепло преобразуют в электрический ток. Источник весом в несколько килограммов обеспечивает мощность в несколько десятков ватт на протяжении 10 лет бесперебойной работы. Такие источники используются для питания автоматических маяков и автоматических метеостанций, работающих в труднодоступных районах. Более мощные источники были установлены на советских луноходах, заброшенных на Луну. Они надежно работали при температурах от $-140^{\circ}C$ до $+120^{\circ}C$.

Радиоактивные вещества хранятся в специальных контейнерах и при надлежащем обращении не представляют никакой опасности. Следует, однако, помнить, что в больших дозах радиоактивные излучения оказывают вредное биологическое действие, поэтому при работе с ними необходимо тщательно соблюдать технику безопасности.

§ 107. Детекторы частиц

1. Ядерная физика не могла бы возникнуть (да и сам факт существования ядра вряд ли удалось бы установить), если бы не были изобретены приборы, позволяющие регистрировать отдельные элементарные частицы и другие частицы, входящие в состав атома. Эти приборы называют детекторами частиц¹. Долгое время считали, что никогда нельзя будет обнаружить отдельный атом, так как мельчайшая частица, видимая в оптический микроскоп, содержит по крайней мере миллиард молекул. Одиночную молекулу невозможно обнаружить никаким световым прибором, так как она представляет для световых волн такую же ничтожную преграду, как пылинка для звуковых волн. Но в XX веке удалось создать приборы, позволяющие обнаруживать не только отдельные атомы, но еще более мелкие частицы, входящие в состав атомов. Их удалось выследить примерно так же, как выследили человека-невидимку в повести Уэллса: по следам, оставленным невидимкой на снегу, по предметам, переломанным им, когда он спасался от преследователей, и т. д. Заряженная частица, если она движется быстро, может ионизировать воздух и вызывать другие действия, позволяющие ее обнаружить.

В первом таком приборе (изобретенном в 1903 г. Круксом) главной частью был экран, покрытый люминесцирующим составом. В точке, куда попадала альфа-частица, возникала вспышка, которую в темноте можно было наблюдать через лупу или микроскоп (рис. 156). Этот прибор неудобен и перестал применяться, когда появились более совершенные детекторы.

2. Одним из используемых в настоящее время (в частности, в дозиметрии) детекторов частиц является счетчик Гейгера. Этот прибор использует способность заряженных частиц ионизировать газ. Основная часть счетчика — стеклянная трубка (например, размером с пробирку), заполненная разреженным газом. Катодом служит слой металла, покры-

¹ Детектор по-латыни означает «обнаруживающий».

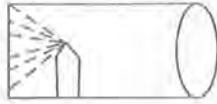


Рис. 156

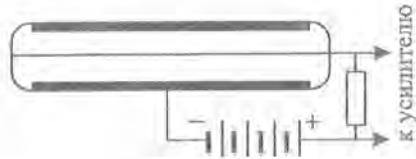


Рис. 157

вающий внутреннюю поверхность трубки, анодом — металлическая нить, протянутая вдоль оси трубки (рис. 157). При такой конструкции электродов густота силовых линий возле нити во много раз больше, чем возле стенок, а это значит, что напряженность поля возле нити во много раз больше, чем возле стенок. Чем выше напряженность поля возле нити, тем легче может возникнуть там разряд, поэтому нить делается очень тонкой (сотые доли миллиметра). К электродам подводится напряжение (порядка 1000 В), подобранное так, чтобы разряд в трубке не возникал, но мог начаться от любого «толчка». Если в трубку попадает заряженная частица, она на своем пути ионизирует газ. Возникшая лавина ионов устремляется к электродам, и возникает кратковременный ток. Этот ток обычно усиливают. На выходе усилителя включают счетчик (или неоновую лампу, или громкоговоритель). В чувствительных счетчиках каждая попавшая в него частица вызывает срабатывание счетчика (или вспышку лампы, или щелчок в громкоговорящем). В зависимости от конструкции счетчика Гейгера способны регистрировать альфа-частицы, бета-частицы и гамма-кванты.

3. Существуют приборы, позволяющие видеть траектории отдельных заряженных частиц. Первым таким прибором была камера Вильсона (изобретена в 1912 г.). Она состоит из цилиндра с поршнем, заполненного насыщенными парами воды (и воздухом) (рис. 158). Если поршень быстро опустить, газ в камере, адиабатически расширяясь, охладится. Пары станут перенасыщенными. Это значит, что конденсации там не происходит, хотя температура стала ниже точки насыщения. Такое состояние возможно, если все пространство очищено от

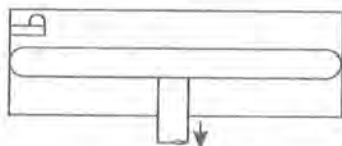


Рис. 158

пыли и от ионов. При пролетании заряженной частицы она образует на своем пути большое количество ионов. Каждый ион становится «центром конденсации» и обволакивается капелькой воды. Вдоль пути частицы возникает дорожка водяных капель, которые можно наблюдать и фотографировать. Видимые следы частиц называют треками.

На рис. 159 показана фотография, где зафиксирована ядерная реакция. Она получена, когда камера Вильсона, в которую был помещен источник альфа-частиц, была заполнена азотом (и водяными парами). Физики научились по углам разлета осколков, по длинам их траекторий, по толщине следа судить о заряде, массе и энергии образовавшихся частиц. Данная фотография была расшифрована так: альфа-частица, попав в ядро азота, была им поглощена. После этого из ядра вылетел протон (тонкий длинный след) и возникло ядро кислорода.

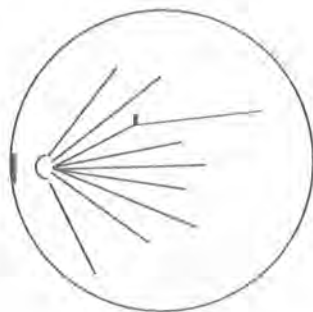


Рис. 159

Много легче расшифровывать результаты ядерных реакций и других превращений, помещая камеру Вильсона в сильное магнитное поле. Впервые это сумели сделать русские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын. Под действием силы Лоренца траектории частиц искривляются. По кривизне трека можно определить знак заряда, импульс частицы и другие данные.

4. Частицы с высокой энергией, получаемые на современных крупных ускорителях, пролетают камеру Вильсона насквозь, поэтому невозможно измерить их пробег и наблюдать все вызванные ими ядерные реакции. Если заменить газ в камере жидкостью, то весь трек мог бы уместиться в камере, так как плотность жидкости в сотни раз больше плотности пара. Такие камеры называют пузырьковыми, так как пролетающая заряженная частица вызывает кипение жидкости, и вдоль ее пути возникают пузырьки пара.

Работа пузырьковой камеры основана на следующих свойствах жидкости: а) с повышением давления возрастает температура, при которой жидкость закипает; б) если повышенное давление внезапно сбросить, то чистая перегретая жидкость закипает не сразу, а спустя некоторое время (порядка 0,01 с).

Сначала жидкость (чаще всего жидкий водород или пропан) доводят до температуры, превышающей точку кипения, но кипение предотвращают повышением давления. Затем давление резко сбрасывают, отпуская поршень или упругую мембрану. Если в этот момент в камеру поступит ионизирующая частица, ионы становятся «центрами кипения» и жидкость вокруг них сразу (за несколько микросекунд) закипает. Пузырьки пара располагаются вдоль траектории частицы, образуя видимый след ее пути (трек).

5. При движении заряженной пластинки в слое эмульсии, покрывающей фотопластинку, в этом слое возникает дорожка, хорошо видимая в микроскоп. Чтобы пробег частицы целиком или хотя бы в значительной части уместился в этом слое, пучки специально изготовленные толстослойные (с толщиной эмульсионного слоя до 1 мм) фотопластинки. Измеряя длину трека, его толщину, степень извилистости и т. д., удается разгадать природу частицы, ее энергию и другие данные.

Упр. 1. Пользуясь таблицей Менделеева, запишите ядерную реакцию, описанную в пункте 3.

Упр. 2. Частица, заряд которой q , влетела в однородное магнитное поле \vec{B} , перпендикулярно силовым линиям. Зная радиус R ее траектории, найдите импульс частицы (считать $v \ll c$).

§ 108. Дозиметрия и защита

1. Все живые существа подвергаются действию солнечного излучения и излучений, вызванных радиоактивными примесями земной коры и космическими лучами (т. е. потоками элементарных частиц высокой энергии, приходящих на Землю со всех сторон из космоса). Живые организмы нормально развиваются в этих условиях. Но в результате создания рентгеновских установок, ускорителей, ядерных реакторов и ядерного оружия появились источники искусственной радиации, мощность которой может многократно превышать естественный радиоактивный фон.

Повышенная радиация оказывает вредное воздействие на биологические ткани. Поглощенное излучение вызывает ионизацию молекул. Нейтроны непосредственно не ионизируют вещество, но даже медленные нейтроны способны вступать в ядерные реакции, сопровождающиеся вылетом заряженных частиц. В результате ионизации резко меняется химическая активность молекул, что приводит к нарушению биологических процессов. Сильное облучение может изменить состав крови (уменьшить число клеток, защищающих организм от инфекций, и клеток, способствующих свертыванию крови; последнее создает опасность внутренних кровотечений). Могут возникнуть раковые опухоли (иногда через много лет после облучения), ожоги и другие нарушения. Даже слабые излучения могут повлиять на наследственность, вызывая вредные мутации. Опасность излучений усугубляется тем, что даже при смертельных дозах они не вызывают никаких болезненных ощущений.

2. Количественно облучение характеризуется поглощенной дозой излучения, которая равна энергии, поглощенной одним килограммом вещества. Единицей этой величины является **грэй** (Гр)¹. 1 Гр равен дозе излучения, при которой одному килограмму вещества передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Измерить поглощенную дозу в живой ткани невозможно. Поэтому сначала измеряют ионизацию, созданную в воздухе; по этим данным рассчитывают дозу, поглощенную в организме.

Биологический эффект облучения зависит не только от поглощенной дозы, но и от природы излучения. Чтобы учесть это, вводят коэффициент качества. Он показывает, во сколько раз биологическая активность данного излучения больше, чем у гамма-лучей (при равных дозах обоих излучений). Для электронов, рентгеновских и гамма-лучей $K = 1$, для альфа-частиц и быстрых нейтронов — 10. Произведение поглощенной дозы на коэффициент качества называют эквивалентной дозой. Ее единица — **зиверт** (Зв). 1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Гр при $K = 1$.

Естественный фон радиации составляет за год эквивалентную дозу в $2,5 \cdot 10^{-5}$ Гр. Для лиц, работающих с излучением, Международная комиссия по радиационной защите установила годовую норму в 50 раз большую. Доза в 0,15 Зв, полученная за короткое время, является смертельной.

3. Чтобы обеспечить безопасность лиц, подвергающихся облучению, принимают ряд мер: а) устанавливают предельно допустимые дозы излучений; б) организуют службу радиационной безопасности; в) применяют средства общей и индивидуальной защиты.

О дозах мы уже говорили. Работники дозиметрических служб располагают приборами двух типов. Одни позволяют определять мощность дозы в данный момент, другие позволяют измерять дозу, накопленную за определенный промежуток времени, например, за неделю. Для последней цели часто используют фотошленку. Ее выдают всем работникам; они

¹ В честь английского ученого Л. Грэя (1905–1965).

носят ее в кармане или в виде браслета на руке. По степени почернения пленки определяют дозу.

Контроль и управление мощными источниками излучения ведется издали с помощью дистанционной аппаратуры. Кроме того, применяют защитные экраны. Лучшим поглотителем гамма-лучей является свинец, нейтронов — вода или парафин. Для предотвращения загрязнения тела применяется специальная защитная одежда.

§ 109. Энергетический выход ядерных реакций

1. При ядерных реакциях, так же как и при химических, энергия может либо выделяться, либо поглощаться. Согласно теории относительности при изменении энергии тел меняется их масса

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

В «обычных» процессах изменение массы совершенно не обнаружимо. При сжигании целого эшелона угля выделившееся тепло уносит с собой только полграмма массы. Но при ядерных реакциях выделяемая (или поглощаемая) энергия в миллионы раз больше, чем при химических реакциях (на каждую единицу массы реагирующих веществ), поэтому изменение массы становится здесь заметным.

2. Имея таблицу точных атомных масс, можно заранее предсказать, какой выигрыш (или проигрыш) в энергии даст та или иная реакция, если ее удалось бы осуществить. Если масса покоя исходных продуктов больше, чем конечных, значит энергия выделялась, если меньше — поглощалась.

Пример. Предположим, что из двух протонов и двух нейтронов нам удалось бы синтезировать одно ядро гелия. Что мы получим: выигрыш или проигрыш? Из таблиц находим:

масса протона	1,007 а. е. м.
масса нейтрона	1,009 а. е. м.
масса ядра гелия	4,004 а. е. м.

(а. е. м. — атомная единица массы, т. е. $1/12$ массы атома углерода С-12). Масса исходных частиц равна $2 \cdot (1,007 + 1,009) = 4,032$ а. е. м., а «конечного продукта» — 4,003 а. е. м. Конечная масса меньше исходной, значит, при образовании ядра гелия из «свободных» нуклонов энергия выделялась бы. Рассчитать ее можно по формуле Эйнштейна.

3. Многие ядерные реакции, осуществленные с помощью ускорителей, сопровождаются выделением огромной энергии (в расчете на единицу массы прореагировавших ядер). Однако о практическом использовании ядерной энергии долгое время (до 1939 г.) не могло быть и речи. Дело в том, что ядерные реакции в отличие от химических не могли развиваться самостоятельно. При сжигании дров нам не требуется отдельно «растапливать» каждую молекулу дерева. Здесь же для расщепления или для синтеза каждого отдельного ядра приходится расходовать сотни тысяч «снарядов», общая энергия которых во много раз больше энергии, выделенной при данной реакции. Использование ядерной энергии стало возможным лишь после того, как открыли возможность саморазвивающейся ядерной реакции (об этом будет рассказано дальше, в § 113).

Упр. 1. Пусть при некоторой ядерной реакции масса конечных продуктов оказалась на 1 а. е. м. меньше массы исходных продуктов. Рассчитайте, сколько энергии при этом выделится. Выразите ее в МэВ.

Решение:

$$\text{а) найдем массу одного атома углерода (в кг) } m = M/N_A = 12 \cdot 10^{-3} / 6 \cdot 10^{23} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ кг};$$

$$\text{б) } \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 10^{-26} (3 \cdot 10^8)^2 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = \frac{1,5 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 930 \text{ МэВ}.$$

Упр. 2. Пользуясь результатом *упр. 1* и данными, приведенными в пункте 2 этого параграфа, рассчитайте, сколько МэВ энергии выделится бы, если из четырех «разобценных» нуклонов удалось бы синтезировать ядро гелия?

О т в е т: 27 МэВ.

Упр. 3. Рассмотрите следующую таблицу.

Средняя кинетическая энергия молекулы вещества при комнатной температуре	0,025 эВ
Фотон света	3,1 эВ
Полное сжигание одного атома углерода	4 эВ
Фотон рентгеновских лучей (на границе с ультрафиолетовой частью спектра)	250 эВ
Гамма-квант	до 3 МэВ
Распад ядра радия	4,8 МэВ
Деление ядра урана (см. § 113)	200 МэВ

§ 110. Энергия связи ядра

1. Масса ядра, как видно из таблицы атомных масс, всегда меньше суммарной массы «свободных» протонов и нейтронов, из которых оно составлено. Эту разницу называют дефектом массы данного ядра. Уменьшение первоначальной массы частиц на величину Δm означает, что при образовании ядра из «разобщенных» нуклонов должна выделяться энергия $\Delta E = \Delta mc^2$. Энергия, которая выделилась бы при образовании ядра из «разобщенных» протонов и нейтронов, называется энергией связи данного ядра. Из закона сохранения энергии следует, что для того, чтобы не синтезировать, а наоборот, расщепить ядро на отдельные частицы, надо сообщить ему энергию, равную энергии связи.

Отношение энергии связи ядра к числу частиц в нем (или иначе, энергия связи, приходящаяся на один нуклон), называется удельной энергией связи. Зависимость этой величины от массового числа ядра показана на рис. 160.

2. Из графика видно, что у гелия (ядро которого состоит из 4-х нуклонов) энергия связи больше, чем у дейтерия (ядро которого состоит из 2-х нуклонов). Это легко объяснить. В ядре гелия каждый нуклон притягивается к трем частицам, а в ядре дейтерия — только к одной. Но если увеличивается сила притяжения, то увеличивается и энергия, которая выделяется, когда нуклон «втягивается» в данное ядро. Выходит, что с увеличением числа нуклонов в ядре удельная энергия связи должна

возрастать. Однако тут имеется много усложняющих обстоятельств, вследствие чего график на начальном участке (примерно до 20-го массового члена) идет не плавно, как показано на рисунке, а зигзагами.

Для тяжелых ядер удельная энергия связи, начиная с некоторого массо-

вого члена, начинает уменьшаться. Объясняется это тем, что ядерные силы короткодействующие (и сверх того, подобно химическим силам, способны к насыщению), поэтому рост числа нуклонов в ядре перестает влиять на величину сил, связывающих данный нуклон. Зато начинает сказываться отталкивание между протонами. Наличие сил отталкивания равносильно уменьшению сил притяжения, а с уменьшением сил притяжения уменьшается энергия, выделяемая при втягивании нуклона.

3. Из графика (рис. 160) видно, что удельная энергия связи у самых тяжелых и у самых легких ядер меньше, чем у тех, что расположены в средней части таблицы Менделеева. Отсюда следует, что если тяжелое ядро разделится на два или три одинаковых осколка или если самые легкие ядра сумеют объединиться в более крупные, то энергия будет выделяться. В самом деле, пусть надо выяснить, получим мы выигрыш или проигрыш в энергии (и какой именно), если ядро с массовым числом 240 разделится на два одинаковых осколка. Из графика видно, что удельная энергия связи у ядра-240 равна 7,5 МэВ/нуклон, а у ядра-120 — 8,5 МэВ/нуклон. Представим, что ядро-240 сначала распалось на 240 нуклонов, а потом из них составились 2 ядра-120. В первом процессе мы должны добавить энергию в размере 7,5 МэВ/нуклон, во втором мы получим 8,5 МэВ/нуклон.

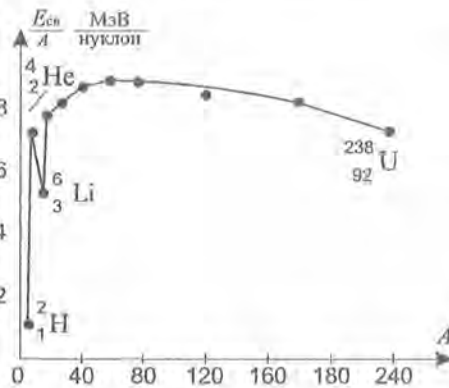


Рис. 160

В окончательном итоге оказалось, что мы получили выигрыш в 1 МэВ/нуклон, а так как всех нуклонов было 240, то полный выигрыш составил 240 МэВ. Из графика видно также, что выигрыш в энергии можно получить, синтезируя из самых легких ядер более тяжелые (например, из изотопов водорода — гелий).

Обе возможности получения ядерной энергии (деление тяжелых ядер и синтез легких) осуществлены в земных условиях. Деление ядер используется в атомной бомбе и в реакторах, используемых на атомных электростанциях и атомных судах. Синтез легких ядер использован в водородной бомбе и, видимо, будет осуществлен в недалеком будущем в виде управляемой термоядерной реакции.

Упр. 1. Ядро с атомным номером Z содержит N нейтронов и имеет массу M . Известна масса покоя протона m_p , и нейтрона m_n (все массы даны в кг). Найдите энергию связи этого ядра (в Дж).

О т в е т: $\Delta E = (Zm_p + Nm_n - M)c^2$.

Упр. 2. Пользуясь графиком (рис. 160), определите энергию связи ядра с массовым числом $A = 100$.

Упр. 3. Используя результат *упр. 2* к предыдущему параграфу, рассчитайте удельную энергию связи в ядре гелия.

Упр. 4. При слиянии ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ с ядром трития ${}^3_1\text{H}$ из вновь образовавшегося ядра вылетает нейтрон. Напишите ядерную реакцию и рассчитайте, сколько МэВ энергии при этом выделяется. Атомная масса ядра дейтерия (в а. е. м.) равна 2,014, трития — 3,016, гелия — 4,003, нейтрона — 1,009. Для облегчения расчетов используйте результат *Упр. 1* к предыдущему параграфу (1 а. е. м. = 930 МэВ).

О т в е т: Около 17 МэВ.

§ 111. Деление урана

1. Первой осуществленной в земных условиях саморазвивающейся ядерной реакцией была реакция деления урана, открытая незадолго до Второй мировой войны (1939). При бомбардировке ядра урана нейтронами от него, как выяснилось,

отлетает не мелкий осколок (протон или альфа-частица), как в большинстве других реакций, а все ядро делится на две почти равные части. Эту реакцию назвали делением ядра¹.

Деление ядра урана сопровождается выделением огромной энергии (около 200 МэВ на каждое распавшееся ядро). Но самым важным является то, что каждое деление сопровождается выбросом двух-трех нейтронов. Эти нейтроны при некоторых условиях могут вызвать деление новых ядер урана, и раз начавшаяся реакция может продолжаться без внешнего воздействия (такую реакцию, когда первая «активная частица» — в данном случае нейтрон — не только делает свое дело, т. е. расщепляет ядро, но и порождает новые активные частицы, называют цепной).

2. В природном уране цепная реакция возникнуть не может. Природный уран является смесью двух (в основном) изотопов: урана-238 (99,3%) и урана-235 (0,7%).

Оба изотопа способны захватывать нейтроны, но делятся обычно только ядра урана-235 (ядро урана-238 также способно делиться, но это событие происходит много реже, чем захват нейтрона без деления).

Ясно, что в природном уране реакция не может развиваться, поскольку все появляющиеся в куске нейтроны захватываются без деления ядрами урана-238². Осуществить цепную реакцию в уране сумели двумя способами: в виде взрыва (в атомной бомбе) и в виде медленно протекающего, регулируемого процесса (в ядерном реакторе).

¹ Дальнейшие исследования показали, что ядро почти любого тяжелого элемента способно делиться под действием частиц высоких энергий: нейтронов, протонов, дейтонов, альфа-частиц и даже фотонов. Но для современной ядерной энергетики непосредственную ценность имеют только те вещества, которые могут делиться под действием нейтронов любых энергий. Таких известно в настоящее время только три: уран-235, уран-233 и плутоний-239. (Из них в природе встречается только уран-235, остальные два вещества могут быть искусственно созданы в ядерных реакторах.) Эти три вещества называют делящимися.

² Совершенно аналогично реакция горения дерева не может развиваться в смеси, состоящей на 99,3% из бульбкника и лишь на 0,7% из щепок.



Рис. 164

замедленные нейтроны будут безостановочно бродить между ядрами, пока не набредут на ядра урана-235 и не вызовут их деление, породив новое поколение нейтронов. Присутствие ядер-238 не влияет заметно на этот процесс, так как медленные нейтроны в подавляющем большинстве случаев отскакивают от них без поглощения.

2. Лучшими замедлителями являются вещества, не

поглощающие нейтроны (испытывающие с ними только упругие столкновения) и способные быстро, после немногих столкновений замедлять их. Из законов упругого удара следует, что частица лучше всего замедляется при столкновении с частицей равной массы¹. Поэтому лучшим замедлителем нейтронов должен являться водород. Замедлитель выгодно применять не в газообразном состоянии, а в жидком или твердом, так как в таких веществах атомы упакованы в сотни раз плотней, чем в газе (значит, замедление в них происходит быстрее). Поэтому вместо водорода выгодно использовать жидкое или твердое соединение, богатое водородом. Самым дешевым из таких веществ является вода (присутствие атомов кислорода не препятствует замедлению: налетев на такой атом, нейтрон отскакивает от него). У воды есть один недостаток: водород поглощает нейтроны, и в природном уране реакция с водой не идет. Воду можно

¹ Например, если бильярдный шар ударит «в лоб» неподвижный шар такой же массы, он сразу остановится. Если же он налетит на легкий шар (например, целлулоидный), то оба покатятся вперед и скорость первого шара изменится незначительно. Наконец, если бильярдный шар налетит на стенку, он отскочит с такой же скоростью, как до удара. Чем больше отличается масса замедляющего тела от налетающего, тем хуже происходит замедление.

использовать только в реакторах, использующих уран, обогащенный изотопом-235.

После водорода следующим по массе веществом является дейтерий. Он, как и водород, используется не в газообразном состоянии, а в связанном, в виде тяжелой воды. Тяжелая вода является лучшим замедлителем (критическая масса реактора в этом случае получается наименьшей), но она стоит дорого. Из других замедлителей чаще всего используют графит (другие легкие элементы по ряду причин менее удобны, например, гелий не применяют потому, что жидкий гелий очень дорог, а жидких или твердых соединений, содержащих гелий, не существует). Графитовый замедлитель представляет собой сложное из графитовых кирпичей тело, в котором сделаны вертикальные каналы (в эти каналы вставлены стержни из природного или обогащенного урана). Критическая масса загруженного урана для реактора с графитовым замедлителем на природном уране составляет 50–200 тонн. Чтобы уменьшить критическую массу (и чтобы можно было использовать в качестве замедлителя обычную воду), используют не природный, а обогащенный изотопом-235 уран (до 2–5%).

3. *Устройство реактора и управление им.* Основной частью реактора является активная зона, т. е. область, где происходит самоподдерживающаяся реакция. Она состоит из замедлителя и урановых стержней. Чтобы уменьшить критическую массу загружаемого урана, активную зону окружают отражателем нейтронов, который возвращает большую часть вылетающих из зоны нейтронов. Отражатель обычно делают из того же материала, что и замедлитель.

Для управления реактором внутрь активной зоны вводят управляющие стержни, сделанные из материала, сильно поглощающего нейтроны (например, из бора). Если стержни введены на полную глубину, реакция прекращается. Если их выдвинуть, начнется реакция. По достижении желаемой мощности их устанавливают на определенном постоянном уровне.

В стержнях, содержащих уран, непрерывно выделяется тепло. Основная доля энергии (свыше 80%) выделяется оттого, что осколки, расталкиваемые электростатическими сила-

ми, разлетаются с огромными скоростями. Сталкиваясь с остальными атомами, они передают им свою энергию, увеличивая энергию их беспорядочного движения. Для отвода тепла сквозь каналы, в которые вставлены урановые стержни, прокачивают охлаждающую жидкость или газ (теплоноситель). Чтобы предотвратить попадание в теплоноситель ядерного топлива или осколков деления, стержни с ядерным топливом заключают в герметичную металлическую оболочку.

Для защиты обслуживающего персонала от излучений (самыми проникающими излучениями являются нейтроны и гамма-кванты) в реакторе имеется биологическая защита. Иногда ее изготавливают в виде бетонной стены, охватывающей со всех сторон реактор; толщина такой стены достигает трех метров.

4. Цепная реакция в реакторе прекращается задолго до того, как выгорит все ядерное горючее (т. е. задолго до того, как израсходуется весь запас урана-235). В реакторе постепенно накапливаются осколки деления, представляющие собой ядра различных химических элементов. Некоторые из них поглощают нейтроны. Для того чтобы возместить растущий захват нейтронов осколками деления, а также постепенное уменьшение делящегося вещества, приходится часть управляющих стержней выдвигать из реактора. Однако наступает момент, когда этого оказывается недостаточно, и приходится перезаряжать реактор, заменяя «выгоревшие» урановые стержни новыми. За одну кампанию удается выжечь не более 15–25% урана-235. Длительность одной кампании составляет (для реакторов атомных электростанций) от одного года до нескольких лет.

Упр. 1. При делении одного ядра урана-235 выделяется 200 миллионов электрон-вольт энергии. Рассчитайте, сколько джоулей энергии выделится при распаде одного моля этого вещества и одного килограмма этого вещества? Во сколько раз удельная теплота сгорания урана-235 больше, чем удельная теплота сгорания каменного угля, у которого $q = 30$ МДж/кг?

О т в е т: Почти в 3 миллиона раз.

§ 114. Атомная энергетика

1. Выделяющееся в реакторе тепло можно использовать для получения пара. Этот пар направляют в турбину, приводящую в действие электрический генератор. На рис. 165 показана наиболее распространенная схема ядерного реактора, где обычная или тяжелая вода одновременно используется в качестве замедлителя и теплоносителя. Первая в мире атомная электростанция была построена в нашей стране (в 1954 г.). Теперь они строятся во всем мире, и доля их в выработке электроэнергии непрерывно растет. Если в 1980 году их доля в мировом производстве электроэнергии составляла 8%, то в 2005 — 17%. Тепловые станции больше не могут удовлетворить растущие потребности в электроэнергии: запасы нефти и газа будут израсходованы за несколько десятилетий, а мощные угольные станции при современной технологии использования угля слишком загрязняют атмосферу. К тому же по мере исчерпания легкодоступных запасов органического топлива их добыча становится все более сложной и дорогостоящей.

Важной особенностью атомных станций является ничтожный расход горючего — в тысячи раз меньше, чем в установках на органическом топливе. Для станции мощностью 1000 МВт, работающей на угле, надо ежегодно подвозить 50 000 вагонов топлива, для атомной станции такой же мощности — меньше 10 вагонов. Это делает атомные станции особо привлекательными для районов, удаленных от месторождений топлива. По той же причине атомные силовые установки применяют на военных судах. Атомные подводные лодки способны по несколько лет обходиться без перезарядки реактора (за это время каждая может десятки раз обогнуть земной шар). Следует, однако, отметить, что не только строительство, но и эксплуатация атомных установок малой мощности обходится в несколько раз дороже, чем установки на органическом топливе. Поэтому на «торговых» судах (кроме ледоколов) атомные установки не ставят.

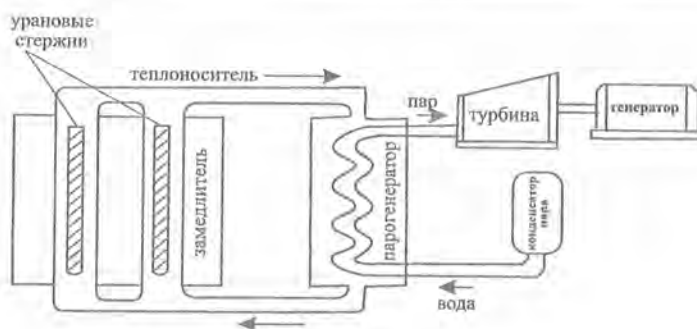


Рис. 165

2. Облученное топливо, выгруженное из ядерного реактора, подвергают переработке на специальных заводах. Неиспользованное ядерное горючее отделяют для повторного использования от продуктов деления. Эти продукты радиоактивны. Необходимость надежного захоронения этих продуктов является сложной и ответственной задачей.

3. Конструкция реакторов такова, что ядерный взрыв реактора невозможен. Самой тяжелой из всех аварий является такая, при которой расплавилась бы активная зона реактора. Это может привести к утечке радиоактивных изотопов и подвергнуть опасности заболевания или даже смерти многие тысячи людей. Вероятность такой аварии ничтожно мала, но все же одна такая авария имела место (в 1986 г. в Чернобыле, в 120 км от Киева). Несколько десятков тысяч человек пришлось после этого эвакуировать из окружающей местности в другие районы страны. На всех действующих и строящихся атомных электростанциях приняты дополнительные меры по обеспечению безопасности, которые должны полностью исключить возможность выброса радиоактивных веществ.

§ 115. Воспроизводство ядерного горючего

1. Помимо деления урана-235 в ядерном реакторе происходит накопление ценного ядерного горючего — плутония.

Происходит это оттого, что некоторая доля нейтронов захватывается ядрами урана-238. Полученное ядро дважды испытывает бета-распад, в результате чего образуется плутоний (проверьте это утверждение, записав обе реакции). Плутоний, как и уран-235, является делящимся материалом, т. е. делится под действием нейтронов любой энергии. Он наряду с ураном-235 принимает участие в реакции деления, благодаря чему несколько повышается количество энергии, выработанной в реакторе за одну кампанию. Из плутония, как и из урана-235, можно сделать атомную бомбу; таким образом, при работе любой атомной электростанции накапливается материал, который может служить горючим в ядерных реакторах и сырьем для атомной бомбы.

2. Образование плутония в реакторе называют воспроизводством ядерного горючего. Если бы удалось создать такой реактор, где основную массу природного урана удалось бы переработать в плутоний, то запасов дешевых урановых руд хватило бы не на несколько десятилетий (так будет, если будет использоваться только уран-235, которого в природном уране очень мало — 0,7%), а на много столетий. Однако в реакторах на тепловых нейтронах количество воспроизведенного горючего не может быть большим. При делении урана-235 возникает в среднем 2,5 нейтрона. Из них один нужен для поддержания реакции. Из оставшихся полутора часть безвозвратно вылетает из активной зоны, часть поглощается радиоактивными осколками, и часть поглощается ураном-235 без деления. В результате для воспроизводства остается меньше одного нейтрона, т. е. возникает меньше ядер плутония, чем выгорает урана-235.

3. Число возникающих ядер плутония можно сделать больше числа выгорающих ядер урана в реакторах на быстрых нейтронах. Это связано с тем, что, во-первых, при поглощении быстрых нейтронов доля ядер урана-235, поглотивших нейтроны без деления, уменьшается. Во-вторых, воспроизводимыми ядрами (т. е. ядрами-238) поглощается значительно больше нейтронов, чем в реакторе на тепловых нейтронах. Наконец, ядра-238 могут делиться быстрыми нейтронами. Но без замедлителя в природном уране цепная реакция не идет.

Реакция без замедлителя может идти только в сильно обогащенном (по крайней мере, до 15%) уране. Активная зона такого «реактора-размножителя» состоит из обогащенного урана и управляющих стержней, способных интенсивно поглощать нейтроны. Вокруг активной зоны расположен природный уран. В нем происходит расширенное воспроизводство ядерного горючего, т. е. возникает больше ядер плутония, чем выгорает урана-235.

Если тепловые реакторы могут «сжечь» менее 1% природного урана, то использование реакторов-размножителей увеличит это число в десятки раз. Но в настоящее время строительство и эксплуатация таких реакторов обходится очень дорого, поэтому пока их строят только в порядке эксперимента.

§ 116. Термоядерные реакции

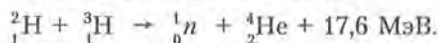
1. Развитие атомной энергетики, основанной на делении ядер, сталкивается со следующими проблемами:

- а) запасов дешевого урана хватит ненадолго (на несколько десятилетий, если не удастся создать годные для массового строительства реакторы-размножители);
- б) трудно надежно хоронить радиоактивные отходы. Надо оберегать их от контакта с подпочвенными водами и обеспечивать надежный отвод тепла в течение многих столетий;
- в) в реакторах вырабатывается плутоний, который является самой важной и самой дорогой частью атомной бомбы. У любой страны, где есть атомные станции, открывается возможность создания атомной бомбы;
- г) последствия тяжелой аварии могут быть катастрофическими.

Поэтому наряду с развитием энергетики, основанной на делении ядер, идет поиск других путей использования атомной энергии. Этим другим путем является (как видно из рис. 161) синтез (слияние) легких элементов. Для того чтобы два ядра могли слиться, надо их тесно сблизить. Но этому ме-

шает кулоновское расталкивание ядер. Нужное сближение может произойти лишь при температурах, измеряемых многими миллионами градусов. Поэтому такие реакции называют термоядерными.

Чем больше заряд ядер, тем больший потенциальный барьер надо преодолеть, чтобы их сблизить. Поэтому легче всего осуществить синтез ядер водорода или его изотопов. Реакция синтеза обычного водорода (${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H}$) происходит в недрах Солнца и звезд и является одним из звеньев процесса, поддерживающего энергию звезд. Однако эта реакция происходит очень редко (на Солнце она происходит с данным атомом раз в 14 миллиардов лет) и в земных условиях не может быть использована. В земных условиях наиболее подходящей оказалась реакция слияния дейтерия с тритием:



Дейтерий содержится в природной воде (на 7000 молекул природной воды приходится одна молекула тяжелой воды), и его извлечение обходится в десятки раз дешевле, чем извлечение нефти с той же энергией. Тритий в природе не существует. Его получают из лития, обстреливая его нейтронами. В будущих термоядерных реакторах тритий будет получаться в самом реакторе за счет использования нейтронов, рождающихся при реакции.

Неуправляемая реакция, использующая смесь дейтерия и трития, была использована в водородной бомбе. Роль «спички», поджигающей эту смесь, играла атомная бомба. Мощность водородной бомбы может быть во много раз больше, чем атомной, поскольку ее размеры не ограничены величиной критической массы. Выделяемая при ее взрыве энергия эквивалентна энергии взрыва миллионов тонн обычных взрывчатых веществ.

2. Для осуществления управляемой термоядерной реакции смеси дейтерия с тритием надо нагреть смесь до температуры порядка 100 миллионов градусов. Уже при температуре в несколько десятков тысяч градусов дейтерий и тритий полностью ионизируются, т. е. являются смесью ядер и оторвавшихся от них электронов. Сильно ионизированный газ

(в котором плотность положительных и отрицательных зарядов одинакова) называют плазмой. Плазму надо изолировать от стенок камеры, в которой она содержится. Во-первых, при контакте с горячей плазмой стенки любого сосуда обратятся в пар. Во-вторых, плазма обладает столь высокой теплопроводностью, что при контакте со стенками мгновенно остывала бы. В качестве барьера, удерживающего плазму вдали от стенок, используют магнитное поле. Известно, что магнитное поле, возникающее вокруг двух параллельных проводов, по которым текут одинаково направленные токи, создает силы, которые заставляют эти провода сближаться. Поэтому, если в плазме создать ток (сотни тысяч и миллионы ампер), то он не только будет нагревать плазму и поддерживать ее горячей, но создаст магнитное поле, сжимающее ее в узкий шнур. Однако плазма оказалась неустойчивой. В ней возникают колебания и волны, в результате чего плазма просачивается между силовыми линиями, и изоляция ее нарушается еще до того, как достигнута нужная температура. В первых опытах (начатых в 1950 г. независимо друг от друга в СССР и США) удавалось достигнуть температур порядка 100 тысяч градусов, а время удержания плазмы измерялось микросекундами. За 40 лет исследований удалось создать о плазме целую науку и поднять температуру плазмы до 100 миллионов градусов, а время удержания — до одной секунды. В настоящее время сооружаются крупные установки, в которых будет изучаться поведение плазмы при тех условиях, которые должны быть в реальном термоядерном реакторе. Кроме того, ведется проектирование большого реактора «Интор» (интернациональный торондальный), который будет построен совместными усилиями нашей страны, США, стран Западной Европы и Японии. В нем будет осуществлен режим, близкий к режиму реального реактора. Строительство и наладка реактора займет почти целое десятилетие. Если исследования пройдут успешно, то во втором десятилетии XXI века может быть построен первый термоядерный реактор. Такой реактор в случае возникновения аварийной ситуации будет в миллион раз менее опасен (в смысле радиоактивности), чем реактор деления.

Упр. 1. При обстреле лития ${}^7_3\text{Li}$ нейтронами возникает тритий и гелий. Напишите ядерную реакцию.

Упр. 2. В одной фантастической повести рассказывается об автомобилях, где топливом является смесь дейтерия и трития. Предположим, машину загрузили 2 кг дейтерия и 3 кг трития (т. е. по 1000 молей того и другого). На сколько суток непрерывной работы хватило бы этой загрузки, если мощность двигателя 100 кВт, а к. п. д. 100%?

О т в е т: 200 000 суток, т. е. более 500 лет.

ГЛАВА 9

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. СОВРЕМЕННАЯ НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА

§ 117. Введение

Элементарными называют частицы, которым на современном уровне знаний нельзя приписать определенную внутреннюю структуру, т. е. нельзя представить состоящими из каких-либо других частиц. Долгое время (до начала XX века) роль элементарных частиц играли и атомы. Потом установили, что атомы состоят из протонов, нейтронов и электронов. Эти частицы (к которым были добавлены и фотоны) стали играть роль элементарных. Однако такая простая картина держалась недолго. Одна за другой (начиная с 1932 г.) были открыты новые элементарные частицы. Теперь их известно несколько сотен. Мы расскажем только о некоторых из них.

§ 118. Нейтрино

При бета-распаде из ядра вылетают электроны с различными энергиями. При этом вновь образующиеся ядра совершенно одинаковы независимо от того, какова была энергия испущенного электрона. Таким образом, разность между внутренней энергией исходного ядра и конечного ядра получается различной. Чтобы не войти в противоречие с законом сохранения энергии, предположили, что при бета-распаде рождается еще частица-невидимка, которая уносит с собой недостающую энергию (когда энергия электрона меньше некоторой максимальной). Эту частицу Ферми назвал нейтрино (что по-итальянски означает «нейтрончик»). Масса покоя нейтрино долгое время считалась равной нулю, но теперь есть данные, что она конечна, хотя и очень мала. Будучи электрически нейтральным, нейтрино не участвует в электромагнитных взаимодействиях. Также не подвержено оно ядерным силам (т. е. сильным взаимодействиям), поэтому реакции с участием нейтрино происходят крайне редко. Отсюда следует, что нейтрино обладает колоссальной проникающей способностью. Стальная плита, толщина которой равна расстоянию от Земли до Солнца, смогла бы задержать лишь одно из ста миллионов нейтрино.

Помимо нейтрино, возникающего при бета-распаде ядер (это нейтрино называют электронным и обозначают ν_e), существуют еще по меньшей мере два сорта нейтрино. Процессы, приводящие к образованию нейтрино, происходят повсеместно: в недрах Земли, в ее атмосфере, в Солнце и звездах; нейтрино, видимо, столь же распространенные частицы, как фотоны.

§ 119. Античастицы

1. У каждой элементарной частицы (кроме фотона и еще немногих) существует двойник, имеющий одинаковую с данной частицей массу и время жизни, но отличающийся от нее знаком заряда и некоторыми другими характеристиками. Первой из античастиц был открыт (в 1932 г.) антиэлектрон:

эту частицу назвали позитроном. Характерная особенность поведения частиц и античастиц — их аннигиляция (что по-латыни означает исчезновение) при встрече. Так, при встрече электрона с позитроном обе частицы исчезают, но возникают два гамма-кванта:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma ,$$

(из закона сохранения импульса ясно, что один фотон не может возникнуть). Возможен и обратный процесс: рождение электронно-позитронной пары из гамма-кванта, когда гамма-квант пролетает вблизи ядра:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ .$$

2. При высоких энергиях аннигиляция электрона с позитроном приводит к рождению более тяжелых частиц (например, мюонов, массы которых в 200 с лишним раз превышают массу электронов):

$$e^- + e^+ \rightarrow \mu^+ + \mu^- .$$

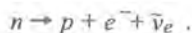
На ускорителях удалось создать и более тяжелые античастицы: антипротон, антинейтрон и даже антиядра некоторых веществ, например, антигелия. Очевидно, может существовать и антивещество, атомы которого состоят из антипротонов и антинейтронов, а оболочка — из позитронов. В земных условиях антивещество не может существовать длительное время — оно сразу аннигилировало бы с веществом. При этом выделилась бы колоссальная энергия (при аннигиляции 1 г вещества с 1 г антивещества выделилась бы энергия, эквивалентная взрыву атомной бомбы). Ясно, что не может быть антивещества и в Солнечной системе. Но нельзя исключить возможности, что в некоторых областях Вселенной имеются скопления или даже целые галактики, состоящие из антивещества.

3. В нижеследующей таблице приведены данные о тех частицах и античастицах, о которых до сих пор шла речь.

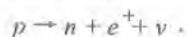
Название частицы	Обозначение		Масса покоя (в электронных массах)	Эл. заряд (в единицах, e)	Время жизни
	частицы	античастицы			
Фотон	γ		0	0	Стабилен
Электрон	e^-	e^+	1	-1	Стабилен
Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$< 0,00010$	0	Стабильно
Протон	p	\bar{p}	1836,1	+1	Стабилен (>10 лет)
Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	15,3 минуты

§ 120. Взаимопревращаемость частиц

1. Важное свойство элементарных частиц — их способность превращаться друг в друга. С некоторыми видами таких превращений мы уже имели дело. При бета-распаде один из нейтронов ядра превращается в протон, излучая при этом две легкие частицы:



Свободный нейтрон также распадается по этой схеме (среднее время жизни свободного нейтрона — 15,3 минуты). Этот распад, как мы уже упоминали, нельзя толковать так, что нейтрон состоит из тех частиц, на которые он распался. Этому противоречит хотя бы тот факт, что протон в ядре, получив от других нуклонов добавочную энергию и увеличив тем самым свою массу, может превратиться в нейтрон, излучая при этом еще две легкие частицы:



Такое превращение происходит при e^+ распаде или, иначе, при позитронном радиоактивном распаде. Он происходит

в некоторых искусственно созданных легких ядрах (мы о нем не упоминали раньше).

Фотон, как мы видели в предыдущем параграфе, может превратиться (вблизи ядра) в позитронно-электронную пару:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- ,$$

а позитронно-электронная пара — в фотоны:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma .$$

2. Любая элементарная частица (включая фотон) способна к превращениям в другие частицы. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем больше может быть количество возникающих частиц и их массы. Это не означает, что разрешены любые превращения. При каждом превращении должны соблюдаться закон сохранения энергии (с учетом формулы Эйнштейна $\Delta E = \Delta mc^2$), закон сохранения импульса, закон сохранения электрического заряда и еще некоторые законы сохранения, установленные для элементарных частиц.

§ 121. Кварки

1. Одно время (к 1932 г.) физикам было известно только несколько элементарных частиц (см. таблицу к § 119), и казалось, что они являются «последними кирпичами» мироздания. Однако после этого почти ежегодно открывались новые элементарные частицы (почти все они были открыты с помощью ускорителей). Заряд их (в единицах e) равен $+1$, -1 и 0 , а масса в большинстве случаев того же порядка, что и масса протона. Многие из вновь открытых частиц оказались короткоживущими: менее чем за одну миллиардную долю секунды они распадаются (обычно тоже на нестабильные частицы) и лишь после нескольких последовательных распадов превращаются в стабильные частицы. По некоторым общим свойствам все частицы разбиты на несколько групп. Общее число известных в настоящее время элементарных частиц в несколько раз превышает число химических элементов. Это наводит на

ром протона или нейтрона (10^{-15} м). Частицы, подверженные сильному взаимодействию, получили название адронов.

Электромагнитное взаимодействие существует только между заряженными частицами (а также такими нейтральными частицами, которые обладают магнитным моментом, т. е. ведут себя как маленькие магнитики; такой частицей является нейтрон). Хотя электромагнитное взаимодействие играет некоторую роль в ядре, главная сфера его действия — атомы и молекулы. Структура атомов и молекул полностью определяется электромагнитным взаимодействием. Оно определяет также структуру тел и все их макроскопические свойства (механические, тепловые, магнитные, оптические). Все химические реакции также определяются этим взаимодействием. Радиус действия электромагнитного взаимодействия неограничен.

В слабом взаимодействии могут участвовать все частицы, кроме фотона, но эта способность незначительна, если они участвуют в сильном или электромагнитном взаимодействиях. Только нейтрино к этим двум взаимодействиям неспособно. Поэтому слабое взаимодействие выступает во всех процессах, в которых участвует нейтрино, например, в бета-распаде. Радиус действия в этом случае еще меньше, чем при сильном взаимодействии. Слабые взаимодействия из-за своей малой величины не способны удерживать какие-либо частицы друг возле друга, но они способны вызвать распад и рождение частиц во многих реакциях.

Наименьшей интенсивностью обладает гравитационное взаимодействие. Зато ему подвержена вся материя. Радиус его действия неограничен. Проявляется гравитационное взаимодействие только между макроскопическими телами. Оно существенно влияет на движение тел на Земле и определяет движение космических объектов: спутников, планет, звезд. Структура Вселенной в целом также определяется этим взаимодействием. В мире элементарных частиц гравитационное взаимодействие непосредственно не проявляется из-за сравнительной малости их массы. Например, силы гравитационного взаимодействия между электронами в 10^{-42} раз меньше электрических сил между ними.

Если попытаться оценить числами потенциальную энергию разных взаимодействий, то получим такую пропорцию:

$$\begin{aligned} \text{сильное вз.} : \text{электромагн.} : \text{слабому} : \text{гравитац.} &= \\ &= 1 : 10^{-2} : 10^{-14} : 10^{-38}. \end{aligned}$$

4. Во второй половине XIX века существовало мнение, что все фундаментальные законы природы открыты и на долю следующих поколений физиков останется только уточнение некоторых констант и математическая разработка следствий открытых законов. Развитие физики в XX столетии опровергло эти предсказания. Мало того, появились теории (теория относительности и квантовая механика), полностью преобразившие лицо физики. Теперь физики убеждены, что описание природы на любом данном этапе не может быть исчерпывающим (это, по выражению одного ученого, означало бы, что целое вошло в состав своей части). С каждым новым этапом развития физики описание природы становится все более полным, все более соответствующим природе вещей, но в этом процессе познания никогда не будет поставлена последняя точка.

ГЛАВА 10

ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

§ 123. Связь физики с техникой и другими науками

1. Всего несколько столетий отделяют нас от времени, когда человек только для того, чтобы обеспечить свое существование, должен был почти все свое время посвящать тяжелому изнурительному труду.

Нам трудно теперь представить, что еще два столетия назад почти не было машин, способных делать за человека нужную ему работу. Весь уклад жизни резко отличался от ныне существующего. Не было не только электрического освещения, но даже керосиновых ламп. Свеча являлась роскошью

(причем, чтобы свеча не гасла, каждые несколько минут надо было снимать с нее нагар). Путешествие из Петербурга в Москву длилось неделями. Получить досуг, необходимый для того чтобы получить образование, равноценное нашему среднему, могли лишь те немногие представители привилегированных слоев, на каждого из которых работали от зари до зари десятки и сотни людей.

Развитие науки и техники за последние два столетия коренным образом изменило условия жизни людей. Изменился характер труда — отходит в прошлое изнуряющий, утомительный труд. Изменились бытовые условия, резко увеличился досуг, стали разнообразнее формы отдыха. Человечество избавилось от эпидемий страшных болезней, уносивших в могилу население целых городов.

В течение долгих столетий (примерно до конца XVIII века) открытия и усовершенствования, облегчавшие жизнь людей, делались в основном людьми, не связанными с наукой, действовавшими наугад. Но тот почти фантастический рост могущества человека над природой, которым ознаменовались последние два столетия, явился непосредственным результатом развития науки и прежде всего физики.

Исследования малонизвестной, почти неощутимой электризации трением, начатые в широких масштабах в XVIII веке, привели к открытию колоссальных возможностей электричества, без которого трудно даже представить современную технику, культуру и быт. Результаты физических исследований и в наши дни приводят не только к созданию новых, неведомых ранее отраслей (например, электроники, ядерной энергетики), но и к коренным изменениям во всех без исключения производствах, в условиях труда и быта людей.

Без физики не могли бы существовать и развиваться многие точные науки. Астрономия не может существовать без телескопа, точных часов, спектрографов и т. д. Биология была бы в зачаточном состоянии, если бы физика не снабдила ее микроскопом. Одна из центральных задач современной биологии — разгадка механизма наследственности и овладение активным методом управления наследственностью — не могла бы быть даже поставлена без

электронного микроскопа и других средств и методов, созданных физикой.

Химия физика дала не только понимание основ химической связи, но и исключительно мощные средства, позволяющие экспериментально определять структуру молекул.

2. Связь физики с техникой и с другими науками не является односторонней. Развитие физики привело к бурному развитию техники. Но и техника не осталась в долгу. Она дала физике приборы, резко увеличивающие возможности научного исследования. Без осциллографов, усилителей, ускорителей микрочастиц, без спутников, ракет, электронных вычислительных машин, кибернетических устройств и других средств, зачастую находящихся на пределе возможностей современной техники, невозможно глубокое проникновение в тайны строения материи, без которого непредставим прогресс физики.

§ 124. Физика и технический прогресс

1. В первой половине XX века (начиная примерно с середины 20-х годов) в развитии науки и техники произошли изменения, которые называют научно-технической революцией. Она характеризуется тем, что развитие науки достигло такого уровня, что она стала ведущей силой, преобразующей все отрасли промышленности и сельского хозяйства. В недрах физических лабораторий в короткие сроки были созданы целые отрасли новой техники: радиолокация, ядерная энергетика, полупроводниковая техника, лазеры, микро-ЭВМ и т. д. Разумеется, техника использует не только новейшие достижения физики и других точных наук. На основе давно полученных знаний возможно немало новых технических решений разных проблем. Однако самые крупные сдвиги в технике связаны с результатами новых исследований.

2. Помимо поисковых исследований (суть которых можно изложить словами детской сказки: пойдя туда, не знаю куда, принеси то, не знаю, что), наука должна решить ряд конкретных задач, поставленных перед ней техникой. Перечислим некоторые из них.

В области энергетики первоочередной задачей является создание новых способов преобразования разных видов энергии в электрическую. Широким фронтом ведутся исследования по управляемому термоядерному синтезу. Много сил уделяется также совершенствованию реакторов-размножителей. Перспективное направление — «водородная энергетика», предполагающая использование водорода для хранения и транспортировки до конечного потребителя произведенной разными способами энергии; водород — это идеальное экологически чистое топливо с максимальным удельным содержанием энергии на единицу массы. Делаются первые попытки массового внедрения в практику топливных элементов — устройств, преобразующих химическую энергию топлива (прежде всего водорода) в электрический ток напрямую (без горения) и с очень высоким коэффициентом полезного действия, принципиально недостижимым в тепловых машинах (двигателях внутреннего сгорания, паровых турбинах и др.).

Важной задачей физики и смежных с ней наук является создание новых материалов с нужными техниче свойствами. Возможности здесь, видимо, велики. Например, расчет показывает, что прочность металлов в десятки раз меньше того теоретического значения, которое определяется силами межатомного сцепления в кристаллической решетке. Физики и металловеды уже выяснили основные причины таких расхождений. Надо провести исследования, выясняющие возможность создания сверхпрочных материалов для практики.

Перед физикой твердого тела стоит еще более широкая задача: провести теоретические исследования, выясняющие связь физических и химических свойств сплавов с их атомно-электронной структурой. Это позволит в будущем конструировать сплавы с заранее заданными свойствами, например, сверхпрочные, жаростойкие, сверхлегкие и т. д.

Одной из самых важных задач любой отрасли народного хозяйства является повышение производительности труда. Наиболее резкое повышение производительности достигается в результате комплексной (т. е. охватывающей все звенья) механизации производственных процессов. Высшей формой

механизации является полная автоматизация, при которой полностью исключается непосредственное участие человека в обработке изделий. За рабочим сохраняется в этом случае роль монтажника и наладчика станков и контроль за работой механизмов.

Огромную роль в развитии современной автоматики играет электроника. Все разделы электроники являются порождением современной физики. Самая «древняя» область электроники — вакуумная — использует движение свободных электронов или ионов в вакууме или в разреженном газе. Свойства электронных и ионных пучков используются в кинескопах, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т. д. Но возможности вакуумной электроники далеко не исчерпаны. Электронная технология, основанная на использовании электронных и ионных пучков, с огромным успехом может применяться для высокочастотной плавки, очистки материалов, получения особо чистых материалов, в том числе и тугоплавких.

Полупроводниковая электроника (так же, как и молекулярная и квантовая электроника) создана на основе наиболее современных разделов физики — квантовой механики и физики твердого тела. Радиоспециалистам старшего поколения только для того, чтобы использовать те возможности, которые предоставила им физика, пришлось в «срочном порядке» изучать те разделы физики, которые еще несколько десятилетий назад считались наиболее абстрактными ее разделами. Теперь их изучают во всех технических вузах. Повторилась ситуация, не раз уже встречавшаяся в истории. Сто с лишним лет назад созданная Максвеллом теория электромагнитного поля представлялась его современникам крайне непонятной, абстрактной и оторванной от запросов практики. Теперь с основами этой теории приходится знакомить даже школьников, настолько она важна для техники. В начале XX века наиболее далекими от практики исследованиями были исследования строения атома и атомного ядра. Теперь на основе этих исследований создано самое грозное оружие всех времен — термоядерное оружие и наиболее перспективные энергетические установки.

Совсем недавно (в 60-х годах прошлого века) возникли новые направления электроники — микроэлектроника и квантовая электроника. Микроэлектроника разрабатывает методы создания радиосхем внутри кристалла. Для этого в точно намеченных точках кристаллической решетки полупроводника вводят строго дозированные атомы примесей: алюминия, фосфора, бора и т. п. С помощью этих примесей в кристалле образуются различные по своим электрическим свойствам зоны, которые выполняют функции сопротивлений, конденсаторов, полупроводниковых диодов и транзисторов. Совокупность этих зон и образует радиоэлектронную схему в полупроводниковом кристалле. Устройства, созданные на основе микроэлектроники, чрезвычайно миниатюрны. На кремниевой пластинке размером с копейчную монету помещаются миллионы транзисторов. Это привело к созданию микропроцессоров и микро-ЭВМ, заменивших громоздкие устройства 50-х и 60-х годов. Их создание, в свою очередь, стимулировало развитие робототехники и создание персональных компьютеров. Микроэлектроника — основная элементная база комплексной автоматизации производства.

Исследование квантовых явлений, происходящих в атомах и молекулах, привело (кроме всего прочего) к созданию квантовых генераторов разных диапазонов, в том числе и оптического (лазеров). Совершенствование существующих генераторов и освоение новых диапазонов существенно расширят область их применения в технике.

Одним из наиболее перспективных направлений научного исследования является исследование природы в «крайних» условиях — в условиях крайне низких или крайне высоких температур, сверхвысоких давлений, крайней степени чистоты. Работа в таких условиях не раз приводила к открытию принципиально новых явлений — сверхпроводимости, сверхтекучести, новых ядерных реакций, новых элементарных частиц. Некоторые из этих явлений начали уже применяться в технике. К числу таких явлений относится сверхпроводимость. Сверхпроводящий соленоид весом в несколько килограммов и почти не потребляющий энергии может заменить электромагнит обычного типа весом в несколько тысяч тонн,

потребляющий энергию целой электростанции. Такие соленоиды начали применяться в мощных ускорителях и в «Токамаках» — установках, где исследуется термоядерный синтез. До сих пор не ясно, можно ли получить сверхпроводимость при комнатных температурах. Ясно, что создание веществ, у которых сверхпроводимость наступает при комнатных температурах и не разрушается при протекании в них сильных токов, произвело бы переворот в технике передачи электроэнергии (и не только в ней!).

3. Передний фронт физики, как всегда, ушел далеко вперед от животрепещущих проблем техники. От исследования атома и исследования ядра физики перешли к исследованию элементарных частиц. Эти исследования носят зачастую крайне абстрактный, оторванный от интересов современной техники характер. Но история науки не раз показывала, что исследования, самые, казалось бы, отвлеченные, приводили к решающим сдвигам в технике и в судьбах человечества. Физика элементарных частиц еще не решила самые важные свои проблемы, но нельзя исключить вероятность того, что исследования в этой области приведут к новой научно-технической революции, содержания и масштабов которой мы не можем представить даже приблизительно (как физики XVIII столетия не могли предсказать наступление века электричества, радио и атомной энергии). Ясно одно: чем глубже проникаем мы в тайны природы, тем более захватывающие перспективы открываются перед человечеством.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	5
Введение	5
1. Опыты Фарадея	5
2. Закон электромагнитной индукции	7
3. Взаимодействие индукционного тока с магнитом	10
4. Общая формулировка правила Ленца	12
5. Вихревые токи (токи Фуко)	14
6. Электродинамический микрофон	17
7. Магнитная запись и воспроизведение информации	18
8. Какие силы заставляют двигаться электроны при электромагнитной индукции	19
9. Расчет ЭДС индукции в движущихся проводниках	20
10. Электромагнитное поле	23
11. Самоиндукция	26
12. Индуктивность	28
13. Энергия магнитного поля	30
14. Аналогия с механическими явлениями	31
Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	32
15. Свободные колебания в колебательном контуре	32
16. Период свободных колебаний	34
17. Вывод уравнения колебаний	35
17а. Исследование полученного решения	37
18. Уравнение для тока	41
19. Причины затухания свободных колебаний	41
20. Использование вынужденных колебаний	42
21. Принцип получения переменного тока	43

22. Действующее значение переменного тока	45
23. Сопротивление цепи переменному току	46
24. Колебания энергии в цепи переменного тока	54
25. Электрический резонанс	55
26. Использование электрического резонанса	58
27. Производство электрической энергии	59
28. Передача электроэнергии на большие расстояния	61
29. Трансформатор	63
30. Почему при возрастании вторичного тока возрастает и первичный ток	67
31. Выпрямление переменного тока	68
Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	70
32. Возникновение электромагнитных волн	70
33. Поток излучения и плотность потока излучения	72
34. Длина электромагнитной волны. Разбивка на диапазоны	73
35. Свойства радиоволн	74
36. Требования к излучателю	78
37. Транзисторный усилитель колебаний	82
38. Схема питания транзистора	85
39. Пример обратной связи	87
40. Генератор незатухающих колебаний на транзисторе	88
41. Принцип радиосвязи	90
42. Использование резонанса при приеме	92
43. Амплитудная модуляция	93
44. Детектирование	95
45. Понятие о телевидении	98
46. Радиолокация	101
47. Изобретение радио А. С. Поповым	105
Глава 4. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА	106
48. Исторические сведения о развитии оптики	106
49. Световой поток и освещенность	107
50. Скорость света	108

51. Принцип Гюйгенса	110
52. Примеры применения принципа Гюйгенса	111
53. Основные законы лучевой оптики	114
54. Полное внутреннее отражение	116
55. Дисперсия света	119
56. Цвет тела	121
57. Интерференция и когерентность	121
58. Роль разности хода	124
59. Зеркала Френеля	126
60. Интерференция света в тонких пленках	128
61. Применение интерференции	131
62. Дифракция волн	132
63. Дифракционная решетка	136
64. Спектр дифракционной решетки	139
65. Поляризация света	141
66. шкала электромагнитных волн	143
67. Тепловое излучение	144
68. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи	147
69. Рентгеновские лучи	150
Глава 5. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ	
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	152
70. Инерциальные системы отсчета (повторение)	152
71. Принцип относительности Галилея и принцип относительности Эйнштейна	153
72. Постоянство скорости света	154
73. Кажущаяся несовместимость двух постулатов	155
74. Синхронизация часов	158
75. Относительность одновременности	159
76. Относительность промежутков времени	160
77. Относительность расстояний	165
78. Реальны ли релятивистские эффекты?	168
79. Релятивистский закон сложения скоростей	168
80. Зависимость массы тела от его скорости	169
81. Взаимосвязь массы и энергии	170
82. Скорость света в вакууме — предельная скорость распространения взаимодействий	173

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 6. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ.	
ДЕЙСТВИЯ СВЕТА	175
83. Внешний фотоэффект и его применение в технике	175
84. Фоторезисторы	178
85. Полупроводниковые фотоэлементы	178
86. Исследование внешнего фотоэффекта	180
87. Законы фотоэффекта. Кванты света	182
88. Корпускулярные свойства фотона	186
89. Корпускулярно-волновой дуализм	188
90. Давление света	190
91. Химическое действие света	193
Глава 7. АТОМНАЯ ФИЗИКА	194
92. Как установили строение атома	197
93. Излучение и поглощение энергии атомом. Постулаты Бора	197
94. Основные типы спектров испускания	202
95. Спектры поглощения	204
96. Спектральный анализ	206
97. Вынужденное излучение	208
98. Лазер	209
99. Некоторые свойства лазерного излучения	212
100. Применение лазеров	213
Глава 8. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА	215
101. Состав ядра атома	215
102. Изотопы	216
103. Ядерные силы	216
104. Радиоактивность	217
105. Ядерные реакции	221
106. Радиоактивные изотопы и их применение	224
107. Детекторы частиц	228

108. Дозиметрия и защита	232
109. Энергетический выход ядерных реакций	234
110. Энергия связи ядра	236
111. Деление урана	238
112. Атомная бомба	240
113. Ядерный реактор на тепловых нейтронах	241
114. Атомная энергетика	245
115. Воспроизводство ядерного горючего	246
116. Термоядерные реакции	248
Глава 9. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. СОВРЕ-	
МЕННАЯ НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА	251
117. Введение	251
118. Нейтрино	252
119. Античастицы	252
121. Взаимопревращаемость частиц	254
122. Кварки	255
123. Современная научная картина мира	256
Глава 10. ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС	259
124. Связь физики с техникой и другими науками	259
125. Физика и технический прогресс	261

Приобрести книгу вы можете
в магазине «Книжный двор»
тел. 233-34-31

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Соловейчик Иосиф Абрамович

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Пособие для абитуриентов и старшеклассников

Заведующий редакцией *А.В. Барзилович*
Технический редактор *Н.А. Степанова*
Художник *С.И. Ващенко*
Редактор *А.А. Самарцев*

Подписано в печать 05.09.2006. Формат 84 x 108 ¹/₃₂.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,28. Тираж 300. Заказ № 3457

Издательство «ОРАКУЛ»
190068, Санкт-Петербург, пер. Бойцова, 4
Лицензия ЛР № 064792

Отпечатано с диапозитивов
в ГУП «Типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

