

ФИЗИКА

Учебник

Часть 2

11

Естественно-математическое
направление

Раздел IV. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 8. Элементы теории относительности

Раздел V. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 9. Атомная и квантовая физика

Глава 10. Физика атомного ядра

Раздел VI. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Глава 11. Нанотехнология и наноматериалы

Раздел VII. КОСМОЛОГИЯ

Глава 12. Космология

Условные
обозначения:Практические
заданияТворческие
заданияЗадания для
развития
критического
мышленияВопросы для
самоконтроляЗадачи для
самостоятель-
ного решения■ Задания
средней
сложности* Задания
повышенной
сложностиМатериал для
дополнитель-
ного чтения

Предисловие

Дорогие учащиеся! 11 класс — последний год обучения в школе, поэтому вам необходимо приложить максимальные усилия, чтобы каждый день был предельно насыщенным и полезным для вас.

Школьное образование является фундаментом для освоения вами вершин профессиональных знаний. Книга, являясь завершающим в ряду учебников по классам, делает обзор пройденного ранее материала на более глубоком уровне и мотивирует к самостоятельному добыванию знаний. Если вы выбрали естественно-математическую или техническую специальность, то не ошиблись. В современном мире в ходе глобального развития цивилизации приоритетное место начинает занимать наука. Ее достижения дали начало таким новым отраслям, как инженерная генетика, атомная энергетика, лазерная техника, микроэлектроника, космическая техника, спутниковая система связи и пр. На данном этапе современной истории созданы новейшее оборудование, компьютеры, которые способствуют дальнейшему развитию человеческого интеллекта; быстрое развитие нанотехнологии и ее достижения стремительно меняют современный мир. Сегодня наука поднялась на более высокий уровень. Решающая заслуга в этом принадлежит физике, которая является основополагающей для многих других наук.

В настоящее время Казахстану необходимы собственные инженеры, ученые, конструкторы, т. е. специалисты именно в технических областях народного хозяйства. Но для этого вам необходимо серьезно работать, чтобы достичь поставленной цели. Материал учебника охватывает все разделы физики, которые вы изучали ранее, но освещает их на более высоком научном и методическом уровне, чтобы у вас создалось целостное представление о физике как о науке. “Упорный и терпеливый увидит благоприятный конец начатого дела, ищущий знания найдет его”. Знания становятся организующей основой мирового сообщества. Желаем успехов в достижении поставленной цели!

С уважением, авторы

Раздел IV. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 8. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 42. Постулаты теории относительности



Ключевые понятия:

- ✓ принцип относительности Эйнштейна
- ✓ скорость света
- ✓ принцип относительности Галилея
- ✓ принцип постоянства скорости света
- ✓ преобразования Галилея
- ✓ преобразования Лоренца
- ✓ собственная длина
- ✓ собственное время

На этом уроке вы:

- вспомните принцип относительности Галилея, узнаете его связь с теорией относительности Эйнштейна;
- познакомитесь с основными понятиями, терминами и эффектами теории.



Теория относительности, описывающая физические процессы в пространстве и времени, была разработана на основе исследовательских работ Лоренца, Пуанкаре и Эйнштейна в конце 19 века и в начале 20 века. Математические основы теории относительности были опубликованы в 1900 году в работах Лоренца и Пуанкаре, но они придерживались понятия эфира. Нововведением Эйнштейна был отказ от эфира в пользу пустого пространства-времени, и как оказалось впоследствии, именно это позволило наиболее простым способом объяснить все известные в рамках теории эффекты и предсказать новые. Таким образом в широкой общественности распространилось название теории относительности Эйнштейна.

Любая теория основана на своих принципах. В основе теории относительности Эйнштейна лежат два фундаментальных постулата. Это принцип относительности Эйнштейна и второй постулат — принцип конечности скорости передачи сигналов (постоянство скорости света). Давайте обсудим эти принципы. В основе принципа относительности Эйнштейна лежит принцип относительности Галилея. Галилей открыл инерциальную систему отсчета, которая занимает исключительное место среди систем отсчета. В инерциальных системах отсчета равномерное прямолинейное механическое движение будет относительным.



Хендрик Антон
Лоренц
1853—1928



Анри Пуанкаре
1854—1912



Альберт Эйнштейн
1879—1955

Это вы знаете

Система отсчета, в которой при отсутствии внешних сил (или при равенстве нулю равнодействующей силы) механическое движение тела является равномерным и прямолинейным, или оно покоится, называется *инерциальной системой отсчета*.

Если выберем какую-либо инерциальную систему отсчета, то все системы отсчета, двигающиеся относительно нее равномерно и прямолинейно, являются инерциальными.

Все явления в природе происходят в трехмерном пространстве и одномерном времени. Принцип относительности Галилея — принцип, описывающий свойства пространства и времени. Суть принципа Галилея — это не абсолютность равномерного и прямолинейного движения, а его относительность.

Рассмотрим самый простой пример относительности в одномерном прямолинейном пространстве. Если ввести координату вдоль длинной прямой линии, то мы можем поставить точку отсчета по нашему усмотрению, то есть координаты точки A вдоль линии относительны: его значения определяются только при сравнении с началом отсчета O или O' (рисунок 42.1). Такое же положение имеет место и в плоскости, и в пространстве. Но это геометрическая относительность.

В физике, кроме выбора начала координат инерциальной системы отсчета, мы можем устанавливать и его скорость. Этот случай впервые заметил Галилей и создал основу для развития современной механики.

Допустим, что выбранная нами система отсчета K' движется вдоль оси x с постоянной скоростью v_0 относительно системы отсчета K , которая находится в неподвижном состоянии (рис. 42.2). Связь между координатой частицы в движущейся системе x' и его координатой x в неподвижной системе отсчета определяется следующей формулой:

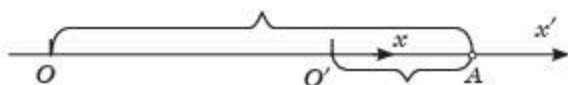


Рис. 42.1. Относительность положения (координат) точки A в разных системах отсчета O и O'

$$x' = x - v_0 t. \quad (42.1)$$

Стоит заметить, что время в обеих системах отсчета принято одинаковым: $t' = t$.

Математическая формулировка принципа относительности Галилея в векторном виде описывается формулой:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t, \quad (42.2)$$

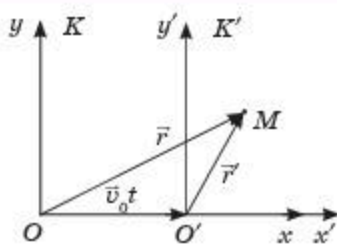


Рис. 42.2

через составляющие радиус-вектора:

$$\begin{cases} x' = x - v_0 t \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (42.3)$$

Обратные преобразования имеют вид:

$$\begin{cases} x = x' + v_0 t \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (42.4)$$

Эти выражения относятся к формулам преобразования координат. Координатные преобразования, которые используются при переходе из покоящейся системы отсчета в систему отсчета, движущейся со скоростью v_0 , называются *преобразованиями Галилея*.

Таким образом, закономерность движения частицы в системе отсчета K :

$$x = x_0 + vt.$$

В момент времени $t = 0$, $x = x_0$ и $x' = x_0$.

Скорость движения частицы в системе отсчета K' :

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0. \quad (42.5)$$

Это выражение называется *формулой преобразования (сложения) скоростей*. С помощью составляющих получаем:

$$\begin{cases} v'_x = v_x - v_0 \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases} \quad (42.6)$$

Обратные преобразования имеют вид:

$$\begin{cases} v_x = v_0 + v'_x \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{cases} \quad (42.7)$$

При использовании преобразования Галилея уравнение движения частиц не изменяет свою форму. Оно будет одинаковым и для движущейся системы отсчета, и для покоящейся системы отсчета. Поэтому, законы движения в обеих системах будут одинаковыми.

Неизменность вида уравнения движения при преобразованиях Галилея называется инвариантностью уравнений движения относительно преобразования Галилея. Физический смысл преобразования Галилея: **невозможно определить состояние (покоя или движения) инерциальной системы отсчета с помощью механических экспериментов.** Так как уравнения движения одинаковы для систем отсчета в покое или же в равномерном и прямолинейном движении, то с помощью любых механических экспериментов невозможно определить состояние движения с постоянным значением и направлением скорости. Нет никаких абсолютных скоростей, есть только относительная скорость. То есть, равномерные и прямолинейные движения определяются только относительно.

Этот факт, то есть инвариантность уравнения движения относительно преобразования Галилея, называется *принципом относительности Галилея*.

По *принципу относительности Галилея* все законы механики во всех инерциальных системах протекают одинаковым образом. Таким образом, мы можем выбирать инерциальную систему отсчета по своим критериям удобства.

По *первому постулату Эйнштейна* все законы физики во всех инерциальных системах протекают одинаковым образом. То есть, поля или уравнения движения при переходе из одной системы отсчета в другую остаются неизменными, иначе говоря, бывают инвариантны относительно преобразования координат и времени (преобразования Лоренца). Такие свойства уравнения физических процессов называются *инвариантностью Лоренца*.

Разница между принципом относительности в теории относительности Эйнштейна и принципом относительности *Галилея* — не только механические процессы, но и *все физические процессы* в инерциальной системе отсчета протекают одинаково. То есть, в инерциальной системе отсчета невозможно определить скорость с помощью физических (не только механических) экспериментов. Эйнштейн обобщил принцип относительности Галилея и расширил область применения.

Математическая формулировка принципа относительности Эйнштейна выражается формулой:

$$\begin{cases} x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - \frac{v_0}{c} x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}. \end{cases} \quad (42.8)$$

Обратные преобразования имеют вид:

$$\begin{cases} x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + \frac{v_0}{c} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}. \end{cases} \quad (42.9)$$

В теории относительности Эйнштейна координатные преобразования при переходе из покоящейся системы отсчета к движущейся с постоянной скоростью v_0 называются *преобразованием Лоренца*.

Формула преобразования (сложения) соответствующих скоростей:

$$\begin{cases} v_x' = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0}{c^2} v_x}, \\ v_y' = \frac{v_y \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_0}{c^2} v_x}, \\ v_z' = \frac{v_z \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_0}{c^2} v_x}. \end{cases} \quad (42.10)$$

Обратные преобразования имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{v_0 + v_x}{1 + \frac{v_0 v_x}{c^2}}, \\ v_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v_0 v_x}{c^2}}, \\ v_z = \frac{v_z \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v_0 v_x}{c^2}}. \end{array} \right. \quad (42.11)$$

Если применить к этим формулам условие $\frac{v_0}{c} \approx 0$, которое соответствует классической механике, то можно заметить, что формулы преобразования координат (42.8) превращаются в преобразования Галилея (42.3) и формулы преобразования (сложения) скоростей (42.6) в классические (42.7). То есть, можно сказать, что принцип относительности Галилея обобщается принципом относительности Эйнштейна.

Теперь рассмотрим второй постулат Эйнштейна — принцип конечности скорости распространения сигналов (постоянство скорости света). Ученые с помощью экспериментов и наблюдений выяснили, что скорости распространения всех сигналов в инерциальных системах конечны и не превышают определенного значения. Скорость распространения света в вакууме соответствует предельной скорости $c = 2,99 \cdot 10^8$ м/с, так как распространяется с максимально возможной скоростью. Также доказано, что недавно открытые гравитационные волны тоже распространяются, с этой скоростью, скорость частиц в ускорителях и космических лучей не превышает этот предел. То есть, эта скорость является универсальной постоянной. Этот принцип характеризует свойства пространства и времени. Энергия и информация распространяются не превышая скорости света. Этот принцип никогда не нарушался вплоть до настоящего времени.

В классической механике при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую, пространство и время остаются неизменными. Время не зависит от системы отсчета и протекает одинаково во всех инерциальных системах.

Однако, в теории относительности Эйнштейна время — не абсолютная величина. Время течет по-разному в различных инерциальных системах отсчета. Рассмотрим случай, когда к точкам А и В, расположенным

на одинаковых расстояниях, но в противоположных направлениях от начала координат O' в движущейся системе отсчета K' , направлен сигнал и этот процесс наблюдается в системах отсчета K и K' (рис. 42.3).

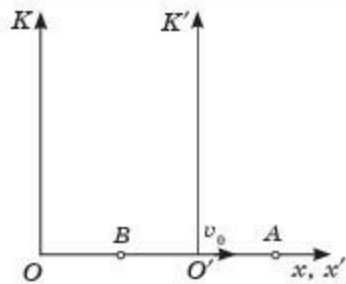


Рис. 42.3

Скорость распространения сигнала в системе отсчета K постоянна и равна c . Сигнал доходит до точек A и B в одинаковое время. А в системе отсчета K' к точке A сигнал доходит быстрее. Потому что скорость света равна c , точка A движется по направлению начала координатной системы в системе отсчета K' , а точка B отдаляется от начала координат. То есть, одновременные действия в одной системе отсчета не являются одновременными в другой системе отсчета. Это явление называется относительностью одновременности. Главное открытие теории относительности Эйнштейна — относительность одновременности.

Собственное время. За время dt движущаяся частица проходит расстояние $dx = v_0 dt$. Используя преобразования Лоренца, запишем интервал времени в инерциальной системе отсчета, движущейся вместе с частицей:

$$dt' = \frac{dt - \frac{v_0}{c^2} dx}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{dt - \frac{v_0}{c^2} v_0 dt}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} dt = dt \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}. \quad (42.12)$$

То есть, интервалы времени в двух различных системах отсчета разные:

$$dt' = dt \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}. \quad (42.13)$$

Теперь мы можем перейти от бесконечно малых интервалов dt к конечным промежуткам времени Δt :

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (42.14)$$

Для обратного случая:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (42.15)$$

Время, отсчитываемое по часам, движущимся вместе с данным объектом называется *собственным временем* этого объекта. Движущиеся часы относительно неподвижных часов идут медленнее: $\Delta t' < \Delta t$,

потому что значения под знаком корня в выражении (42.13) всегда меньше единицы.

Если рассмотреть эти часы в разных системах отсчета, то движущиеся часы идут медленнее неподвижных. Но движение относительно, и если движущийся наблюдатель примет свою систему за покоящуюся систему, то неподвижная система будет двигаться в противоположном направлении и он будет видеть замедление первых часов. Этот случай показывает **относительность замедления времени**.

Собственная длина и лоренцево сокращение. Рассмотрим движущийся стержень с соответствующими координатами концов в совместно с ним движущейся системе отсчета:

$$l_0 = x_2' - x_1', \quad (42.16)$$

где l_0 — собственная длина стержня. Координаты концов стержня в определенный момент времени t в неподвижной системе отсчета:

$$\begin{aligned} x_1' &= \frac{x_1 - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \\ x_2' &= \frac{x_2 - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}. \end{aligned} \quad (42.17)$$

Расстояние между этими точками в движущейся системе отсчета через координаты в неподвижной системе отсчета:

$$l_0 = \Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \quad (42.18)$$

где

$$l = x_2 - x_1 \quad (42.19)$$

Длина стержня в неподвижной системе отсчета:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}. \quad (42.20)$$

Итак, длина движущего стержня короче длины неподвижного стержня. Сокращение длины движущего стержня называется релятивистским сокращением длины или *лоренцевым сокращением*. Длины в перпендикулярном направлении движения остаются неизменными. Соответственно, размер движущего тела сокращается по направлению движения и уменьшается объем:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}, \quad (42.21)$$

где V_0 — собственный объем (собственный объем тела).

Когда мы рассматривали течение времени, мы установили его относительность, то же самое повторяется и здесь. Поэтому мы должны помнить про относительность сокращения длины.

Итак, принцип относительности Эйнштейна является теорией, которая пересматривает привычные понятия и вводит новые.



1. Что такое инерциальная система отсчета?
2. Что описывают преобразования Галилея?
3. Что описывают преобразования Лоренца?
4. Докажите, что преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея при $\frac{v_0}{c} \approx 0$.
5. Какие принципы лежат в основе теории относительности Эйнштейна?
6. В какой системе отсчета время становится замедленным?
7. Что такое собственное время?
8. Почему ввели значение "собственная длина"?
9. Изменяется ли объем из-за лоренцевого сокращения?
- *10. Увеличивается ли скорость света в результате сложения скоростей?



Подготовьте доклад: "Теория относительности: от Галилея до Эйнштейна".



Упражнение 20

1. Найдите длину космического корабля, движущегося со скоростью 0,8 с относительно наблюдателя. Длина неподвижного корабля — 100 м.
Ответ: 60 м.
2. Круг, радиус которого равен 1 м, вращается вокруг своей оси со скоростью 0,99 с. Найдите отношение длины и радиуса круга.
Ответ: 0,88.
3. По условию предыдущей задачи найдите частоту вращения по кругу для наблюдателя.
Ответ: $2,96 \cdot 10^8$ Гц.
- *4. Два космических корабля движутся относительно неподвижного наблюдателя в противоположных направлениях со скоростью 0,7 с. Найдите скорость кораблей относительно друг друга.
Ответ: $0,94 \text{ с} = 2,818 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.
- *5. Найдите сколько времени пройдет у неподвижного наблюдателя и второго корабля по условию предыдущей задачи, когда по часам наблюдателя на первом корабле проходит 1 минута.
Ответ: 0,71 мин; 0,34 мин.

§43. Энергия, импульс и масса в релятивистской динамике. Закон взаимосвязи массы и энергии для материальных тел



Ключевые понятия:

- ✓ релятивистская механика
- ✓ мировые точки
- ✓ мировые линии

На этом уроке вы:

- изучите принципы действия ускорителей заряженных частиц, с учетом имеющих место в них релятивистских эффектов.



Механика, основанная на принципе относительности Эйнштейна называется *релятивистской механикой*. В теории относительности Эйнштейна пространство и время не являются независимыми и абсолютными величинами. Пространство и время не могут существовать отдельно, есть только их комбинация, то есть пространство-время четырехмерно. Каждому физическому событию соответствует точка в четырехмерном пространстве-времени. Точки $(x; y; z; t)$, характеризующиеся четырьмя координатами, называются *мировыми точками*. Траектория, образуемая при движении этих точек, называется *мировой линией*. Соответственно, все физические величины обладают четырехмерным видом. В последствии объединения энергии и импульса образуется четырехмерный вектор энергии-импульса. Его трехмерная часть является просто импульсом, а временная составляющая является энергией.

Эквивалентность массы и энергии. Давайте рассмотрим связь между массой и энергией. Релятивистский импульс и энергия для частиц с массой m определяются выражениями:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (43.1)$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (43.2)$$

Если $v = c$, импульс и энергия стремятся к бесконечности. То есть, частица с массой m не может двигаться со скоростью, равной скорости света, так как для этого требуется бесконечно большое количество энергии. Но в релятивистской механике встречаются частицы, масса покоя которых равна нулю и они движутся со скоростью света. По экспериментальным данным видно, что их импульс не равен нулю (эффект Комптона). Например, масса частиц света (фотонов) равна нулю.

Чтобы характеризовать его, найдем связь между массой и энергией. Для этого преобразуем квадрат энергии в выражении (43.2):

$$E^2 = \frac{m^2 c^4}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{m^2 c^4 - m^2 v^2 c^4 + m^2 v^2 c^4}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = m^2 c^4 + \frac{m^2 v^2 c^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = m^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (43.3)$$

Таким образом, связь между массой, импульсом и энергией в релятивистской механике имеет вид:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}. \quad (43.4)$$

По сути это энергия, выраженная через импульс. В физике это выражение определяет фундаментальное отношение для любых частиц. Отсюда находим энергию покоя, когда импульс равен нулю:

$$E_0 = mc^2. \quad (43.5)$$

Это выражение является показателем эквивалентности массы и энергии. Здесь видно, что мы можем преобразовывать массу в энергию и наоборот.

Впервые данную формулу получил в 1889 году Хевисайд, когда сформулировал теорию о массе энергии электромагнитного поля. А в 1905 году Эйнштейн подтвердил, что эту теорию можно использовать ко всем частицам. Если масса равна нулю (43.4), то:

$$E = pc. \quad (43.6)$$

То есть, энергия частицы с нулевой массой пропорциональна его импульсу. Эта формула используется для всех безмассовых частиц. Теперь умножим и поделим выражение для импульса на квадрат скорости света:

$$\vec{p} = \frac{mc^2 \frac{\vec{v}}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E\vec{v}}{c^2}. \quad (43.7)$$

Для света $v = c$ и модуль импульса (43.7) соответствует формуле:

$$p = \frac{E}{c}. \quad (43.8)$$

Энергия фотона:

$$E = h\nu, \quad (43.9)$$

Отсюда, импульс равен:

$$p = \frac{h\nu}{c}. \quad (43.10)$$

То есть, несмотря на безмассовость фотон имеет импульс. Формула (43.10) объясняет явление столкновения фотонов с электронами. То есть, релятивистская механика объединяет инертность с энергией и импульсом. Надо отметить, что релятивистская инертность не соответствует массе. В нерелятивистской ситуации, энергия:

$$E = mc^2 \left\{ 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \dots + \right\} = mc^2 + \frac{mv^2}{2} + \dots +. \quad (43.11)$$

$$E = mc^2 + E_k \approx mc^2 + \frac{mv^2}{2}. \quad (43.12)$$

Кинетическая энергия частицы равна разнице полной энергии и энергии покоя:

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (43.13)$$

Энергия — аддитивная величина. Если добавим энергию взаимодействия, то формула (43.13) примет вид:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + E_p. \quad (43.14)$$

Энергия взаимодействия может быть и положительной, и отрицательной. Если взаимодействие соответствует притяжению, то оно отрицательное, а если отталкиванию, то положительное.

Например, рассмотрим Землю и Луну. Энергия притяжения:

$$E_p = -G \frac{m_x m_s}{r_x r_s}. \quad (43.15)$$

Полная энергия этой системы:

$$E = \frac{m_x c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}} + \frac{m_s c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}}} - G \frac{m_x m_s}{r_x r_s}. \quad (43.16)$$

Энергия взаимодействия связанных систем больше, чем сумма кинетических энергий в центре масс системы. Согласно вышеуказанному уравнению можно увидеть, что полная энергия системы Луна—Земля меньше, чем сумма энергии Луна и Земля. То есть, по формуле $E = mc^2$, можно заметить, что масса системы меньше, чем сумма отдельных масс:

$$m < m_x + m_s. \quad (43.17)$$

В атомном ядре имеет место такое же положение. Масса ядра меньше, чем сумма масс его составляющих, то есть протонов и нейтронов, так

как их взаимодействие соответствует притяжению. А масса некоторых тяжелых ядер больше, чем сумма масс легких ядер, образующихся при его распаде, так как суммарная энергия притяжения в этих ядрах больше, чем в начальном ядре. При таких реакциях выделяется большое количество энергии согласно формуле (43.5).

В общем случае, в релятивистской механике масса является инвариантной. Но для удобства будем считать, что инвариантная масса это масса покоя, и напишем за отношение энергии и квадрата скорости движущей частицы. Тогда получим значение релятивистской инертной массы:

$$m_u = \frac{E}{c^2} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (43.18)$$

Отсюда выражение для энергии:

$$E = m_u c^2. \quad (43.19)$$

Теперь рассмотрим силу и ускорение. Напишем второй закон Ньютона в релятивистской механике:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (43.20)$$

В это уравнение вставим выражения для импульса и получим:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{a}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m\vec{v}(\vec{a}\vec{v})}{c^2 \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}}. \quad (43.21)$$

Из этой формулы видно, что направления силы и ускорения не совпадают. Если рассмотреть случай, когда ускорение и скорость направлены одинаково, то скалярная форма выражения примет вид:

$$F = \frac{ma}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}}. \quad (43.22)$$

Отсюда формула ускорения:

$$a = \frac{F}{m} \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3}. \quad (43.23)$$

Из выражения (43.23) видно, что ускорение зависит не только от силы, но и от скорости. Когда скорость стремится к скорости света, то ускорение приближается к нулю. То есть, скорость частицы никогда не

сможет достичь скорости света. Но для энергии и импульса нет предела, то есть энергия и импульс частицы могут достигнуть любого значения.

Давайте рассмотрим процессы в ускорителях элементарных частиц, где эффекты теории относительности Эйнштейна существенны (рис. 43.1, 43.2). Так как в этих ускорителях частицы движутся с огромными энергиями, их скорость почти достигает скорости света. Например, в Большом адронном коллайдере протоны ускоряются до энергии 7 тераэлектронвольт (ТэВ) ($1 \text{ эВ} = 1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$, $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$). Масса протона $938,272\,0813(58) \text{ МэВ} \approx 1 \text{ ГэВ}$, то есть энергия протона в коллайдере приблизительно в 7000 раз больше, чем энергия его покоя. Если два протона, движущихся в противоположных направлениях столкнутся, то может преобразоваться дополнительно 14000 протон-антипротонов или 28000000 электрон-позитронов (масса $0,510\,998\,9461(31) \text{ МэВ}$). На самом деле, при столкновении появляются различные частицы с разными энергиями и массами, при этом соблюдается закон сохранения энергии. Большинство этих частиц нестабильны. Допустим, что образовался мюон (масса $105,6583745(24) \text{ МэВ}$, время жизни в состоянии покоя $2,19703(4) \cdot 10^{-6} \text{ с}$) с 1 ГэВ энергией. Определим скорость. Для этого сначала определим массу частицы:

$$m = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot 105,65 \cdot 10^6 \text{ эВ}}{(2,99 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} = 1,88 \cdot 10^{-28} \text{ кг.}$$

Энергия частицы:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Отсюда,

$$v = c \sqrt{1 - \frac{(mc^2)^2}{E^2}} = c \sqrt{1 - \frac{1}{100}} = 0,995 c.$$

Собственное время жизни частицы:

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$t' = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

$$\text{Отсюда, время жизни } t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{\sqrt{1 - 0,995^2}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$



Рис. 43.1. Процесс установления дипольного момента LHC

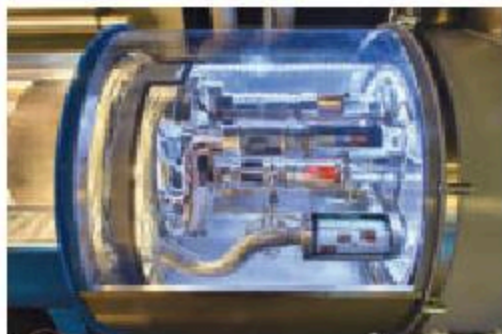


Рис. 43.2. Место соединения двух диагональных магнитов LHC

То есть для покоящегося наблюдателя время жизни быстро движущихся мюонов, возрастает в 100 раз. При возрастании энергии, растет и время жизни частицы.

Теперь рассмотрим принцип работы ускорителей частиц. Мы упоминали, что в большом адронном коллайдере протоны ускоряются до энергии 7 ТэВ. Ускорение осуществляется за счет электрического поля. Поскольку область ускорения ограничена, то при ускорении частиц надо делать поворот. Повороты осуществляются с помощью магнитного поля (рис. 43.3).

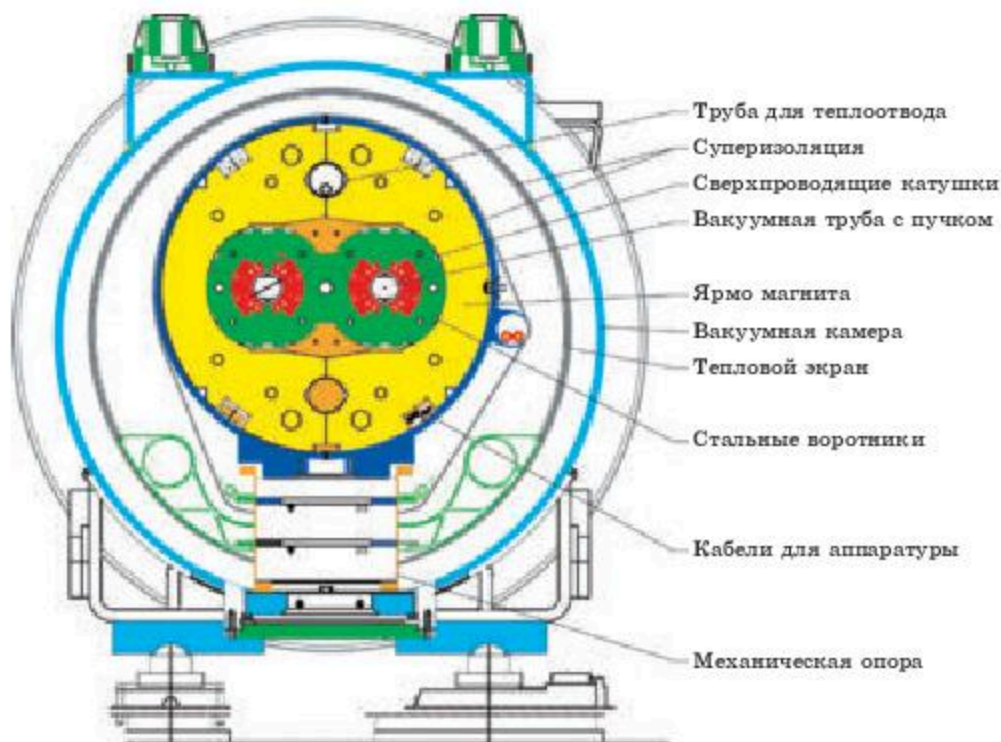


Рис. 43.3. Поперечное сечение поворотных магнитов

Но так как при ускорении инертная масса частиц увеличивается, то надо использовать сильные сверхпроводниковые магниты (8,3 Тесла). Чем больше энергия, тем сильнее должно быть магнитное поле. Во-вторых, если радиус поворота большой, то потеря энергии заряженных частиц при излучении будет больше. Поэтому радиусы ускорителей делают большими.



1. В чем особенность релятивистского импульса?
2. Каковы масса и импульс света?
3. Какая связь между массой, энергией и импульсом?
4. Почему массовые частицы не могут достигнуть скорости света?
5. Почему свет не может замедлиться?
6. Есть ли у электрона кинетическая энергия?
7. Почему нестабильные элементарные частицы имеют различные времена жизни?
8. Может ли релятивистская инертная масса электрона быть больше массы протона?
9. Найдите соотношение силы и ускорения, если скорость и ускорение перпендикулярны.
10. Как вы думаете, больше ли масса атома суммы масс протона, нейтронов и электронов?



1. Найдите свою энергию покоя.
2. Возьмите два магнита, найдите разность их массы в одиночном и прилипшем друг к другу состояниях.



1. Почему ядерная энергия мощнее химической энергии?
2. В системе GPS для определения точных координат проводятся вычисления с помощью теории относительности. В чем причина использования такого метода?

Примеры решения задач

1. Чему равна длина стержня, движущегося со скоростью $0,8c$. Длина покоящегося стержня 1 м.

Решение. $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}} = l_0 \sqrt{1 - 0,64} = 0,6l_0 \cdot l = 0,6 \cdot 1 \text{ м} = 60 \text{ см.}$

2) С какой скоростью должна двигаться частица, чтобы его масса увеличилась в 2 раза?

Решение. $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$; $m = 2m_0$; $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0}{m}$; $\frac{v^2}{c^2} = 1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2$;

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2} = c \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2} c = 0,87c.$$

3) С космического корабля, удаляющегося от Земли со скоростью $0,7c$, выстреливается стержень в направлении движения корабля. Скорость стержня относительно Земли $0,9c$. Чему равна скорость стержня относительно космического корабля?

Решение. Обозначим v — скорость движения корабля относительно Земли, v_1 — скорость стержня относительно космического корабля, v_2 — скорость стержня относительно Земли. Тогда $v = 0,7c$, $v_2 = 0,9c$. Надо найти v_1 .

Используя релятивистский закон сложения скоростей:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}$$

$$\text{Находим: } v_1 + v = v_2 \left(1 + \frac{v_1 v}{c^2} \right); \quad v_1 \left(1 - \frac{v_2 v}{c^2} \right) = v_2 - v;$$

$$v_1 = \frac{v_2 - v}{\left(1 - \frac{v_2 v}{c^2} \right)} = \frac{0,9c - 0,7c}{(1 - 0,9 \cdot 0,7)} = \frac{0,2c}{0,37} = 0,54c.$$



Упражнение 21

1. Найдите кинетическую энергию космического корабля, движущегося со скоростью $0,8c$. Масса покоя корабля — 1000 т.

Ответ: $2 \cdot 10^{14}$ Дж.

2. По кругу, радиус которого 1 м, движется тело с массой покоя 1 г с линейной скоростью $0,99c$. Какая центростремительная сила действует на тело?

Ответ: $62,53 \cdot 10^{13}$ Н.

3. По условию предыдущей задачи найдите ускорение тела относительно наблюдателя.

Ответ: $8,82 \cdot 10^{16}$ м/с².

4. Найдите массу атома водорода, используя закон Кулона. Считайте, что протон и электрон находятся в состоянии покоя на расстоянии радиуса Бора. Сравните массу атома водорода с атомной единицей массы.

Ответ: $(m_p + m_e - 0,3 \cdot 10^{-34}$ кг).

5. По условию предыдущей задачи найдите массу атома водорода, при вращении электрона вокруг протона.

Ответ: $(m_p + m_e - 0,3 \cdot 10^{-34}$ кг + $0,15 \cdot 10^{-34}$ кг).

Самое важное в главе 8

• В заключение еще раз обратим ваше внимание на то, что *вся специальная теория относительности основывается на двух постулатах*:

1) *скорость света в вакууме постоянна и является предельной скоростью*;

2) *все физические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета*.

Для движущегося наблюдателя:

• время течет медленнее, чем для неподвижного, что выражается формулой $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, т. е. собственное время $\Delta t'$ меньше, чем дли-

тельность этого события для движущегося наблюдателя $\Delta t'$;

• длина сокращается, т. е. $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, длина движущегося объекта l меньше длины покоящегося l_0 ;

• инертная масса тела зависит от скорости его движения:

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

т. е. инертная масса движущегося тела m всегда больше массы покоя m_0 этого тела.

• В релятивистской физике установлена глубочайшая взаимосвязь между веществом и полем, выраженная формулой:

$$E_0 = m_0 c^2 \text{ и } E = m c^2$$

где E_0 — энергия покоя тела; m_0 — масса покоя тела; c — скорость света в вакууме; E — полная энергия тела.

• В 1916 г. А. Эйнштейном была предпринята попытка объяснения гравитации в общей теории относительности, в которой он предсказывает взаимодействие света с гравитационным полем Солнца. В 1919 г. при солнечном затмении это взаимодействие было экспериментально подтверждено.

Раздел V. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 9. АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

§ 44. Виды излучений



Ключевые понятия:

- ✓ источник излучения
- ✓ тепловое излучение
- ✓ электролюминесценция
- ✓ катодолюминесценция
- ✓ хемилюминесценция
- ✓ фотолюминесценция

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными видами излучения и их источниками.



Это вы знаете

Процесс распространения в пространстве электромагнитных колебаний называется электромагнитными волнами. Электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении электрических зарядов. В зависимости от длины волны (частоты) свойства электромагнитных волн проявляются по-разному, в частности, только в очень узком интервале длин волн от 780 нм до 400 нм электромагнитные волны вызывают световые ощущения у человека. К электромагнитным волнам относятся также радиоволны, инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

Процесс испускания и распространения электромагнитных волн принято называть *излучением*. *Источник излучения* — это то или иное вещество (тело) или устройство, испускающее излучение. Так как заряженные частицы, при ускоренном движении которых излучаются электромагнитные волны, входят в состав атомов вещества, источниками излучений являются атомы. Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать определенную энергию. Атом при излучении теряет полученную извне энергию, поэтому для непрерывного излучения необходим постоянный приток энергии к веществу.

Классификация источников излучений. Все существующие источники электромагнитного излучения можно разделить на две группы: *искусственные и естественные*.

Естественными источниками являются Солнце, Луна, планеты, звезды, атмосфера и поверхность Земли. Излучение естественных источников нельзя регулировать, поэтому они в основном используются для научных исследований и в системах пассивного типа, например в солнечных водонагревателях, солнечных батареях и т. д. Излучение



а)



б)



в)



г)

Рис. 44.1. Искусственные источники излучения:

- а) люминесцентная лампа;
- б) газоразрядная лампа;
- в) лазеры; г) светодиоды

Газоразрядным источником излучения называется прибор (рис. 44.1, б), в котором излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металла или их смесей. Газоразрядные приборы также являются холодными источниками света.

естественных источников создает естественный фон. Естественные источники излучения играют первостепенную роль в существовании жизни на земле и оказывают значительное воздействие на окружающую среду.

Искусственные источники излучений — это технические устройства различной конструкции, основным предназначением которых является получение светового излучения (например, осветительные лампы или фонари). В искусственных источниках обычно электрическая энергия преобразуется в световую, но также может быть использована химическая энергия, либо другие способы генерации света. Они используются в различных практических целях. В свою очередь, искусственные источники излучения оптического диапазона можно разделить на тепловые, люминесцентные, газоразрядные, оптические квантовые генераторы (лазеры) и светодиоды.

Как вам известно (9 класс), любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, может быть *источником теплового излучения*. Самый яркий пример источника теплового излучения — это Солнце. Лампа накаливания, пламя горящего огня, радиаторы отопления, электронагревательные приборы, нагретая почва также являются тепловыми источниками излучения.

В *люминесцентных источниках* (рис. 44.1, а) возбуждение атомов и электронов осуществляется электромагнитным полем. Люминесцентные лампы являются холодными источниками излучения. Люминесцентное излучение некогерентно, выходит из излучателя во все стороны, но у него спектральный диапазон уже, чем у теплового.

В квантовых генераторах (лазерах) (рис. 44.1, в) излучение вызывается индуцированными переходами электронов с высоких уровней на более низкие, оно когерентно, монохроматично и распространяется в малом телесном угле.

Принцип действия излучающих светодиодов (полупроводниковых диодов) (рис. 44.1, г) основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с р-п-переходом.

Виды излучений. Рассмотрим основные виды излучений. К ним относятся: тепловое излучение, люминесценция: электролюминесценция, катодолуминесценция, хемилюминесценция, фотолюминесценция.

Тепловое излучение — это излучение нагретых тел. С некоторыми его характеристиками вы познакомились в 9-классе. Тепловое излучение происходит за счет энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии идет на возбуждение атомов, которые затем излучают. Тепловое излучение происходит в широком диапазоне частот, является некогерентным и выходит из излучателя во все стороны.

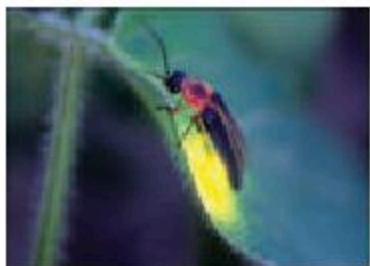
Электролюминесценция. Это излучение сопровождает процесс протекания электрического тока в газах. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Ускоренные электроны испытывают неупругие соударения с атомами, при этом часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. В результате этого разряд в газе сопровождается свечением. Это и есть **электролюминесценция**. Явление электролюминесценции используется для рекламных надписей?

Одно из проявлений электролюминесценции в природе — это **северное сияние** (рис. 44.2). Поток заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Они возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы, при переходе возбужденных атомов в основное состояние они излучают.

Катодолуминесценция заключается в свечении вещества, облучаемого быстрыми электронами. Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, называют катодолуминесценцией. Явление катодолуминесценция применяется в вакуумной электронике. Свечение экранов телевизоров, различных осциллографов, электронно-опти-



Рис. 44.2. Северное сияние



а)



б)

Рис. 44.3. Светлячки:

- а) светлячки в лесу;
б) пещерные светлячки

ческих преобразователей и т. д. происходит благодаря катодолюминесценции. Явление катодолюминесценции лежит в основе создания лазеров, возбуждаемых электронным пучком.

Хемилюминесценция — излучение света, появляющееся при протекании некоторых химических реакций, идущих с выделением энергии. Часть выделившейся энергии расходуется на излучение света, при этом сам источник света остается холодным. Примером этого явления в природе являются светлячки (рис. 44.3). Таким же свойством обладают некоторые бактерии, насекомые, многие глубоководные рыбы.

Фотолюминесценция — свечение некоторых тел непосредственно под действием падающего на него излучения. Часть энергии падающего излучения поглощается атомами вещества и возбуждает их. Возбуждение

атомов снимается излучением видимого света. Светящиеся краски являются примером этого явления. Фотолюминесценция широко применяется в лампах дневного света, изготовлении светящихся шкал, в микробиологии и в медицине.



1. Дайте определение источника излучения
2. Приведите примеры естественных источников излучения
3. Приведите примеры искусственных источников излучения. Какие преобразования энергии происходят в них.
4. Какие виды искусственных источников излучения вы знаете? Расскажите об их основных характеристиках.
5. Расскажите об основных видах излучений.



Соберите информацию и напишите рассказ на тему "Светящиеся обитатели морских глубин".

§ 45. Спектры. Спектральный анализ, спектральные аппараты



Ключевые понятия:

- ✓ спектр излучения
- ✓ спектр поглощения
- ✓ сплошной спектр
- ✓ линейчатый спектр
- ✓ полосатый спектр
- ✓ спектральные аппараты
- ✓ спектральный анализ

На этом уроке вы:

- познакомитесь со спектрами излучения и поглощения;
- изучите принцип действия спектральных аппаратов и области их применения.



Открытие и исследования основных закономерностей линейчатых спектров испускания послужило одним из важных экспериментальных фактов, послуживших рождению и развитию атомной физики. Рассмотрим виды спектров и их основные закономерности.

Спектры излучения. *Спектром излучения* (испускания) называется совокупность длин волн, присутствующих в излучении данного вещества.

Спектры излучения (испускания) можно разделить на три типа:

1. Сплошной (непрерывный) спектр.
2. Линейчатый (атомный) спектр.
3. Полосатый (молекулярный) спектр.

Сплошной спектр дает излучение нагретых до высоких температур твердых и жидких тел, а также газов при большом давлении. В нем спектральные цвета непрерывно переходят один в другой (рис. 45.1, а).

Полосатый спектр представляет собой совокупность полос, четких с одного края и размытых с другого (рис. 45.1, б). Такой спектр создается молекулами вещества, слабо связанными друг с другом.

Линейчатый спектр — это оптический спектр, состоящий из отдельных четких ярких спектральных линий на черном фоне (рис. 45.1, в). Линейчатый спектр излучают разреженные газы или пары любого химического элемента, нагретые до высоких температур.

Спектры поглощения. *Спектром поглощения* называют совокупность длин волн, которые поглощаются данным веществом. Если белый свет от источника, дающего сплошной спектр, пропустить через пары

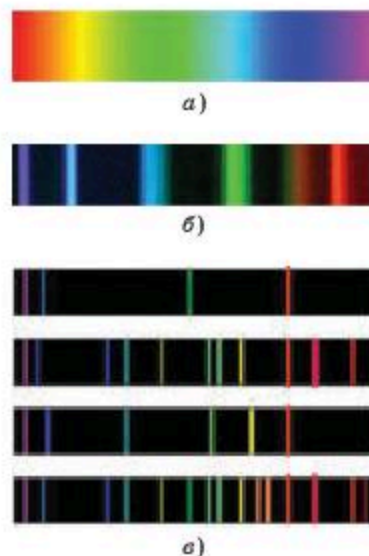


Рис. 45.1. Спектры испускания:

- а) сплошной спектр;
б) полосатый спектр; в) линейчатые спектры

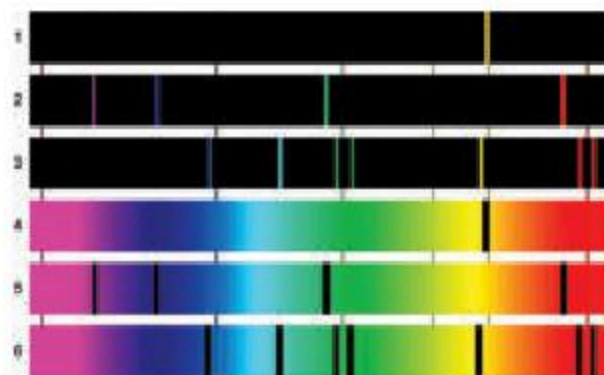


Рис. 45.2. Спектры испускания и поглощения паров натрия, водорода и гелия

какого-нибудь вещества, потом его разложить в спектр, то можно на фоне сплошного спектра увидеть темные линии в тех же местах, где находились бы линии спектра испускания паров этого же вещества. Такие спектры называются спектрами поглощения. На рисунке 45.2 представлены: первые три — это линейчатые спектры паров натрия, водорода и гелия, последующие три — это соответствующие этим веществам спектры поглощения.

Исследования показали, что каждому газу присущ свой линейчатый спектр излучения, отличный от спектра любого другого газа. Каждой линии в спектре соответствует определенная длина волны (*частота*). Поэтому можно сказать, что разреженные газы испускают электромагнитные волны, имеющие определенную длину волны (частоту). Почему так происходит? Почему спектр данного газа состоит из линий определенного дискретного набора частот $\nu_1, \nu_2, \nu_3 \dots$, а не каких-нибудь других частот? Вот важный вопрос, ответ на который надо было искать во внутренней структуре атомов.

Ведь сильно нагретый газ находится в атомарном состоянии, поэтому излучение должно быть связано с процессами, происходящими внутри атомов.

Самым простым из всех является спектр водорода. В видимой области он состоит всего из четырех линий. Поэтому экспериментально наиболее полно изучали именно спектр водорода. В результате швейцарский ученый Бальмер в 1885 г. подобрал эмпирическую формулу, по которой можно было определить частоты (длины волн) всех линий в спектре водорода в видимой области:

$$\nu = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ или } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (45.1)$$

где $R' = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц; $R = 1,0968 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — постоянные Ридберга.
Это — *формула Бальмера*.

Спектральные линии, которые можно определить по формуле Бальмера, отличаются друг от друга значением n , и их совокупность называется серией Бальмера.

Кроме того, в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра водорода были обнаружены еще несколько серий. Все эти серии могут быть описаны одной формулой, которая называется *обобщенной формулой Бальмера*:

$$\nu = R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ или } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (45.2)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, n$, $n = (m + 1), (m + 2), (m + 3), \dots$ и т. д.

Позже было установлено, что частоты излучения атомов любого вещества можно представить в виде формулы (45.2), т. е. в виде разности двух чисел. Если обозначить $T_1(m) = \frac{R}{m^2}$; $T_2(n) = \frac{R}{n^2}$, где функции $T_1(m)$ и $T_2(n)$ получили название термов, формулу Бальмера можно записать:

$$\nu = T_1(m) - T_2(n). \quad (45.3)$$

Таким образом, частоту излучения любых атомов можно представить в виде разности двух термов. Отсюда вывод: в строении атомов всех веществ имеют место общие закономерности.

Открытие Бальмера сыграло большую роль в дальнейшем развитии учения о строении атома. Спектральные закономерности излучения веществ были объяснены в рамках квантовой теории строения атома.

Спектральный анализ. То обстоятельство, что линейчатые спектры различных элементов имеют свойственные только этому элементу линии, послужило созданию и развитию метода спектрального анализа. Спектральный анализ — это метод определения химического состава вещества по его спектру излучения или поглощения. Основы метода были разработаны в 1859 г. немецкими учеными Г.Р. Кирхгофом и



Г. Р. Кирхгоф
(1824—1887)



Р. В. Бунзен
(1811—1899)

Р.В. Бунзенем. Как уже было сказано, у каждого газа свой, только ему присущий спектр излучения, который состоит из набора ярких линий определенных цветов. Цвет этих линий соответствует определенным длинам волн, они всегда находятся в одних и тех же местах спектра.

Учеными составлены таблицы с перечнем линий каждого газа и с указанием яркости каждой линии. Изучив спектр исследуемого газа (паров вещества), с помощью таких таблиц можно установить элементный состав этого вещества. Еще во второй половине 19 века методом спектрального анализа удалось исследовать состав Солнца. В 1868 году в спектре Солнца были обнаружены линии ранее неизвестного элемента. Так был открыт гелий (греч. helios “Солнце”). Только через 27 лет небольшое количество этого газа обнаружилось и в земной атмосфере. Сегодня известно, что гелий — второй по распространенности элемент во Вселенной.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Термин “спектр” впервые ввел Ньютон в 1671—1672 годах. Он в 1666 г. установил, что при прохождении через стеклянную трехгранную призму полоска белого света разлагается в похожую на радуго многоцветную полосу. Для обозначения этой полосы он и ввел термин “спектр”. В своем труде “Оптика” (1704 г.) он опубликовал результаты своих опытов разложения с помощью призмы белого света на отдельные компоненты семи различных цветов, то есть получил спектр солнечного излучения и объяснил его природу. Ньютон показал, что цвет есть собственное свойство света, он не вносится призмой. Фактически Ньютон заложил основы оптической спектроскопии.

Спектральные аппараты. Для проведения спектрального анализа нужны приборы, дающие четкий спектр, т. е. приборы, хорошо разделяющие волны различной длины и не допускающие перекрытия отдельных участков спектра. Такие приборы называют *спектральными аппаратами*. Их основной частью является призма или дифракционная решетка, которая разлагает исследуемое излучение в спектр. На рисунке 45.3 представлен двухтрубный призмный *спектроскоп*.



Рис. 45.3. Двухтрубный спектроскоп

Рассмотрим принцип действия спектрального аппарата.

Он содержит: коллиматор с щелевым устройством, призму и зрительную трубу (рис. 45.4). Исследуемое излучение по-

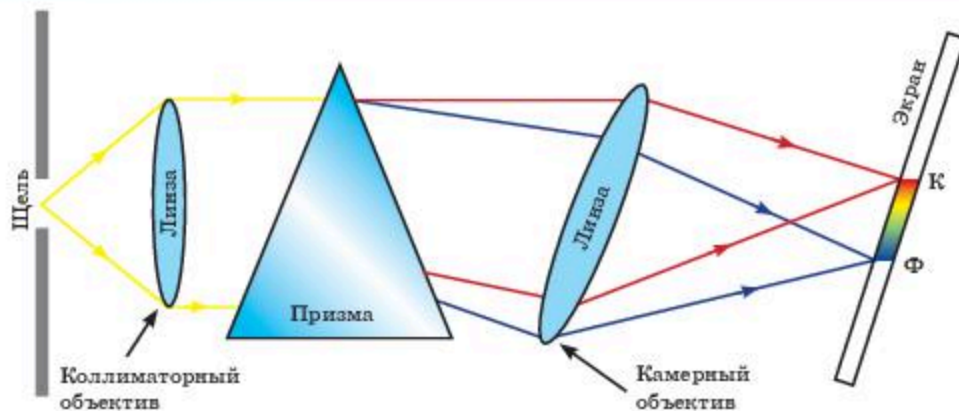


Рис. 45.4. Устройство призмного спектрографа

ступает в коллиматор, который представляет собой трубу, на одном ее конце имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза. Щель расположена в фокальной плоскости линзы (см. рисунок). Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму. Из призмы выходят параллельные пучки различных частот (цветов), не совпадающие по направлению. Они падают на вторую линзу. На фокусном расстоянии от этой линзы располагается экран — матовое стекло или фотопластинка. Линза проецирует на экране параллельные пучки лучей, вышедшие из нее, и на экране получается ряд изображений щели, соответствующие разным частотам. Эти изображения образуют спектр. Это *спектрограф*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то прибор называется *спектроскопом* (рис. 45.3). В спектроскопе можно глазами увидеть, увеличив изображение с помощью линзы, а спектрограф позволяет делать фотографии спектра.

Применения спектрального анализа. В астрономии спектральный анализ дает возможность определять элементный состав небесных тел, находящихся от исследователя на расстоянии многих миллионов километров.

В геологии методом спектрального анализа определяют состав почв и минеральных находок.

В ювелирном деле это — установление пробы драгоценных металлов и определение состава сплавов; оценка чистоты драгоценных камней.

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях — выявление загрязнений в нефтяном сырье и примесей в топливных продуктах.

В археологии и в области искусства методами спектрального анализа проводится экспертиза произведений искусства и археологических находок с целью экспертизы подлинности и датирования.

В отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности проводится микроэлементный анализ почвы, воды и продуктов; экспертиза на содержание тяжёлых металлов.



1. Какие виды спектров испускания знаете?
2. Что такое сплошной спектр? Полосатый? Опишите их. Назовите источники излучения сплошного и полосатого спектров.
3. Какой спектр называется линейчатый? Опишите его. Какие вещества излучают линейчатый спектр?
4. Напишите формулу Бальмера и объясните ее.
5. В чем суть метода спектрального анализа?
6. Объясните устройство призмного спектрального аппарата
7. Расскажите о применениях метода спектрального анализа

§46. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Рентгеновские лучи. Шкала электромагнитных излучений



Ключевые понятия:

- ✓ инфракрасное излучение
- ✓ ультрафиолетовое излучение
- ✓ рентгеновские лучи
- ✓ диапазон частот
- ✓ шкала электромагнитных излучений

На этом уроке вы:

- познакомитесь с природой возникновения и взаимодействия с веществом инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучений и их расположением в шкале электромагнитных волн.

Самым мощным естественным источником электромагнитного излучения на Земле является Солнце. Состав солнечного излучения вблизи земной поверхности сложен и зависит от высоты Солнца над горизонтом. В частности, согласно международной классификации, в интервале длин волн, прилегающих к оптическому диапазону, из состава солнечного излучения можно выделить инфракрасное и ультрафиолетовое излучения. Природа всех видов солнечного излучения одна, но их свойства существенно зависят от длины волны (частоты). В частности, чем меньше длина волны, тем более выражено биологическое действие данного излучения.

Инфракрасное излучение. Спектр солнечного излучения представляет собой смесь электромагнитных волн различных частот (длин волн). Инфракрасное излучение — это электромагнитные волны с диапазоном длин волн от 760 нм до (2600—3000) нм. Тепло, которое исходит от нагретых тел, это инфракрасное излучение с диапазоном длин волн от

1400 нм до 1 мм. Поэтому инфракрасное излучение называют также тепловым излучением. Более половины солнечного спектра составляет инфракрасное излучение.

Весь диапазон инфракрасного излучения можно разделить условно на три области: ближняя: $\lambda = 0,74—2,5$ мкм; средняя: $\lambda = 2,5—50$ мкм; дальняя: $\lambda = 50—2000$ мкм.

При прохождении через вещество инфракрасное излучение усиливает колебательное движение атомов и молекул, что приводит к повышению температуры. Таким образом, инфракрасное излучение оказывает *тепловое воздействие*.

Фотохимическое действие инфракрасного излучения на живые организмы связано с поглощением энергии тканями и клетками, что ведет к активизации ферментных процессов и, как следствие, к ускорению обмена веществ, усилению процессов регенерации, иммуногенеза. При этом воздействие может быть как местным, так и общим. Местное воздействие на ткани приводит к ускорению биохимических реакций, иммунологических процессов, роста клеток и регенерации тканей, к усилению кровотока.

Общее действие сводится к противовоспалительным, болеутоляющим, общетонизирующим эффектам. Эти эффекты широко используются в физиотерапии для лечения заболеваний воспалительного характера с целью уменьшения болевого синдрома при ревматизме, остеохондрозе и т.д.

Инфракрасное излучение также существенно *влияет на климат и микроклимат*. Вследствие неравномерного нагревания земной поверхности и испарения воды происходит движение воздуха и водных масс, формирование циклонов и антициклонов, теплых и холодных течений, разнообразие климатических зон, погодных условий, которые опосредованно влияют на человека.

Отрицательное воздействие инфракрасного излучения на живые организмы связано с тепловым эффектом, что может привести к перегреванию организма с развитием теплового или солнечного удара.

Человек и многие теплокровные животные не могут видеть в инфракрасном диапазоне, но некоторые биологические виды все же могут воспринимать органами зрения инфракрасное излучение. Так, например, некоторые виды змей могут видеть в инфракрасном диапазоне и охотиться на теплокровную добычу ночью. У обыкновенных удавов эта способность имеется одновременно с нормальным зрением, в результате чего они способны видеть окружающее одновременно в двух диапазонах: нормальном видимом (как и большинство животных) и инфракрасном. Среди рыб способность видеть под водой в инфракрасном диапазоне имеется у пираний и золотой рыбки. Инфракрасным зрением обладают

также комары, что позволяет им с большой точностью ориентироваться на наиболее насыщенные кровеносными сосудами участки тела добычи.

Ультрафиолетовое излучение. *Ультрафиолетовое излучение* — это электромагнитные волны, длины волн которых лежат в диапазоне от 10 до 400 нм. На границе с земной атмосферой ультрафиолетовые лучи занимают около 5% спектра солнечного излучения, на поверхности земли доля ультрафиолетовых лучей составляет 1%, так как его коротковолновая часть (менее 300 нм) задерживается озоновым слоем Земли. Спектр ультрафиолетового излучения может быть поделён на следующие группы (стандарт ISO — международной организации

по стандартизации): *ближний* или *ультрафиолет А*, это длинноволновой диапазон (400—300) нм; *средний*, иначе *ультрафиолет В* — средневолновой диапазон (300—200) нм; *дальний* или *ультрафиолет С* — коротковолновой (200—122) нм; *экстремальный* (121—10) нм.

Основной естественный источник ультрафиолетового излучения на Земле — Солнце. К искусственным источникам относятся: эритемные лампы, ртутно-кварцевые устройства, люминесцентные лампы, ртутно-ксеноновые лампы, газоразрядные устройства, аппараты для соляриев, и т. д. Другой тип искусственных источников — это лазеры.

Эритемные лампы (рис. 46.1, а) — это ртутные лампы низкого давления, колбы которых выполнены из специального стекла. На внутреннюю поверхность колбы наносится люминофор, обеспечивающий генерацию ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 280—380 нм, применяется в физиотерапии с лечебной и профилактической целью.

Ртутно-ксеноновые лампы (рис. 46.1, б), в них в колбе, заполненной ксеноном и парами ртути светится электрическая дуга. Они излучают голубовато-белый свет с сильным выходом ультрафиолета, используют их для физиотерапевтических целей, стерилизации и озонирования.



Рис. 46.1. Искусственные источники УФ излучения:

- а) эритемные лампы;
- б) ртутно ксеноновые лампы;
- в) аппарат для соляриев

Солярий (рис. 46.1, в) — это специально оборудованная открытая площадка для проведения дозированных облучений. Излучение получают от специальных эритемных ультрафиолетовых ламп, в стекло колбы которых вводятся специальные добавки, не пропускающие опасную коротковолновую часть УФ спектра.

Лазерные источники ультрафиолетового излучения в основном применяются в медицинской технике, системах контроля и автоматики и для научных исследований, в биотехнологиях.

Рентгеновские лучи — это электромагнитное излучение, длина волн которого соответствует диапазону 10^{-7} до 10^{-12} м. Основным источником рентгеновского излучения является *рентгеновская трубка* (см. 9 класс). В ней между анодом и катодом создается высокое напряжение. Электроны, вылетающие из катода вследствие его нагрева, ускоряются в электрическом поле и резко тормозятся при соударении в веществе анода. При этом возникает *тормозное рентгеновское излучение*.

При дальнейшем увеличении напряжения между анодом и катодом энергия ускоренных полем электронов может возрасти настолько, что при соударении с веществом анода ускоренный электрон может вырвать электрон с внутренней оболочки атома. Тогда на фоне сплошного энергетического спектра тормозного излучения появляются резкие линии *характеристического излучения*. Частоты этих линий зависят от природы вещества анода, поэтому их и назвали характеристическими.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Значения длин электромагнитных волн (частоты) лежат в очень широком диапазоне. Какой бы ни была длина волны (частота), природа всех электромагнитных волн и их свойства одинаковы, но они могут проявляться по-разному. В зависимости от длины волны (частоты) источники и приемники электромагнитных волн тоже могут быть разными. Поэтому электромагнитные волны классифицируются по длине волн (частоте) в так называемой шкале электромагнитных волн. Она представляет собой непрерывную последовательность длин волн (частот) электромагнитных волн, существующих в природе (рис. 46.2).

Как видно из рисунка 46.2, по шкале электромагнитных волн можно выделить следующие области: радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма излучение.

Электромагнитные излучения различных длин волн отличаются друг от друга также по тому, каким способом они получены (радиоволны, тепловое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское из-

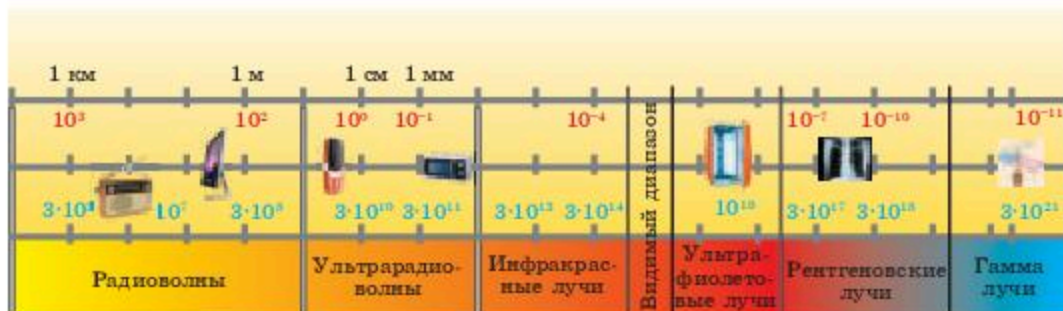


Рис. 46.2. Шкала электромагнитных излучений

лучение и т.д.). Различны и методы регистрации электромагнитных волн разного диапазона. Источниками электромагнитного излучения являются и космические объекты, такие как звезды, черные дыры и прочее. Исследование этих излучений ведется с помощью искусственных спутников, космических кораблей. Такие исследования в основном направлены на изучение гамма и рентгеновских излучений, так как на поверхности Земли затруднены из-за того, что большая их часть задерживает земная атмосфера. Коротковолновое излучение (гамма лучи и рентгеновские излучения) слабо поглощается, поэтому у них высокая проникающая способность.



1. Чем отличаются друг от друга различные виды электромагнитных излучений?
2. Расскажите об основных свойствах инфракрасного излучения.
3. Что такое ультрафиолетовое излучение? Почему оно так называется?
4. Какие искусственные источники ультрафиолетового излучения вы знаете?
5. Что вы знаете о рентгеновских лучах?
6. Что такое шкала электромагнитных волн?



Изучите шкалу электромагнитных волн. Выделите их основные диапазоны, выясните, чем они (кроме длины волны) отличаются друг от друга? Рассмотрите области применения излучений различных диапазонов. Подготовьте презентацию.

§ 47. Тепловое излучение



Ключевые понятия:

- ✓ тепловое излучение
- ✓ интегральная энергетическая светимость
- ✓ испускательная способность
- ✓ абсолютно черное тело
- ✓ квант
- ✓ дискретность
- ✓ постоянная Планка

На этом уроке вы:

- изучите законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и закон смещения Вина;
- познакомитесь с основными характеристиками теплового излучения и с квантовой гипотезой Планка.



Тепловое излучение. *Тепловое излучение* — это один из видов электромагнитного излучения, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.

Это вы знаете

Источником теплового излучения может быть любое тело, температура которого выше абсолютного нуля, но видимое излучение испускается только при высоких температурах, а при низких температурах излучаются длинные (инфракрасные) электромагнитные волны.

Действительно, из повседневных наблюдений нам известно, что от нагретых тел идет поток тепла, а раскаленные тела (например, спирали электронагревательных приборов или кусок каменного угля, брошенный в огонь) начинают светиться. Также мы знаем, что любое тело может не только испускать, но и поглощать тепловое излучение.

Тепловое излучение является самым распространенным в природе. Рассмотрим его основные характеристики и закономерности. Проведем мысленный эксперимент. Поместим излучающее тело в полость с идеально отражающей поверхностью (рис. 47.1) и удалим из нее воздух. Излучение тела отражается от стенок полости и, упав на тело, частично или полностью поглощается им.

Следовательно, между телом и заполняющим полость излучением будет происходить непрерывный обмен энергией. По истечении достаточно большого времени наступит равновесие, т. е. тело в единицу времени будет излучать столько же энергии, сколько и поглощать.

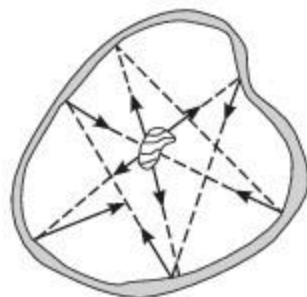


Рис. 47.1. Тепловое излучение тела внутри полости.

Тепловое излучение — это единственный вид излучения, который является равновесным. Равновесие теплового излучения обусловлено тем, что его интенсивность возрастает с повышением температуры. Допустим, что равновесие между телом и излучением нарушено, и тело испускает больше энергии, чем поглощает. Тогда температура тела понижается, и оно начинает излучать менее интенсивно. Таким образом, температура тела, а значит и количество излучаемой им энергии уменьшаются до тех пор, пока опять не наступит тепловое равновесие.

Интенсивность теплового излучения можно характеризовать его мощностью. *Мощность излучения единицы поверхности излучающего тела по всем направлениям (в пределах телесного угла 4π) называется интегральной энергетической светимостью тела.* Эту величину будем обозначать буквой R , она зависит от температуры излучающего тела. Интенсивность теплового излучения в разных диапазонах частот (длин волн) разная. Поэтому вводят понятие *спектральной плотности энергетической светимости, или испускательной способности тела:*

$$r = \frac{\Delta R}{\Delta \nu}, \quad (47.1)$$

где ΔR — мощность излучения с единицы поверхности тела в интервале частот шириной $\Delta \nu$.

Испускательной способностью тела называется мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины. Испускательная способность тела сильно зависит от температуры.

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется *спектральной поглощательной способностью*, определяемой как *отношение потока поглощенной телом энергии к потоку падающей лучистой энергии.* Если на единицу площади поверхности тела падает поток лучистой энергии $\Delta \Phi_{\Delta \nu}$, обусловленный электромагнитными волнами в интервале частот $\Delta \nu$, то часть этой энергии $\Delta \Phi'_{\Delta \nu}$ поглощается. Спектральная поглощательная способность тела определяется как

$$a = \frac{\Delta \Phi'_{\Delta \nu}}{\Delta \Phi_{\Delta \nu}}. \quad (47.2)$$

Как поглощательная, так и испускательная способности тела зависят от температуры тела и частоты излучения.

Тело, полностью поглощающее упавшее на него излучение всех частот, называется абсолютно черным. Для абсолютно черного тела $a = 1$, для всех остальных тел $a < 1$.

Закон Кирхгофа. *Проведем мысленный эксперимент.* Пусть внутри теплоизолированной полости находятся несколько нагретых тел (рис. 47.2). Воздух внутри полости откачан, температура T поддерживается постоянной. Так как внутри полости вакуум, тела будут обме-

ниваться энергией между собой и стенками полости только путем испускания и поглощения электромагнитных волн. В результате через некоторое время наступит тепловое равновесие — все тела будут иметь температуру одинаковую T . Поскольку в дальнейшем температура тел меняться не будет, то тело, испускающее больше энергии (обладающее большей испускательной способностью r), должно поглощать больше энергии (обладать большей поглощающей способностью a).

Другими словами, чем больше испускательная способность тела, тем больше его поглощательная способность. Поэтому можно записать:

$$\left(\frac{r}{a}\right)_1 = \left(\frac{r}{a}\right)_2 = \left(\frac{r}{a}\right)_3 \dots,$$

где индексы 1, 2, 3 означают, что соотношения относятся к телам 1, 2 и 3.

Таким образом, отношение лучеиспускающей способности тела к его поглощательной не зависит от материала тела и является универсальной функцией частоты и температуры для всех тел. Этот закон был установлен Кирхгофом в 1895 г. и называется *законом Кирхгофа*. Закон Кирхгофа можно записать в виде:

$$\frac{r}{a} = f(\nu, T). \quad (47.3)$$

Для абсолютно черного тела $a = 1$, поэтому $r = f(\nu, T)$, т. е. универсальная функция Кирхгофа $f(\nu, T)$ есть *испускательная способность абсолютно черного тела*: $f(\nu, T) = r^*(\nu, T)$. Здесь мы обозначили испускательную способность абсолютно черного тела буквой r^* , чтобы отличать ее от всех других тел.

Абсолютно черных тел в природе не существует. Сажа, платиновая чернь, черный бархат в определенном интервале частот по своим свойствам очень близки к абсолютно черному телу. Спектральный состав излучения Солнца также очень близок к излучению черного тела.

Идеальной моделью абсолютно черного тела может служить полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч света, попавший в такую полость через отверстие, испытывает многократное отражение от стенок (рис. 47.3). При этом каждый раз значительная часть энергии поглощается.

В результате такой полостью поглощается практически все излучение любой частоты. Если внутри такой полости, нагретой до определенной

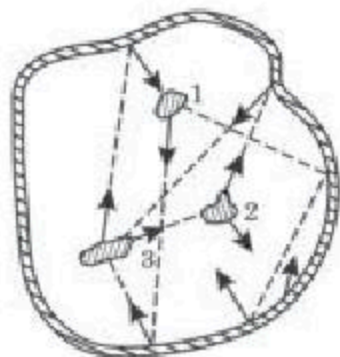


Рис. 47.2. Обмен энергией между излучающими телами внутри полости

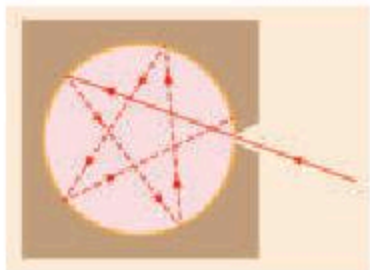


Рис. 47.3. Модель абсолютно черного тела

температуры T , установилось тепловое равновесие, то собственное излучение полости, выходящее из отверстия, будет излучением абсолютно черного тела. Действительно, если заглянуть внутрь полости, в которой установилось термодинамическое равновесие между излучением и нагретыми телами, через малое отверстие, то глаз не различит очертаний тел, можно увидеть лишь однородное свечение всей полости в целом. Направив на щель измерительный прибор, можно исследовать излучение, исходящее из нее. Таким образом, экспериментально было изучено излучение абсолютно черного тела. Плотность энергии и спектральный состав излучения абсолютно черного тела зависят только от температуры.

Закон Стефана — Больцмана. В конце XIX в. излучение абсолютно черного тела было хорошо изучено экспериментально. Анализируя известные экспериментальные данные, австрийский физик И. Стефан в 1879 году пришел к выводу, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Л. Больцман в 1884 году на основе термодинамических соображений теоретически получил такую же зависимость для энергетической светимости абсолютно черного тела. Выводы Стефана оказались справедливыми лишь для абсолютно черного тела. Итак, соотношение между энергетической светимостью абсолютно черного тела и термодинамической температурой получило название *закона Стефана — Больцмана*:

$$R_T = \sigma T^4, \quad (47.4)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ — *постоянная Стефана—Больцмана*.

Из закона Стефана—Больцмана следует, что энергетическая светимость абсолютно черного тела зависит только от температуры.



Стефан Йозеф
(1835—1893)

Но этот закон не дает ответа на вопрос о спектральном составе его излучения. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела было изучено сначала экспериментально. Тщательные экспериментальные измерения спектрального состава излучения абсолютно черного тела показали, что при каждом значении температуры T зависимость $r^*(\lambda, T)$ испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны излучения имеет ярко выраженный максимум (рис. 47.4).

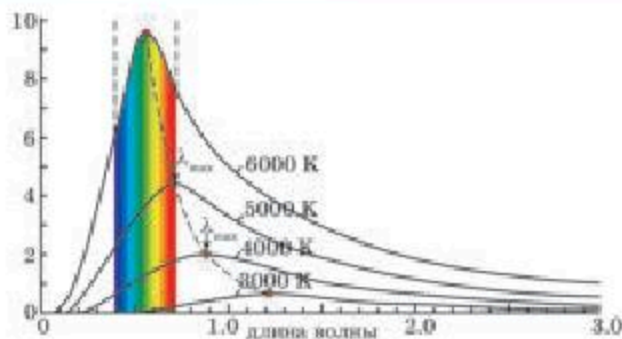


Рис. 47.4. Распределение испускательной способности (мощности) излучения абсолютно черного тела по длинам волн

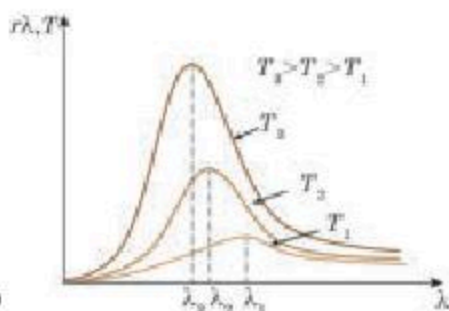


Рис. 47.5. Смещение максимума кривой испускательной способности абсолютно черного тела

Причем этот максимум с ростом температуры смещается в сторону более коротких волн (в область больших частот) (рис. 47.5). Именно поэтому кусок раскаленного металла, к примеру, сначала становится красным, затем оранжево-желтым и, наконец, желтовато-белым.

Площадь, ограниченная каждой кривой и осью абсцисс, определяет интегральную энергетическую светимость R при данной температуре. В соответствии с законом Стефана—Больцмана эта площадь (т. е. R) растет пропорционально четвертой степени температуры.

Закон смещения Вина

Немецкий физик В. Вин установил зависимость частоты, соответствующей максимуму испускательной способности абсолютно черного тела ν^* , от температуры:

$$\frac{\nu_m}{T} = b_1. \quad (47.5)$$

Частота, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Это — закон смещения Вина.

Обычно закон смещения Вина записывают в другой форме — через длину волны, соответствующую максимуму:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (47.6)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ — постоянная Вина.

Ультрафиолетовая катастрофа. Теоретическое обоснование законов излучения абсолютно черного тела, установленных экспериментально, попытались дать английские ученые Д.Рэлей и Д. Джинс, исходя из классического закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. Оказалось, что полученная ими формула для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, кото-

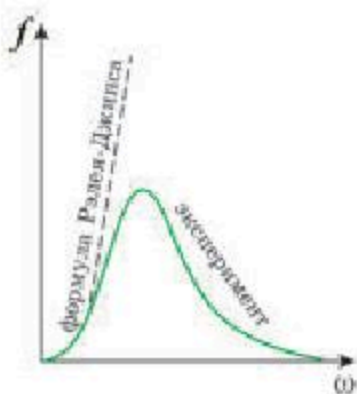


Рис. 47.6. Сравнение формулы Рэлея—Джинса с экспериментом

рую мы здесь приводить и рассматривать не будем по причине ее сложности, неплохо соответствует экспериментальным кривым (рис. 47.6) только в области малых частот и высоких температур.

В области больших частот она резко расходится с экспериментальными законами. Попытка получить из закона Рэлея—Джинса закон Стефана—Больцмана привела к тому, что энергетическая светимость абсолютно черного тела получилась равной бесконечности $R = \infty$! Этот результат получил название *ультрафиолетовой катастрофы*. Таким образом, в рамках классической физики не удалось объяснить законы теплового излучения.

Формула Планка. Дать теоретическое обоснование спектральных закономерностей излучения абсолютно черного тела впервые удалось немецкому ученому Макс Планку. Для этого ему пришлось ввести так называемую *квантовую гипотезу*, совершенно чуждую классической физике. В классической физике предполагается, что энергия любой системы может изменяться *непрерывно*, принимая ряд любых сколь угодно близких значений. Согласно квантовой гипотезе Планка, излучение энергии происходит *дискретно*, “порциями”. “Порцию” энергии назвали *квантом*. Энергия кванта пропорциональна частоте:

$$E = h\nu, \quad (47.7)$$

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

Постоянная Планка является одной из фундаментальных констант, например, таких как скорость света c или элементарный заряд e .



1. Расскажите об основных свойствах теплового излучения.
2. Дайте определение интегральной энергетической светимости.
3. Что такое испускательная способность и поглощательная способность тела?
4. Какое тело называется абсолютно черным?
5. Что может служить моделью абсолютно черного тела?
6. Если днем смотреть на небольшие окна домов снаружи, они кажутся черными, хотя внутри комнат светло. Объясните, почему?
7. Сформулируйте и запишите закон Стефана—Больцмана.
8. Нарисуйте графики зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от частоты при разных температурах.
9. Сформулируйте закон смещения Вина.
10. В чем заключается суть “ультрафиолетовой катастрофы”?
11. Что вы понимаете под словом “квант”? Чему равна энергия одного кванта?



Сделай своими руками модель абсолютно черного тела. Для этого можно использовать небольшую картонную коробку. На одной из сторон коробки надо вырезать небольшое отверстие диаметром не более 0,1 ее размеров. Затем плотно закрыть крышку коробки, заклеить ее. Ваша модель готова, можно проводить эксперименты.



Составьте две задачи: одну на закон Стефана—Больцмана, вторую на закон Вина. Поменяйтесь задачами с соседом по парте, решите их. Вместе обсудите условия и решения этих задач, проведите взаимное оценивание.

Пример решения задачи

Максимум спектральной плотности энергетической светимости излучения Солнца соответствует длине волны $\lambda_m = 500$ нм.

Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определите: 1) энергетическую светимость Солнца; 2) поток энергии Φ , излучаемый Солнцем;

3) массу m всех электромагнитных волн, излучаемых Солнцем за 1 с.

Дано:

$$\lambda_m = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$R = ? \quad \Phi = ? \quad m = ?$$

Решение. 1) Энергетическую светимость определяем из закона Стефана—Больцмана $R = \sigma T^4$. Температуру Солнца определим из закона смещения Вина $\lambda_m = \frac{b}{T}$, отсюда: $T = \frac{b}{\lambda_m}$.

Подставив значение T в формулу закона Стефана—Больцмана, имеем:

$$R = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_m} \right)^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 0,64 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2; R = 64 \text{ МВт/м}^2.$$

2) Поток энергии Φ , излучаемый Солнцем, равен произведению энергетической светимости Солнца на площадь его поверхности:

$$\Phi = R \cdot S; S = 4\pi r^2, \text{ где } r = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м — радиус Солнца;}$$

$$\Phi = 4\pi r^2 \cdot R = 4 \cdot 3,14 \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2 \cdot 64 \cdot 10^6 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт;}$$

$$\Phi = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

3) Массу всех электромагнитных волн, излучаемых за 1 с, определим по известной формуле $E = mc^2$; $E = \Phi \cdot t$, приравняв два последние выражения для энергии, найдем массу:

$$m = \frac{\Phi \cdot t}{c^2} = \frac{3,9 \cdot 10^{26} \cdot 1}{9 \cdot 10^{16}} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

Таким образом, каждую секунду масса Солнца уменьшается на эту величину.



Упражнение 22

1. Определите температуру, при которой энергетическая светимость абсолютно черного тела равна $R_T = 459 \text{ Вт/м}^2$.

Ответ: 300 К.

2. Определите энергию, излучаемую за $t = 5$ мин из смотрового окошка площадью $S = 8 \text{ см}^2$ плавильной печи, считая ее абсолютно черным телом. Температура печи $T = 1000 \text{ К}$.

Ответ: 13,6 кДж.

3. Во сколько раз нужно увеличить температуру абсолютно черного тела, чтобы его энергетическая светимость возросла в два раза?

Ответ: 1,19.

- *4. На какую длину волны λ_m приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре: 300 К; 1000 К?

Ответ: 9,6 мкм; 2,9 мкм

- *5. Максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела приходится на длину волны $\lambda_m = 1,45 \text{ мкм}$. Какова его температура?

Ответ: 2000 К.

- *6. Сколько энергии излучает абсолютно черное тело за 1 с со светящейся поверхности площадью 1 см^2 , если максимум излучательной способности приходится на длину волны $\lambda_m = 725 \text{ нм}$?

Ответ: 1,45 кДж.

- *7. Длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности абсолютно черного тела, равна $\lambda_m = 720 \text{ нм}$. Сколько энергии излучает это тело с площади $S = 5 \text{ см}^2$ за один час? Какова потеря его массы за 1с вследствие излучения?

Ответ: 26,5 МДж; $8,2 \cdot 10^{-14} \text{ кг}$.

§ 48. Фотозффект



Ключевые понятия:

- ✓ фотозффект
- ✓ задерживающее напряжение
- ✓ работа выхода
- ✓ фотоэлектроны
- ✓ красная граница фотозффекта
- ✓ многофотонный фотозффект

На этом уроке вы:

- изучите законы и природу фотозффекта;
- научитесь решать задачи с применением уравнения Эйнштейна.



Одним из явлений, открытых и изученных в конце XIX — начале XX в., послуживших толчком для создания и развития современной квантовой теории, является фотозффект.

Это вы знаете

Явление испускания электронов с поверхности вещества под действием излучений называется внешним фотоэлектрическим эффектом (фотозффектом).

Фотозффект был открыт Г. Герцем в 1887 г. случайно — при исследовании электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Конструируя приемник электромагнитных волн (диполь Герца), он по-разному воздействовал на его шарики и промежутки между ними, чтобы облегчить прием сигнала. С этой целью он освещал их ультрафиолетовыми лучами и заметил, что при освещении отрицательно заряженного шарика разряд между шариками происходит при меньшем напряжении.

Первые экспериментальные исследования фотозффекта были проведены русским ученым А. Г. Столетовым, немецким ученым Ф. Ленардом — учеником Г. Герца. Большой вклад внес Р. Милликен, которому в 1923 г. за исследования элементарных зарядов и фотозффекта была присуждена Нобелевская премия. Для исследования фотозффекта можно использовать установку, схема которой представлена на рисунке 48.1. В evacuated баллон помещены два электрода — анод и катод.

При освещении катода ультрафиолетовыми лучами через кварцевое окошко, из него вырываются фотоэлектроны и под действием электрического поля устремляются к аноду. Изменяя напряжение



А. Г. Столетов
1839—1896

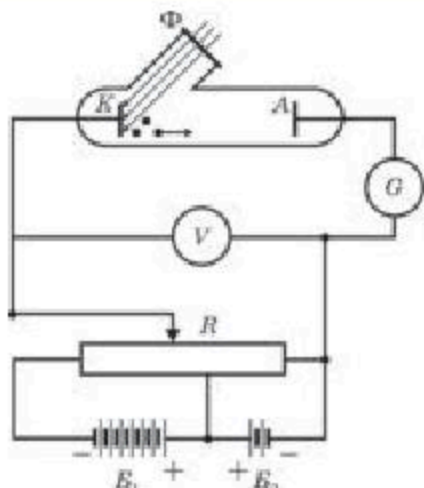


Рис. 48.1. Схема установки для исследования фотоэффекта

между анодом и катодом с помощью потенциометра R , можно получить зависимость силы фототока от напряжения — вольт-амперную характеристику, которая представлена на рисунке 48.2, $a, б$. На рисунке 48.2, a изображена вольт-амперная характеристика при неизменной частоте падающего излучения, но разных интенсивностях Φ_1, Φ_2, Φ_3 , а на рисунке 48.2, $б$ — кривые при постоянном потоке интенсивности и различных частотах ν_1, ν_2 падающего излучения. В том и в другом случае, даже когда напряжение между электродами равно нулю, имеется некоторый малый фототок I_0 .

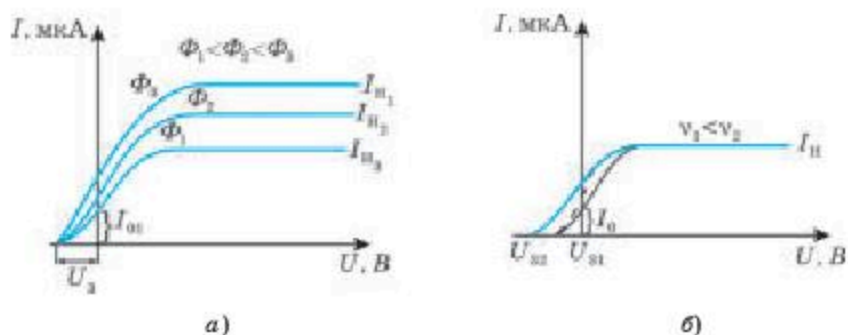


Рис. 48.2. Вольт — амперная характеристика фотоэффекта

Это означает, что при освещении катода определенное число электронов, испускаемых в направлении анода с конечными скоростями, могут долететь до анода “самостоятельно”, без воздействия ускоряющего поля. Для обращения силы тока в ноль надо приложить между электродами отрицательную разность потенциалов U_s — *задерживающее напряжение* (тормозящий, или запирающий потенциал). При таком напряжении даже самый быстрый электрон не сможет, преодолев задерживающее поле, достигнуть анода. Тогда можно записать:

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e U_s, \quad (48.1)$$

где m — масса электрона. Измерив задерживающее напряжение, можно определить максимальную скорость фотоэлектронов.

Из рисунков видно, что при данном потоке падающего излучения, при некотором напряжении фототок достигает насыщения I_n — все

электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Следовательно, ток насыщения определяет количество электронов, испускаемых катодом в единицу времени под действием света.

Законы Столетова В результате проведенных экспериментов к 1905 г. А.Г. Столетовым были установлены следующие *законы фотоэффекта*:

1. *Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения, а зависит только от его частоты.*

С увеличением частоты скорость фотоэлектронов возрастает (рис. 48.2, б). Данная зависимость не укладывается в рамки классической физики, согласно которой увеличение интенсивности означает возрастание амплитуды электромагнитной волны, следовательно, увеличение скорости электронов.

2. *Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения, но не зависит от частоты излучения.*

3. *Для каждого металла существует красная граница фотоэффекта — предельная наименьшая частота ν_{\min} (или наибольшая длина волны λ_{\max}), при которой еще возможен фотоэффект.*

Этот факт также не удалось объяснить по классическим представлениям. Частоту $\nu_{\text{кр}}$ (соответствующую длину волны $\lambda_{\text{кр}}$) называют *красной границей фотоэффекта*.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта Экспериментально наблюдаемые законы фотоэффекта удалось объяснить в 1905 г. А. Эйнштейну. Он развил идею М. Планка о квантах света и предположил, что энергия в пучке монохроматического света состоит из квантов энергии, каждая из которых равна $h\nu$. При падении на поверхность металла квант энергии может быть полностью поглощен электроном, тогда он приобретает дополнительную энергию $h\nu$. Часть этой энергии расходуется на то, чтобы вырвать электрон из металла, т. е. на работу выхода $A_{\text{вых}}$, а оставшаяся часть сообщается свободному электрону, вырванному из металла в виде максимальной кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (48.2)$$

Мы получили знаменитое *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта*. По сути, это уравнение представляет собой закон сохранения энергии для рассматриваемого процесса. Надо заметить, что не все кванты энергии падающего излучения поглощаются электронами. Оказывается, из тысячи поглощенных квантов энергии в среднем лишь один вызывает фотоэффект, оставшаяся часть энергии излучения идет на нагревание металла.

Уравнение Эйнштейна объясняет все известные экспериментальные законы фотоэффекта. Так как работа выхода есть величина постоянная для данного металла, из уравнения (48.2) следует, что *кинетическая*

энергия фотозлектрона линейно возрастает с увеличением частоты. По Эйнштейну, каждый квант энергии поглощается целиком одним электроном, поэтому число вырванных фотозлектронов (сила тока насыщения) должно быть пропорционально количеству квантов, падающих на поверхность металла, т. е. интенсивности излучения.

Из (48.2) также следует, что для наблюдения фотозффекта необходимо, чтобы энергия кванта была хотя бы равна работе выхода, иначе не удастся вырвать электрон из металла, что соответствует вырыванию фотозлектрона с нулевой кинетической энергией, т. е. $\frac{mv_{\max}^2}{2} = 0$. Тогда: $h\nu_{\min} = A_{\max}$. Отсюда:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\max}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\max}}. \quad (48.3)$$

Это и есть *красная граница фотозффекта*.

В рассмотренном выше явлении фотозффекта одним электроном поглощается лишь один квант. Такие процессы называются *однотонными*. В этом случае, если частота падающего света меньше красной границы, фотозффект не наблюдается. Другое дело облучение металлов лазерными пучками. Так как интенсивность лазерного пучка очень высокая, электрон может получить энергию одновременно от нескольких фотонов (от двух до семи), тогда возможен *многофотонный фотозффект*.

Процессы взаимодействия света высоких интенсивностей с веществом изучаются в *нелинейной оптике*. Уравнение Эйнштейна для многофотонного фотозффекта можно записать в виде:

$$N h \nu = A_{\max} + \frac{m v_{\max}^2}{2},$$

где N — число поглощенных электроном квантов энергии. Отсюда видно, что электрон может приобрести энергию, необходимую для выхода из металла, даже под действием света с частотой, меньшей красной границы однотонного фотозффекта. Иначе говоря, для многофотонного фотозффекта красная граница смещается в сторону более длинных волн.



1. В чем заключается явление внешнего фотозффекта?
2. По рисунку 48.1 расскажите, как можно экспериментально исследовать фотозффект.
3. Что такое задерживающее напряжение?
4. Сформулируйте законы Столетова для фотозффекта.
5. Напишите уравнение Эйнштейна для фотозффекта и объясните на его основе экспериментальные законы фотозффекта.
6. Что такое красная граница фотозффекта? Почему она так называется? Ответ обоснуйте.

Пример решения задачи

При длине волны $\lambda_1 = 600$ нм ток фотоэлектронов в вакуумном фотоэлементе прекращается при определенном задерживающем напряжении U_1 . При увеличении длины волны на $\eta = 25\%$ задерживающее напряжение оказывается на $\Delta U = 0,4$ В меньше. Определите по этим данным постоянную Планка.

Дано:

$$\lambda_1 = 600 \text{ нм} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\eta = 25\%$$

$$\Delta U = 0,4 \text{ В}$$

$$h - ?$$

Решение. Запишем уравнение Эйнштейна для двух случаев:

$$h\nu_1 = A_{\text{вых}} + \frac{mv_1^2}{2},$$

$$h\nu_2 = A_{\text{вых}} + \frac{mv_2^2}{2}.$$

Учитывая, что $\frac{mv_1^2}{2} = eU_1$; $\frac{mv_2^2}{2} = eU_2$; $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$; $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2}$ вычтем из первого уравнения второе:

$$hc \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = e(U_1 - U_2).$$

По условию задачи $U_1 - U_2 = \Delta U$; $\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} = \eta$.

$$\text{Тогда: } hc \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1(1+\eta)} \right) = e\Delta U.$$

Отсюда:

$$h = \frac{e\Delta U\lambda_1(1+\eta)}{\eta c} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,4 \text{ В} \cdot 6 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 1,25}{0,25 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2} = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$



Упражнение 23

1. Определите работу выхода электронов из натрия, если красная граница фотоэффекта $\lambda_{\text{max}} = 500$ нм.

Ответ: 2,49 эВ.

2. На цинковую пластину, работа выхода которой $A_{\text{вых}} = 4$ эВ, падает монохроматический свет длиной волны $\lambda = 220$ нм. Определите максимальную скорость фотоэлектронов.

Ответ: 760 км/с.

3. Определите задерживающее напряжение для электронов, испускаемых с поверхности натрия под действием монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 200$ нм.

Ответ: 3,7 В.

- *4. Задерживающее напряжение для электронов, испускаемых с поверхности цинка, равно $U_{01} = 2,42$ В при его освещении излучением длиной волны $\lambda_1 = 185$ нм. Чему равен тормозящий потенциал при длине волны падающего излучения 254 нм?

Ответ: 0,606 В.

- *5. При частоте падающего излучения $\nu_1 = 4 \cdot 10^{15}$ Гц задерживающее напряжение $U_1 = 14$ В, а при частоте $\nu_2 = 8 \cdot 10^{15}$ Гц задерживающее напряжение $U_2 = 30$ В. Определите по этим данным постоянную Планка.

Ответ: $6,4 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

§ 49. Применение фотоэффекта. Фотон



Ключевые понятия:

- ✓ фотоэлемент
- ✓ внутренний фотоэффект
- ✓ вентильный фотоэлемент
- ✓ люксометр
- ✓ фотоспротивление
- ✓ фотон
- ✓ волновой вектор

На этом уроке вы:

- познакомитесь с применением фотоэффекта, с понятием "фотон" и с его основными характеристиками.



Фотоэффект широко используется в различных областях науки и техники. Приборы, основанные на использовании фотоэффекта, называются фотоэлементами. Простейшим из них является вакуумный фотоэлемент. Он представляет собой эвакуированный стеклянный баллон 1, часть внутренней поверхности которого покрыта слоем металла, играющим роль фотокатода 2 (рис. 49.1). В качестве анода используется металлическое кольцо 3 или редкая сетка, помещаемая в центре баллона. Фотоэлемент включается в цепь аккумуляторной батареи, ЭДС которой подбирается так, чтобы фототок был равен току насыщения.

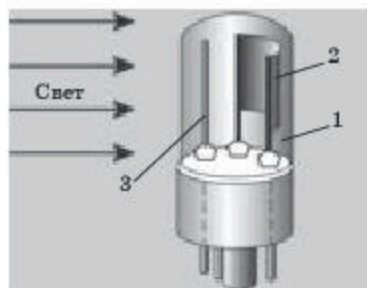


Рис. 49.1. Вакуумный фотоэлемент

Вакуумные фотоэлементы безынерционны, в них фототок строго пропорционален интенсивности излучения, что позволяет использовать их в качестве фотометрических приборов. Рассмотрим некоторые из них:

Люксометр — прибор для измерения уровня освещенности в пространстве, напри-

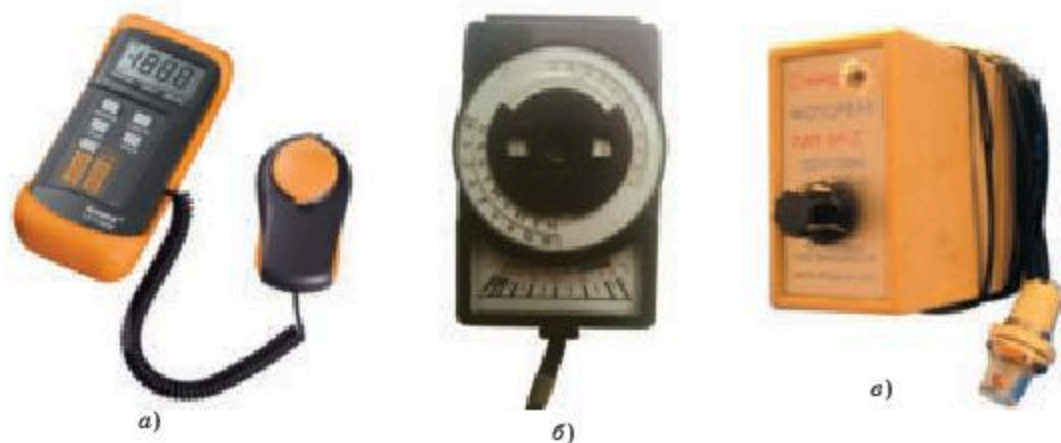


Рис. 49.2. Фотометрические приборы

мер, в жилом помещении или на рабочем месте (рис. 49.2, а). Основная часть этого прибора — это полупроводниковый фотоэлемент, который преобразует световую энергию в энергию электрического тока, сила тока строго пропорциональна освещенности.

Фотозлектрический экспонометр — прибор для определения экспозиции при фото- и киносъемке (рис. 49.2, б). В нем яркость или освещенность объекта съемки определяется при помощи фотоэлементов или фоторезисторов, что позволяет устанавливать нужную экспозицию.

Фотореле — это прибор, замыкающий и размыкающий электрические цепи при изменении падающего на него светового потока (рис. 49.2 в) Он применяется для регулировки освещения, например, для автоматического включения и выключения уличных фонарей. Может применяться также в промышленности и военном деле.

Широко используется *внутренний фотоэффект* — явление увеличения концентрации свободных зарядов (электронов и дырок) в полупроводнике под действием облучения. Как известно, в полупроводнике, находящемся в определенных условиях, существует динамическое равновесие между генерируемыми и рекомбинирующими свободными зарядами.

При освещении полупроводника излучением, энергия квантов которого выше энергии генерации, появляются дополнительные свободные заряды, повышается электропроводность. Первое очевидное применение этого эффекта — *фотосопротивление* (рис. 49.3), это фотозлектрические приборы, в которых используется свойство полупроводников увеличивать проводимость под действием света.



Рис. 49.3. Фоторезисторы

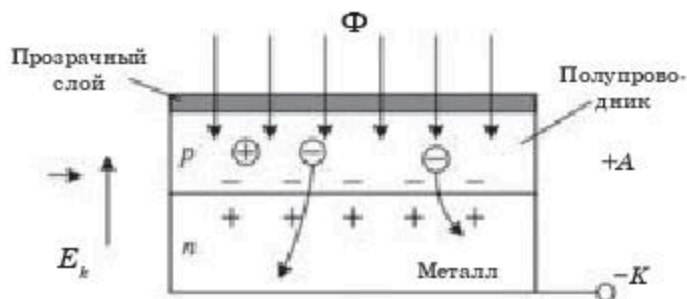


Рис. 49.4. Фотоэлемент с запирающим слоем

При освещении у полупроводника сопротивление уменьшается, причем, чем интенсивнее освещение, тем меньше сопротивление.

Второе применение — *фотоэлемент с запирающим слоем* (рис. 49.4), или *вентильный фотоэлемент*. Он состоит из металлической подложки и дырочного полупроводника (оксида металла), покрытого прозрачным слоем металла. На границе металл — полупроводник (окись металла) вследствие диффузии возникает контактный запирающий слой с напряженностью \vec{E}_k , возникает $p - n$ переход, пропускающий электроны из металла в окись, а дырки из окиси в металл. При появлении светового потока Φ , проникающего в полупроводник, увеличивается концентрация и электронов, и дырок. Электроны при этом могут свободно диффундировать через контакт, а дырки — нет. В результате при освещении электроны накапливаются на подложке, а дырки — в полупроводнике. Между контактами A и K возникает разность потенциалов — фото-ЭДС, пропорциональная освещенности полупроводника. Такие фотоэлементы могут быть применены в качестве источников тока (солнечных батарей), фотоэкспонетров, приборов контроля, для управления и автоматизации различных технологических процессов, в военной технике для сигнализации и локации невидимым излучением, космических кораблях, искусственных спутниках и т. д.

Фотоны. Идеи Планка о квантах энергии излучения нагретого тела, как уже говорилось, были развиты Эйнштейном, который для объяснения законов фотоэффекта предположил, что электромагнитная волна состоит из отдельных порций — квантов. Таким образом, распространение света он рассматривает не как непрерывный волновой процесс, а как поток дискретных квантов, движущихся со скоростью распространения света c в вакууме. Эти кванты электромагнитного излучения были названы *фотонами*. В монохроматическом излучении с частотой ν все фотоны обладают одинаковой энергией $h\nu$. Процесс поглощения излучения веществом сводится к передаче фотонами всей энергии частицам этого вещества, т. е. поглощение происходит прерывисто (дискретно) как в пространстве, так и во времени.

Итак, фотон — это элементарная частица, энергия которой $h\nu$.

Определим ее массу и импульс. Из формулы теории относительности, выражающей взаимосвязь массы и энергии $E = mc^2$, можно найти массу фотона:

$$mc^2 = h\nu, \text{ или } m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (49.1)$$

Но в теории относительности масса зависит от скорости, и если подставить в формулу $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ скорость фотона в вакууме $v = c$, то по-

лучим $m = \infty$, если не считать, что $m_0 = 0$. Отсюда вывод, что фотон не обладает массой покоя. Другими словами, фотон существует только в движении со скоростью c .

Импульс фотона определим из общей формулы теории относительности. Как вам известно, полная энергия релятивистской частицы определяется по формуле: $E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$, так как для фотона $m_0 = 0$, $E = cp$, отсюда

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (49.2)$$

Можно использовать другое значение для постоянной Планка:

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

Введем так называемое волновое число:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (49.3)$$

и запишем формулу (49.2) в виде уравнения:

$$p = \hbar k. \quad (49.4)$$

Импульс — векторная величина. Направление импульса фотона совпадает с направлением распространения света, которое характеризуется волновым вектором \vec{k} , его численное значение определяется выражением (49.3). С учетом сказанного импульс фотона:

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}.$$

Таким образом, как и любая другая движущаяся частица, фотон обладает энергией, массой и импульсом. Все эти корпускулярные характеристики фотона связаны с волновой характеристикой света — частотой приведенными выше формулами. К более подробному обсуждению этого важного вопроса мы вернемся позже.



1. Что представляет собой вакуумный фотоэлемент?
2. Приведите примеры применения фотоэлементов.
3. Объясните явление внутреннего фотоэффекта.
4. Что такое вентильный фотоэлемент? Где он применяется?
5. Что такое фотон?
6. Запишите формулы для определения энергии, массы и импульса фотона.
7. Чему равна масса покоя фотона? Обоснуйте ответ.
8. Приведите вывод формулы импульса фотона.

Пример решения задачи

Какая длина волны соответствует фотону, энергия которого равна энергии покоя электрона?

Дано:

$$m = m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

λ — ?

Решение. Из формулы (49.1) имеем:

$$v = \frac{m_e c^2}{h}$$

Следовательно, $\lambda = \frac{c}{v} = \frac{h}{m_e c} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,31 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,242 \cdot 10^{-11} \text{ м},$
 $\lambda = 2,42 \text{ пм}.$



Упражнение 24

1. Найдите энергию фотона: 1) красного $\lambda = 0,7 \text{ мкм}$; 2) зеленого $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$; 3) фиолетового $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ света.

Ответ: $28,4 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$; $36,1 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$; $49,7 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

2. Энергия фотона $E = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Какая длина волны ему соответствует?

Ответ: $0,62 \text{ мкм}$.

3. Определите длину волны, соответствующую фотону массой $m = 1,66 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$.

Ответ: $1,33 \text{ пм}$.

4. Определите энергию, массу и импульс фотона, соответствующего длине волны $\lambda = 100 \text{ пм}$.

Ответ: $1,99 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$; $2,2 \cdot 10^{-32} \text{ кг}$; $6,625 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

5. Определите импульс фотона, энергия которого равна энергии покоя электрона.

Ответ: $27,3 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

6. Определите частоту, соответствующую фотону, импульс которого $p = 2,5 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Ответ: $1,13 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$.

§ 50. Давление света



Ключевые понятия:

- ✓ давление электромагнитной волны
- ✓ коэффициент отражения
- ✓ интенсивность света
- ✓ объемная плотность энергии

На этом уроке вы:

- познакомитесь с понятием давление света и научитесь объяснять природу светового давления на основе квантовой теории света.



Давление, которое оказывают световые волны при падении на поверхность какого — либо тела, называется *давлением света*. Впервые гипотеза о существовании светового давления была высказана еще в XVII веке И. Кеплером для объяснения поведения хвостов комет, пролетающих вблизи Солнца.

Существование давления света следует из электромагнитной теории Дж. Максвелла. По теории Максвелла при падении на поверхность тела электромагнитной волны, поток электронов вещества под действием электрического поля начинает двигаться в направлении, противоположном вектору напряженности \vec{E} .

На движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, направление которой можно определить по *правилу левой руки*. Оно совпадает с направлением падения луча (рис. 50.1). Через полпериода электрон будет двигаться в противоположном направлении, но направление силы Лоренца останется прежним. Среднее значение суммарной силы Лоренца, приходящееся на единицу поверхности, определяет давление электромагнитной волны. Но значение этого давления оказалось ничтожно малым, поэтому его проверка потребовала очень тонких экспериментов. По формуле, полученной Максвеллом, давление электромагнитной волны:

$$p = (1 + \rho)w_{cp}, \quad (50.1)$$

где ρ — коэффициент отражения; w_{cp} — средняя плотность энергии электромагнитной волны.

Опыты Лебедева. В своем опыте по обнаружению светового давления П. Н. Лебедев подвесил легкие слюдяные крылышки — черные и светлые — на тонкой стеклянной нити и поместил их внутри стеклянного сосуда, из которого был откачан воздух (рис. 50.2).

Так как в формуле (50.1) для черной поверхности $\rho = 0$, давление света на черную поверх-

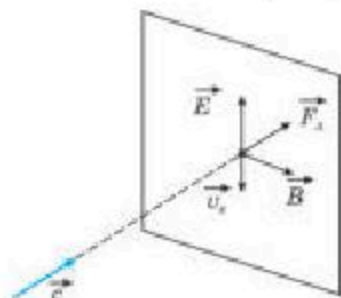


Рис. 50.1. Возникновение светового давления

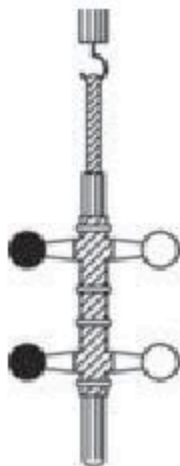


Рис. 50.2.
Схема опыта
Лебедева

ность должно быть гораздо меньше, чем на светлую (примерно в 1,5 раза). Поэтому на подвес должен действовать вращающий момент, который можно измерять по углу закручивания нити с помощью светового зайчика. При освещении подвес поворачивался под давлением света. По углу поворота давление было измерено. Плотность падающей энергии Лебедев измерил с помощью калориметра. Результаты опыта совпали с результатами, рассчитанными по формуле (50.1).

Опыты П. Н. Лебедева имели огромное значение для утверждения выводов теории Максвелла о том, что *свет есть электромагнитная волна*.

Квантовая теория светового давления. С квантовой точки зрения давление света обусловлено тем, что при соударении с поверхностью каждый фотон передает ей свой импульс. Пусть свет падает перпендикулярно поверхности тела и число фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности, равно n . Если ρ есть коэффициент отражения, то ρn фотонов отражается, а $(1 - \rho)n$ фотонов поглощается. Каждый отраженный фотон передает поверхности импульс $2p_\phi = \frac{2h\nu}{c}$, так как после отражения импульс фотона $(-p_\phi)$, а изменение его $\Delta p_\phi = p_\phi - (-p_\phi) = 2p_\phi$. Каждый поглощенный фотон передает импульс $p_\phi = \frac{h\nu}{c}$. Давление света равно суммарному импульсу, передаваемому n фотонами:

$$p_\phi = \frac{2h\nu}{c}\rho n + \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)n.$$

Последнее выражение можно привести к виду:

$$p_\phi = \frac{nh\nu}{c}(1 + \rho) = \frac{I}{c}(1 + \rho). \quad (50.2)$$

Здесь $I = nh\nu$ — *интенсивность света*, т. е. энергия всех n фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, а $w = \frac{I}{c} = \frac{nh\nu}{c}$ — *объемная плотность энергии падающего света*.

С учетом этого $p_\phi = w(1 + \rho)$, т. е. мы получили формулу (50.1).

В обычных условиях световое давление очень мало. Но при некоторых других условиях оно может оказаться существенным. Например, внутри звезд, при температуре в несколько десятков миллионов градусов, давление электромагнитного излучения может достигать громадного значения. Силы светового давления наряду с гравитационными силами играют существенную роль в процессах, происходящих внутри звезд.



1. Объясните наличие светового давления, исходя из электромагнитной теории Максвелла.
2. Опишите опыты П. Н. Лебедева по измерению давления света.
3. Как объясняется наличие светового давления с квантовой точки зрения?

Пример решения задачи

Параллельный пучок монохроматического света длиной волны $\lambda = 500$ нм, падая перпендикулярно на зачерненную поверхность, оказывает на нее давление $p = 10$ мкПа. Определите: 1) концентрацию фотонов в пучке n_0 ; 2) число фотонов n , падающих на единицу поверхности площади в единицу времени.

Дано:

$$\lambda = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$p = 10 \text{ мкПа} = 10^{-5} \text{ Па}$$

$$n_0 = ? \quad n = ?$$

Решение. Объемную плотность энергии w_c можно определить как произведение энергии одного фотона на концентрацию фотонов в пучке:

$$w_c = n_0 \cdot h\nu, \text{ отсюда } n_0 = \frac{w_c}{h\nu}.$$

Из формулы светового давления $p = w_c(1 + \rho)$ определим $w_c = \frac{p}{1 + \rho}$, тогда $n_0 = \frac{p}{(1 + \rho)h\nu} = \frac{p\lambda}{(1 + \rho)hc}$ для черной поверхности $\rho = 0$, поэтому

$$n_0 = \frac{p\lambda}{hc} = \frac{10^{-5} \text{ Па} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2} = 2,52 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3};$$

$$n_0 = 2,52 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}.$$

2. Объемную плотность энергии можно выразить также через интенсивность излучения: $w_c = \frac{I}{c} = \frac{nh\nu}{c}$;

Подставив это выражение в формулу $n_0 = \frac{w_c}{h\nu}$, получим:

$$n_0 = \frac{nh\nu}{ch\nu} = \frac{n}{c}, \text{ отсюда } n = n_0 \cdot c = 2,52 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\text{Ответ: } 7,56 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$



Упражнение 25

1. Фотон с энергией $E = 5$ эВ зеркально отражается от поверхности. Какой импульс при этом получает поверхность?

$$\text{Ответ: } 5,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

2. Давление светового пучка, нормально падающего на поверхность с коэффициентом отражения $\rho = 0,6$, равно $p = 0,2$ Па. Определите интенсивность света.

$$\text{Ответ: } 37,5 \text{ МВт/м}^2.$$

- №3. Световой поток мощностью $N = 6$ Вт нормально падает на поверхность площадью $S = 10$ см². Коэффициент отражения $\rho = 0,6$. Определите давление света на поверхность.

Ответ: 32 мкПа.

- №4. На поверхность площадью $S = 10$ см² с коэффициентом отражения $\rho = 0,7$ перпендикулярно падает каждую секунду $n = 10^{18}$ фотонов. Длина волны света $\lambda = 500$ нм. Определите давление света.

Ответ: 2,5 мкПа.

- №5. Найдите давление света на стенки электрической лампы мощностью $N = 100$ Вт. Лампу считайте сферой радиуса $r = 5$ см. Коэффициент отражения $\rho = 0,1$. Считайте, что вся потребляемая лампой мощность идет на излучение.

Ответ: $1,25 \cdot 10^{-5}$ Па.

§51. Химическое действие света



Ключевые понятия:

- ✓ фотохимическая реакция
- ✓ красная граница фотохимической реакции
- ✓ фотосинтез
- ✓ фототрофы
- ✓ фотография

На этом уроке вы:

- познакомитесь с химическими действиями света.



При облучении световыми волнами могут происходить различные изменения свойств вещества, т.е. свет оказывает *химическое действие*. Изменения свойств вещества под действием света происходят вследствие протекания в нем химических реакций, которые называются *фотохимическими реакциями*. Можно выделить два типа фотохимических реакций в веществе: это — реакции *синтеза*, когда под действием света из исходных молекул вещества образуются более сложные молекулы и реакции *разложения*, когда под действием света сложные молекулы вещества разлагаются на более простые.

Как правило, первичные фотохимические реакции сопровождаются вторичными химическими превращениями. Установлено, что масса вещества, участвующего в первичной фотохимической реакции, пропорциональна энергии световой волны, поглощенной веществом. Для каждой фотохимической реакции существует наименьшее значение частоты падающего излучения ν_0 , когда возможно протекание этой реакции. Это значение частоты носит название *красной границы*. Излучение, частота которого меньше красной границы, не может вызвать данную фотохимическую реакцию.

По квантовой теории атомы в молекулах удерживаются химическими связями. Как мы уже знаем, световое излучение — это поток фотонов. При взаимодействии с излучением молекула вещества может поглотить фотон, вследствие чего она получает дополнительную энергию $h\nu$. Если этой энергии хватает для разрыва химической связи ($\nu \geq \nu_0$), то фотохимическая реакция происходит, если нет ($\nu < \nu_0$), то реакция не происходит.

Фотохимические реакции играют большую роль в природе и во многих отраслях жизнедеятельности современного общества.

Фотосинтез. В природе в зеленых листьях растений и во многих микроорганизмах происходят важнейшие фотохимические реакции. Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Это происходит в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Корни растений извлекают из земли атомы элементов, необходимых для животных и людей. Эти атомы пристраиваются к углеродной цепочке, растения строят из них молекулы белков, жиров и углеводов — пищу для человека и животных. Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Итак, *фотосинтез — это процесс образования в растениях и некоторых микроорганизмах углеводов под действием света с выделением кислорода*. Он обеспечивает круговорот кислорода в природе и составляет энергетическую основу всего живого на Земле. Расщепление молекулы воды квантами солнечного излучения с образованием кислорода делает солнечный свет главным источником энергии биосферы.

Организмы, использующие солнечный свет для получения энергии, называются фототрофами. К ним относятся все зеленые растения (рис. 51.1, а) и некоторые бактерии, например, цианобактерии (рис. 51.1, б).



а)



б)

Рис. 51.1. Фототрофы:
а) растения; б) цианобактерии

Растения являются первичными производителями органических веществ и служат пищей для всех остальных организмов. Цианобактерии — это сине-зеленые водоросли, считаются древнейшими живыми организмами на Земле. Они породили фотосинтез на нашей планете и насытили земную атмосферу кислородом, дав начало всем остальным формам жизни. Источником свободного кислорода, выделяющегося в атмосферу, служит вода. Совокупность реакций, приводящих к разложению воды под действием света, носит название *фотолиза*. Таким образом, основой жизни на Земле являются солнечный свет и вода.

Фотография. Химическое действие света лежит в основе фотографии. Фотография в переводе с греческого означает светопись (*photos* — свет, *graph* — пишу). Изображение, полученное с помощью оптического прибора — фотоаппарата, формируется на фотопленке или фотопластинке. В качестве материалов для фотоснимков используются светочувствительные вещества, в которых под воздействием света происходят химические изменения. В качестве реагентов в фотографии применяются галоидные соли серебра: бромистое, хлористое и йодистое серебро. Наибольшее применение получило бромистое и хлористое серебро. Фотобумага имеет светочувствительный слой из мелких кристалликов бромида серебра AgBr . Под действием света электрон отрывается от иона брома и захватывается серебром. Ион серебра становится нейтральным, при этом происходит почернение фотобумаги на свету. Распад молекулы происходит по схеме: $\text{AgBr} + h\nu \rightarrow \text{Ag}^* + \text{Br}^+ + e^-$, где Ag^* — возбужденный атом серебра, Br^+ — положительный ион брома, e^- — электрон.

Классический способ получения фотоснимка состоит из следующих этапов:

1) *Негативный процесс.* После съёмки фотопластинку или пленку в специальных лабораторных условиях (полная темнота или красный свет) подвергают химической обработке: проявлению, ополаскиванию водой и фиксированию. Отфиксированные пластинки и пленки тщательно промывают и высушивают. Окончательным результатом является негатив. В негативном изображении, образованном зернами металлического серебра, относительное распределение яркостей при рассматривании в проходящем свете обратно яркостям деталей объекта снимка. Другими словами, в негативе темные детали объекта фотографирования получаются светлыми и наоборот. В цветных фото процессах изображение объекта съёмки формируется красителями, цвета которых дополнительны к цветам объекта съёмки. Например, синие предметы на цветном негативе выглядят желтыми, зеленые — пурпурными и т. д. На рисунке 51.2 представлены негативы и позитивы черно-белого и цветного изображения.

2) *Позитивный процесс.* Для получения фотографического снимка фотобумагу прикладывают к негативу и освещают источником света. После определенной выдержки лист фотобумаги в лабораторных условиях (оранжевый или красный свет) подвергают такой же химической обработке, как и фотопластинки: проявляют, споласкивают водой, фиксируют, промывают и высушивают. Фотопечать осуществляется двумя способами: контактным (прикладывание фотобумаги непосредственно к негативу) и проекционным (применяя проекционный аппарат — фотоувеличитель). Второй позволяет получать увеличенные (по сравнению с негативом) позитивные снимки.

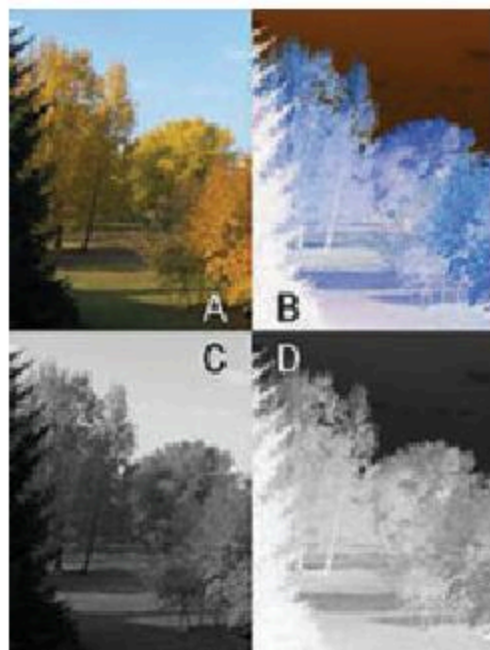


Рис. 51.2. Негативное и позитивное изображения

У химического действия света есть положительные и отрицательные стороны. Например, выцветание тканей на солнце относится к отрицательному эффекту химического действия света. А вот об образовании загара такой однозначный вывод сделать нельзя. В зависимости от степени воздействия солнечных лучей он может оказывать на организм человека как положительное, так и отрицательное воздействие.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Первая в мире фотография, сохранившаяся до наших дней, была сделана в 1826 году французским изобретателем Жозефом Ньепсу. Эту фотографию, которая представлена ниже, он назвал "Вид из окна".

А человека впервые запечатлел 1838 году другой французский изобретатель Луи Дагер. Первый фотоавторпортрет в мире, нечто вроде селфи, был сделан примерно осенью 1839 года известным американским фотографом Робертом Корнелиусом. После снятия крышки с фотообъектива, он бросился в кадр, где просидел больше минуты до закрытия линзы.



"Вид из окна" первая в мире Фотография
Фотограф Ж. Н. Ньепс

Таким образом, первый практический способ фотографирования был создан Жозефом Ньепсом. В качестве светочувствительного слоя он использовал раствор асфальта в лавандовом масле, наносимого на оловянную, медную или посеребренную пластинки. Этот способ называется дагеротипия. Дело в том, что процесс получения дагеротипа — изображения на светочувствительной металлической пластинке был представлен Французской академии наук 9 августа 1839 года французским художником и изобретателем Луи Дагером и именно благодаря ему этот способ получения фотографического изображения стал известен во всем мире.

Первую цветную фотографию, на которой запечатлена трехцветная лента, завязанная в бант, представил Максвелл в 1861 году на лекции в Королевском институте в Лондоне. В 1981 году компанией Sony была изобретена цифровая камера, что позволило делать цифровые фотографии и отказаться от традиционной фотопленки. Но надо отметить, что многие профессиональные фотографы по сей день предпочитают использовать в своей работе традиционные фотопленки.



1. Какие реакции называются фотохимическими?
2. Что называется красной границей фотохимической реакции?
3. Расскажите о процессах фотосинтеза
4. Что вы знаете о фототровах? Приведите примеры
5. Как получается изображение на фотопластинке или фотопленке?
6. Чем негативное изображение отличается от позитивного?



Соберите информацию и напишите реферат на тему: "Загар — польза и вред". Обсудите тему и сделайте выводы.

§ 52. Рентгеновское излучение



Ключевые понятия:

- ✓ рентгеновские лучи
- ✓ рентгеновская трубка
- ✓ тормозное рентгеновское излучение
- ✓ характеристическое рентгеновское излучение

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными характеристиками и применениями рентгеновского излучения.



Это вы знаете

Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. В. Рентгеном. Они представляют собой электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны порядка ($10^{-12} + 10^{-9}$ м), которое возникает при торможении быстрых электронов в веществе.

Тормозное рентгеновское излучение. Для получения рентгеновских лучей используют так называемые *рентгеновские трубки*. Она представляет собой вакуумный баллон с несколькими электродами

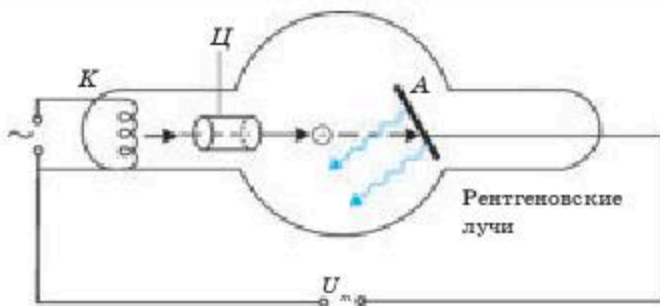


Рис. 52.1. Схематическое изображение рентгеновской трубки

(рис. 52.1). Нагреваемый катод K служит источником термоэлектронов, цилиндрический электрод $Ц$ фокусирует электроны, которые ускоряются высоким напряжением, создаваемым между катодом и анодом (антикатодом) A . Антикатоде изготавливают из тяжелых металлов (W , Cu , Pt и т. д.).

Ускоренные электроны, ударяясь об антикатод, испытывают сильное торможение. При этом возникает электромагнитное излучение, которое называется *тормозным рентгеновским излучением*. Надо отметить, что при торможении почти вся энергия электронов превращается в тепло, и лишь 1—3% энергии превращается в излучение, поэтому антикатод необходимо интенсивно охлаждать.

Возникновение рентгеновского излучения может быть описано в рамках классической электромагнитной теории, согласно которой заряженная частица при движении с ускорением излучает. В данном случае электрон при торможении в веществе антикатада получает отрицательное ускорение, следовательно, он должен излучать.

Мощность излучения пропорциональна квадрату заряда электрона и квадрату его ускорения: $p \sim e^2 a^2$. Причем, согласно классической теории, при торможении электрона должны возникать волны всех длин: от нуля до бесконечности.

Длина волны, на которую приходится максимум интенсивности рентгеновского излучения, должна уменьшаться с увеличением скорости электронов, а значит, ускоряющего напряжения U .

На рисунке 52.2 представлены экспериментальные кривые зависимости интенсивности излучения от длины волны. Как видно из рисунка, эти зависимости в основном укладываются в рамки классической теории, за исключением одного: кривые не начинаются с нуля, а обрываются при конечных значениях длины волны λ_{\min} . Эта длина волны называется *коротковолновой границей тормозного рентгеновского излучения*.



Вильгельм Рентген
(1845—1923)

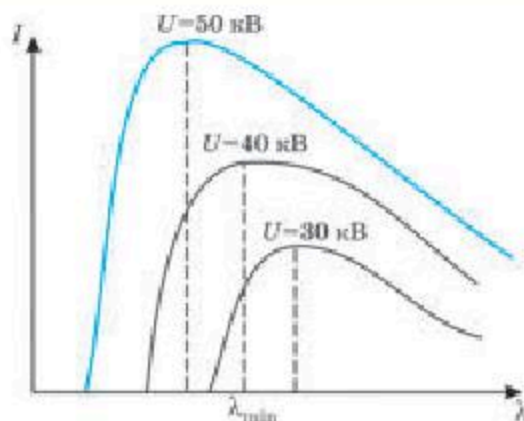


Рис. 52.2. Спектр тормозного рентгеновского излучения

Существование коротковолновой границы тормозного рентгеновского излучения объясняется довольно просто квантовой теорией. Если при торможении электрона излучение возникает в виде квантов энергии, то максимальная энергия каждого такого кванта (фотона) не может быть больше энергии самого электрона. Тогда $h\nu_{\max} = eU$, отсюда

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}; \quad \lambda_{\min} = \frac{ch}{e} \cdot \frac{1}{U}.$$

Данный результат хорошо согласуется с экспериментом. Экспериментально определив λ_{\min} , из выше приведенной формулы можно определить постоянную Планка h . Этот метод является одним из самых точных.

При достаточно больших энергиях электронов возникает так называемое *характеристическое рентгеновское излучение*, которое имеет линейчатый спектр. Этот тип рентгеновских лучей характеризует вещество антикатада.

Применения рентгеновского излучения. Рентгеновские лучи широко применяются в самых различных областях жизнедеятельности современного общества. Так как длина волны рентгеновских лучей очень мала (от 10^{-12} до 10^{-9} м), для них дифракционной решеткой может служить кристаллы твердых тел. Исследуя полученную дифракционную картину, можно изучать структуру вещества. Этот метод применяется в рентгеновском структурном анализе, рентгенографии материалов, рентгеновской топографии и т. д.

Компьютерная томография. Вам хорошо известно применение рентгеновского излучения в медицине для диагностики и лечения различных заболеваний. Одним из последних достижений применения рентгеновского излучения в медицине является *компьютерная томография*.

Принцип работы рентгеновского компьютерного томографа (рис. 52.3) основан на просвечивании исследуемой области тела тонким пучком



Рис. 52.3. Рентгеновский компьютерный томограф

рентгеновских лучей и их регистрации с противоположной стороны. При прохождении через тело рентгеновские лучи поглощаются в разной степени различными тканями, эти лучи затем считываются компьютером. Компьютер обрабатывает снимки в очень качественное объемное изображение, в котором можно увидеть в подробностях локализацию, протяженность и характер очагов заболеваний.

Рентгеновская компьютерная томография позволяет оценить коэффициент ослабления излучения в пределах 0,5%, тогда как в обычной рентгенографии это значение составляет 10—20%, т. е. чувствительность данного метода очень высока. Кроме того, компьютерный томограф дает послойное изображение, здесь нет наложения органов и тканей.

В отличие от обычной флюорографии, на которой лучше всего видны кости и легкие, на компьютерной томографии отлично видны и мягкие ткани (мозг, печень и т. д.), что дает возможность диагностировать болезни на ранних стадиях. Компьютерная томография успешно используется и в стоматологии для исследования и точной диагностики зубных рядов и отделов челюстно-лицевой области.

Последнее достижение рентгеновской компьютерной томографии — это спиральная компьютерная томография (СКТ) (ангиография). При спиральной компьютерной томографии сканируется весь объект при однократной задержке дыхания, поэтому резко снижается лучевая нагрузка на пациента. Новым видом СКТ является МСКТ — мульти-спиральный компьютерный томограф, который позволяет проводить исследования с высокой скоростью и большим пространственным разрешением мелких и движущихся структур, таких как коронарные артерии.

Магниторезонансная томография (МРТ). Еще одно современное достижение медицины — магниторезонансные томографы, с помощью которых можно получить послойные изображения обследуемого органа.

В основе принципа работы прибора лежит явление ядерного магнитного резонанса. В магнитно-резонансном томографе создается магнитное поле и испускаются радиоволны определенной частоты. На такое воздействие реагируют атомные ядра водорода, которые имеются в организме человека. Область тела, где расположен обследуемый орган, окружается датчиками, которые будут в процессе исследования улавливать происходящие изменения и передавать их к процессору прибора для обработки.

Магнитно-резонансный томограф позволяет поддерживать стабильное магнитное поле в теле пациента во время его обследования. Аппарат производит: стимуляцию организма при помощи радиоволн; регистрацию электромагнитных излучений организма; обработку полученного сигнала и преобразование его в изображение.

Магнитно-резонансным томографом можно получать изображения просвета сосудов (магнитно-резонансная ангиография), оценивать анатомические и функциональные особенности кровотока в сосудах пациента, проводить исследования пояснично-крестцового отдела позвоночника и многое другое.

Полученная в магнитно-резонансном томографе картинка не является фотографическим снимком обследуемого отдела или органа. Специалист получает высококачественное детализированное отображение радиосигналов, испускаемых телом пациента. МРТ диагностика полностью превосходит метод компьютерной томографии, поскольку в данном случае при проведении процедуры не применяется ионизирующее излучение, а используются безопасные для человеческого организма электромагнитные волны.



1. Что представляет собой рентгеновское излучение?
- *2. Объясните принцип работы рентгеновской трубки.
- *3. Что такое коротковолновая граница тормозного рентгеновского излучения?
- *4. Объясните принцип работы рентгеновского компьютерного томографа
- *5. Расскажите о методе МРТ обследования.

§ 53. Единство корпускулярно-волновой природы света



Ключевые понятия:

- ✓ корпускула
- ✓ двойственность свойств электромагнитного излучения
- ✓ флуктуации

На этом уроке вы:

- познакомитесь с двойственной природой электромагнитного излучения.



Волновая природа света. Вопрос о том, что представляет собой свет, занимал умы ученых со времен античности. До XIX века свет рассматривался как поток быстро движущихся частиц-корпускул. Сторонником этой точки зрения был и И. Ньютон. Однако в XIX в. были открыты такие явления, как интерференция, дифракция света и т. д., в которых ярко проявляются его волновые свойства. После работ Юнга и Френеля подводится твердая экспериментальная основа под волновую теорию света, и из двух альтернативных теорий — корпускулярной и волновой — господствующей становится волновая. И наконец, результаты работ Максвелла приводят к окончательному выводу, что *свет — это электромагнитная волна*. Ярким экспериментальным доказательством волновой природы света служат такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света, с которыми вы познакомились в предыдущих главах.

Корпускулярная природа света. Однако открытие и изучение закономерностей новых явлений, таких как тепловое излучение, фотоэффект, закономерности линейчатых спектров, показало, что свет распространяется в виде потока частиц — фотонов. Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия излучения были подтверждены в ряде опытов.

Опыт Боте. Если свет представляет собой поток фотонов, взаимодействующих с регистрирующим прибором независимо друг от друга, то при регистрации очень слабых световых потоков должны наблюдаться заметные *флуктуации* (от лат. *fluctuatio* — “колебание”) их интенсивностей.

Такие флуктуации обуславливаются случайными отклонениями от среднего значения числа фотонов N , попадающих в прибор за секунду. Когда число N велико, флуктуации столь малы, что незаметны, а при малых N их можно обнаружить. Одним из первых такой опыт по наблюдению флуктуаций поставил в 1924 году немецкий физик В. Боте.

В опыте тонкая металлическая фольга Φ помещалась между двумя газоразрядными счетчиками C (рис. 53.1). Фольга сбоку освещается слабым узким пучком жесткого рентгеновского излучения. Под воздействием облучения фольга начинает сама испускать рентгеновские лучи

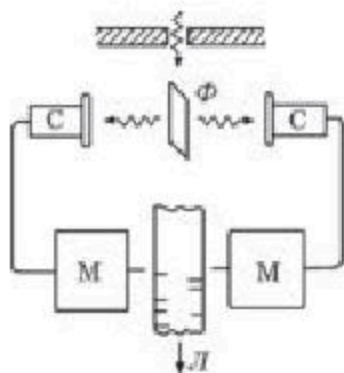


Рис. 53.1. Опыт Боте

(рентгеновская флуоресценция), интенсивность которых очень мала, т. е. число фотонов, испускаемых ею в единицу времени, весьма невелико. При попадании рентгеновских лучей счетчики срабатывают и приводят в действие специальные механизмы M , делающие отметки на равномерно движущейся ленте L . Если бы излучение распространялось в виде волны непрерывно и равномерно во все стороны, отметки по обе стороны ленты были бы одинаковы и расположились бы одна против другой. А на опыте отметки оказались расположенными

совершенно беспорядочно. Это можно объяснить только тем, что из фольги вылетают отдельные фотоны независимо друг от друга то в одном, то в другом направлении.

Опыты Вавилова. В этих опытах визуально наблюдали периодически повторяющиеся вспышки слабого источника, средняя интенсивность которого совпадала с порогом зрительного ощущения наблюдателя.

Опыт основывался на том, что после достаточно длительного пребывания в темноте, человеческий глаз зрительно может воспринимать свет, только если его интенсивность выше некоторого порогового значения. Например, при длине волны 500 нм этот порог соответствует падению на глаз от 200 до 400 фотонов в секунду. Из периодически повторяющихся вспышек наблюдатель смог увидеть только часть, что доказывает наличие флуктуации интенсивности света: он видел только те вспышки, интенсивность которых (число фотонов в секунду) выше порогового значения.

Есть и другие опыты, убедительно доказывающие прерывистую, квантовую природу света.

Единство корпускулярно-волновой природы света. Таким образом, в начале 20-го века опять возникает вопрос: что же такое свет — волна или частица? Ученые-физики постепенно приходят к выводу об ошибочности такой постановки вопроса. *Свет одновременно обладает свойствами непрерывного электромагнитного излучения и свойствами дискретных фотонов.*

Первым эту двойственность свойств света понял А. Эйнштейн при изучении флуктуаций энергии абсолютно черного тела и флуктуаций светового давления. Он вывел формулы для вычисления этих величин, которые представляют собой сумму двух членов. Причем, один из них — “квантовый член” — соответствует представлению о свете как о потоке фотонов, а другой — “волновой член” — описывает флуктуации в распространяющейся электромагнитной волне. При больших частотах основной вклад дает “квантовый член”, при малых частотах — “волно-

вой”. Проанализировав закономерности известных оптических явлений, можно прийти к выводу, что с уменьшением длины волны (увеличением частоты) все более проявляются квантовые свойства света и наоборот. Двойственность корпускулярно-волновых свойств света и их взаимосвязь становится понятной, если применить к процессу распространения света статистический подход. По квантовым представлениям свет — это поток фотонов, в которых локализованы энергия, импульс и масса излучения. Взаимодействие фотонов с веществом при прохождении света через какую-нибудь оптическую систему (например, дифракционную решетку) приводит к перераспределению фотонов в пространстве. В результате на экране возникает дифракционная картина. Освещенность E экрана в данной точке пропорциональна суммарной энергии всех фотонов, а значит, числу фотонов n_0 , попавших в эту точку за единицу времени. Другими словами, величины E и n_0 пропорциональны вероятности попадания фотонов в рассматриваемую точку экрана. С волновой точки зрения освещенность пропорциональна интенсивности I , которая, в свою очередь, пропорциональна квадрату амплитуды волны A^2 , т. е. $E \sim A^2$. Сопоставляя два подхода, приходим к выводу: *квадрат амплитуды световой волны в какой-либо точке пространства определяет вероятность попадания фотонов в эту точку.*

Таким образом, корпускулярные и волновые свойства света не исключают друг друга, а взаимно дополняют. Корпускулярные свойства обусловлены тем, что энергия, импульс и масса излучения локализованы в дискретных частицах — фотонах, а волновые свойства обусловлены статистическими закономерностями распределения фотонов в пространстве. Эксперименты по дифракции дают основание считать, что волновые свойства присущи не только потоку фотонов, а также и каждому отдельному фотону. Это проявляется в том, что для фотона нельзя точно узнать, в какую именно точку экрана он попадает после прохождения дифракционной решетки. Можно определять лишь вероятности попадания каждого фотона в ту или иную точку экрана. Из сказанного ясно, что фотоны по своим свойствам в корне отличаются от световых корпускул Ньютона, которым приписывались свойства классических частиц.



1. Расскажите о развитии учения о природе света.
2. В каких явлениях подтверждается волновая природа света? Расскажите о них.
3. В каких явлениях проявляются квантовые свойства излучения?
- *4. Расскажите об опыте Боте.
- *5. Опишите опыт Вавилова.
- *6. Обоснуйте единство корпускулярно-волновых свойств света.
- *7. Почему по квантовой теории должны наблюдаться флуктуации при очень малой интенсивности света?

§ 54. Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Постулаты Бора. Опыты Франка и Герца



Ключевые понятия:

- ✓ планетарная модель атома
- ✓ альфа – частицы
- ✓ сцинтилляция
- ✓ ядро атома
- ✓ стационарная орбита
- ✓ основное состояние атома
- ✓ возбужденное состояние атома
- ✓ энергетические уровни

На этом уроке вы:

- познакомитесь с опытами Резерфорда по рассеянию альфа-частиц и с планетарной моделью атома, с постулатами Бора, с опытами Франка и Герца.



Это вы знаете

Слово атом означает "неделимый". Атомистический взгляд на состав вещества возникла еще в античные времена. Но как атомистическая теория вещества она получила развитие только в 18 веке. Свое первоначальное значение слово "атом" сохраняло до конца XIX в.

Новые открытия в конце XIX-го — начале XX-го столетия поставили вопрос о строении атома. В числе таких открытий можно назвать периодическую таблицу Менделеева, опыты Фарадея по электролизу, измерение Милликеном заряда электрона, явления термоэлектронной эмиссии, фотоэффекта. Эксперименты по изучению этих и других новых открытых явлений указывали на то, что в состав атома должны входить отрицательно заряженные частицы. Тогда внутри атома должны быть и положительные заряды. Таким образом, встал вопрос: Как устроен атом?

Первая модель атома была предложена Дж. Томсоном. Согласно этой модели, атом представляет собой положительно заряженный шар радиусом $\sim 10^{-10}$ м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов компенсирует непрерывно распределенный по всему шару положительный заряд, и атом в целом является нейтральным. Последующие исследования показали ошибочность этой модели, и сейчас она представляет лишь исторический интерес.

Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Для выяснения распределения электрических зарядов внутри атома в 1911 г. Э. Резерфорд со своими учениками Г. Гейгером и Э. Марсденом провели ряд опытов



Эрнест Резерфорд
(1871—1937)

по рассеянию α -частиц очень тонкой золотой фольгой. В результате анализа этих знаменитых экспериментов была создана *ядерная*, или, как говорят, *планетарная модель атома*.

Резерфорд бомбардировал тонкую золотую фольгу Φ (толщина $l = 6 \cdot 10^{-7}$ м) быстрыми альфа-частицами энергии 7,68 МэВ, источником которых служил ${}^{214}_{84}\text{Po}$ помещенный на дно свинцового контейнера Π (рис. 54.1). Узкий пучок альфа-частиц, проходя через фольгу, испытывает рассеяние, т. е. отклоняется от первоначального направления. В то время было известно, что альфа-частицы — это ионы атома гелия с положительным зарядом $2e$.

Исследовав распределение рассеянных фольгой альфа-частиц по углам, можно определить структуру атомов мишеней, вызвавших это рассеяние.

Очень малая толщина фольги позволяла считать, что одна альфа-частица при прохождении через фольгу взаимодействует только с одним атомом, т. е. испытывает однократное рассеяние. Проходя через фольгу, альфа-частицы попадают на экран \mathcal{E} , покрытый сернистым цинком (ZnS).

Молекулы сернистого цинка обладают свойством излучать при соударении с альфа-частицами. Поэтому в тех местах на экране, куда попадают альфа-частицы, наблюдаются *слабые вспышки света* — *сцинтилляции*. Цель опыта заключается в подсчете числа сцинтилляций за определенный промежуток времени в зависимости от угла рассеяния φ .

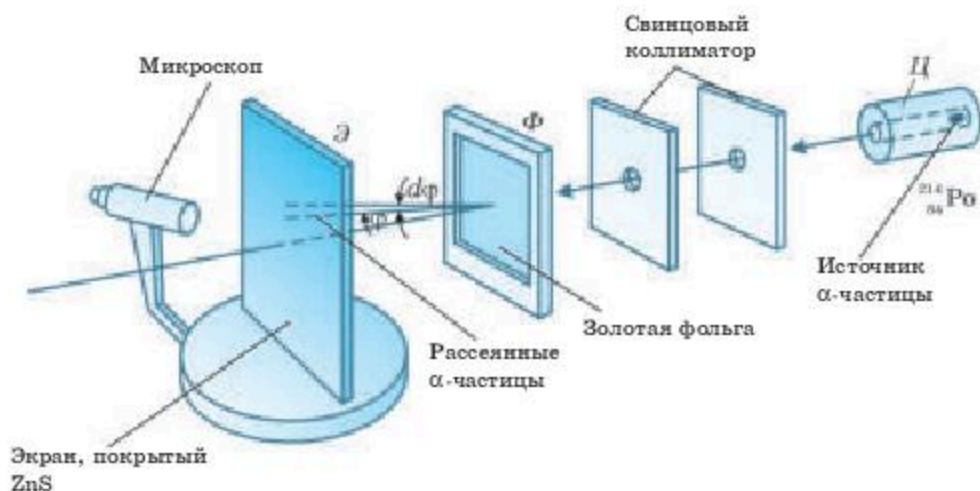


Рис. 54.1. Схема опыта Резерфорда

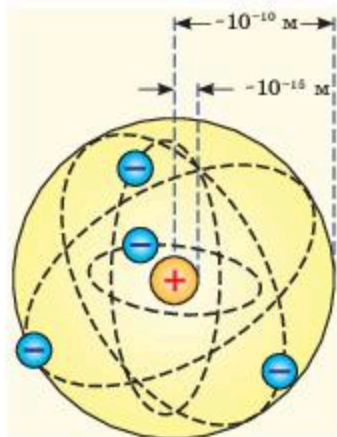


Рис. 54.2. Модель атома Резерфорда

Было обнаружено, что большинство альфа-частиц проходит через фольгу, почти не отклоняясь от первоначального направления, в пределах углов $\varphi = 1-2^\circ$, что в общем совпадало с результатами расчетов, выполненных на основе модели Томсона. Удивительным было другое: очень незначительная часть альфа-частиц при этом испытывала рассеяние на углы более 90° , т. е. они летели практически в обратном направлении. Причем надо подчеркнуть еще раз, что на такие большие углы рассеивалась лишь ничтожно малая часть из всех падающих на фольгу альфа-частиц. Эксперимент показал, что приблизительно лишь одна из 8 тысяч частиц отклоняется на угол $\varphi > 90^\circ$. Этот резуль-

тат никак не укладывался в расчеты, выполненные на основе модели Томсона. Анализируя результаты эксперимента, Резерфорд предлагает свою модель, согласно которой *положительный заряд сосредоточен в центре атома в очень малом объеме, радиус которого приблизительно равен $\approx 10^{-15}$ м (рис. 54.2)*.

Надо понимать, что на рисунке 54.2 масштаб не сохранен, на самом деле соотношение $\frac{R_{я}}{R_a} \approx 100000$. Центр этот Резерфорд назвал *ядром*. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Ядро окружено вращающимися вокруг него по разным орбитам электронами. Радиус орбиты самого отдаленного от ядра электрона определяет радиус атома $R_{ат} \sim 10^{-10}$ м. По такой модели строение атома похоже на Солнечную систему, где вокруг Солнца вращаются планеты. Поэтому ее еще называют *планетарной моделью атома*. Получается, что большая часть пространства в атоме является “пустой”. Отрицательный суммарный заряд электронов в орбите равен положительному заряду ядра, и атом в целом нейтрален.

Итак, по Резерфорду, радиус ядра примерно в 100 тысяч раз меньше радиуса атома. Поэтому подавляющее большинство альфа-частиц проходит далеко от ядер и не рассеивается. Электроны практически не могут повлиять на траекторию альфа-частицы, так как примерно в 8 тысяч раз легче, чем она. И только те альфа-частицы, которые подходят очень близко к ядру, испытывая “лобовое соударение”, летят почти обратно. Число таких альфа-частиц определяется отношением радиуса атома к радиусу ядра, следовательно, ничтожно мало.

Мы провели только качественный анализ результатов экспериментов. Сам же Резерфорд выполнил расчеты, исходя из модели Томсона и сво-

ей. Результаты расчетов подтвердили правильность модели Резерфорда. Однако по классическим представлениям такой атом просто не может существовать. Как уже упоминалось, заряженная частица, двигаясь с ускорением, должна излучать электромагнитные волны. Частота этого излучения должна быть равна частоте обращения электрона вокруг ядра. Электрон вращается вокруг ядра по круговой орбите, значит, он движется с центростремительным ускорением, следовательно, излучает и теряет энергию. Уменьшение энергии (орбитальной скорости) приводит к постепенному приближению электрона к ядру вследствие кулоновского притяжения и падению на него. По расчетам, на это потребуется всего около 10^{-8} с. Кроме того, по классической теории спектр излучения атома должен быть непрерывным, тогда как на самом деле он является линейчатым.

Оказалось, что законы классической физики здесь просто неприменимы. Более того, постепенно мы убедимся в том, что, строго говоря, планетарная модель атома в вышеизложенной форме является только его механической моделью.

Постулаты Бора. Таким образом, ядерная модель атома, с одной стороны хорошо согласуется с результатами опытов по рассеянию α -частиц, с другой стороны такой атом не может быть устойчива с точки зрения классической электродинамики. На самом деле атомы являются весьма стабильными прочными образованиями. Получается, теоретические выводы классической электродинамики противоречат опыту. Выход из создавшегося положения предложил датский физик Н. Бор. В 1913 г. он выдвинул свои знаменитые постулаты.

Первый постулат Бора. В атоме существуют такие стационарные орбиты, двигаясь по которым электрон не излучает.

Второй постулат Бора. При переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией E_n на другую стационарную орбиту с энергией E_m излучается или поглощается квант энергии:

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (54.1)$$

Другими словами, атом может находиться только в некоторых стационарных состояниях, в которых он не излучает, поэтому такие состояния устойчивы.

Каждому стационарному состоянию соответствует определенное значение энергии. Следовательно, энергия атома не может меняться непрерывно, а возможен только ряд дискретных значений энергии. В классической физике таких ограничений нет, энергия системы может меняться непрерывно.



Нильс Бор
(1885—1962)

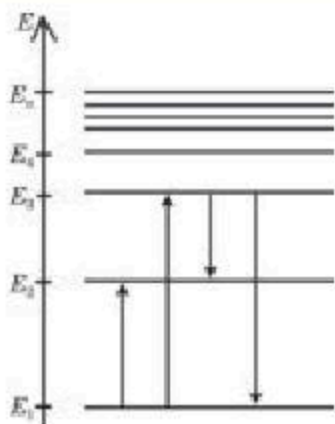


Рис. 54.3. Энергетическая диаграмма атома

Для наглядного представления энергетических состояний атомов используют *энергетические диаграммы* (рис. 54.3). В такой диаграмме каждое стационарное состояние атома изображается горизонтальной линией, называемой *энергетическим уровнем*. Уровни энергий располагаются снизу вверх, т. е. уровень с минимальной энергией расположен ниже всех остальных. Состояние атома с минимальной энергией называется *основным* (E_1 на рис. 54.3). Все остальные состояния атома называются *возбужденными* (E_2 , E_3 и т. д. на рис. 54.3). Расстояния между энергетическими уровнями пропорциональны разности энергий, соответствующих этим уровням. Все состояния от $n = 1$ до $n = \infty$ являются связанными и имеют отрицательные значения энергии ($E < 0$). С ростом n расстояния между энергетическими состояниями уменьшаются все больше.

При $n = \infty$ энергетические уровни сливаются, энергия электрона в атоме равна нулю ($E = 0$), и электрон становится свободным.

Атом, находящийся в возбужденном состоянии, самопроизвольно переходит в основное, или возбужденное, состояние с меньшей энергией, а оттуда — в основное состояние. При этом, разумеется, атом излучает (согласно постулату 2). Таким образом, атом может находиться сколько угодно долго только в основном состоянии.

Опыт Франка и Герца. Одним из первых экспериментальных подтверждений существования дискретных энергетических уровней атома был опыт Франка и Герца, осуществленный в 1913 г (рис. 54.4).

Внутри трубки, заполненной парами ртути при низком давлении, приблизительно равном 1 мм рт. ст., помещают три электрода: катод K , сетка C и анод A . Из катода при нагревании вылетают электроны, которые

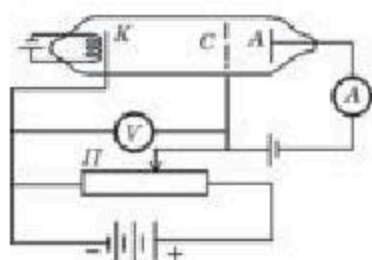


Рис. 54.4. Схема опыта Франка и Герца

движутся в направлении анода под действием разности потенциалов U , приложенных между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно менять с помощью потенциометра Π . Между сеткой и анодом приложено небольшое тормозящее напряжение, равное $U_T = 0,5$ В.

В опыте исследовали зависимость силы анодного тока от напряжения между катодом и сеткой. Результаты представлены на

рисунке 54.5. Из графика видно, что сила тока с увеличением напряжения монотонно растет, достигает максимума при $U_1 = 4,9$ В и резко падает. Затем достигает минимума и опять начинает расти. Второй максимум силы тока достигается при $U_2 = 9,8$ В.

Результаты опыта можно объяснить, исходя из дискретности энергетических состояний атомов ртути. В таком случае атом ртути при столкновении с электроном, движущимся в сторону анода, может воспринимать или терять энергию только порциями, равными разности энергий стационарных состояний: $\Delta E_1 = E_2 - E_1$, либо $\Delta E_2 = E_3 - E_1$ и т. д., так как может находиться только в состояниях с энергиями E_1, E_2, E_3, \dots .

Электрон, вылетающий из катода, ускоряясь, к моменту столкновения с атомами может иметь энергию $\frac{m_e v^2}{2} = eU$, где U — ускоряющая разность потенциалов между катодом и сеткой. До тех пор, пока энергия электрона меньше, чем энергия возбуждения атома ртути (т. е. меньше энергии ΔE , необходимой для того, чтобы перевести атом ртути из основного в первое возбужденное состояние), столкновения упругие. Электрон при упругом столкновении энергию не теряет и поэтому, проскочив через сетку, достигает анода. Часть электронов, не преодолевших тормозящее напряжение между сеткой и анодом, остаются на сетке. Чем больше напряжение, тем больше доля электронов, достигающих анода, следовательно, тем больше анодный ток. Когда энергия электрона в момент столкновения достигнет значения $\frac{m_e v^2}{2} = eU_1 = \Delta E_1$, он целиком отдает эту энергию атому ртути и уже не сможет преодолеть тормозящее поле между сеткой и анодом. Для атома ртути первый потенциал возбуждения равен $U_1 = 4,9$ В, т. е. $\Delta E_1 = 4,9$ эВ. Допустим, у какого-нибудь электрона в момент столкновения энергия равна 5,3 эВ. Тогда после столкновения его энергия будет равна $5,3 - 4,9 = 0,4$ эВ, а задерживающее напряжение 0,5 В. Этот электрон также не достигнет анода. Таким образом, при напряжении между катодом и сеткой равном $U_1 = 4,9$ В анодный ток резко уменьшается.

Атомы, получившие в результате неупругого соударения энергию ΔE_1 , переходят в первое возбужденное состояние. Приблизительно через 10^{-8} с они самопроизвольно перейдут в основное состояние, испустив фотон с частотой $\nu = \frac{\Delta E_1}{h} = 1,2 \cdot 10^{15}$ Гц.

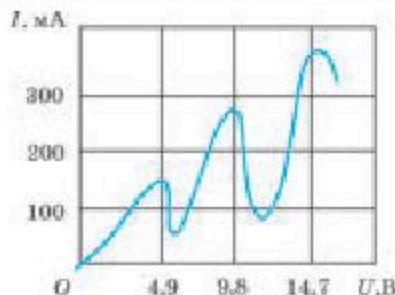


Рис. 54.5. Вольт-амперная характеристика опыта Франка и Герца

Опыт показывает, что пока $U < 4,9$ В, пары ртути в трубке не излучают. А при достижении напряжения $U_1 = 4,9$ В испускают ультрафиолетовое излучение с частотой $\nu = 1,2 \cdot 10^{15}$ Гц, что также указывает на правильность приведенного истолкования результатов опыта.

С дальнейшим ростом напряжения опять возрастает число электронов, энергия которых даже после неупругого столкновения с атомом ртути достаточна для достижения анода. Анодный ток опять растет. При напряжении $U_2 = 9,8$ В электроны могут испытать неупругое соударение дважды, вследствие чего анодный ток опять резко уменьшается. Но доля таких электронов относительно небольшая, поэтому второй провал на графике меньше первого.

Таким образом, в опыте Франка и Герца непосредственно обнаруживается существование у атомов дискретного ряда энергетических уровней. Следует помнить, что описанные выше процессы происходят с определенной вероятностью.



1. Опишите модель атома Томсона.
2. Объясните опыт Резерфорда.
3. Как устроен атом по ядерной модели?
- *4. Почему с классической точки зрения ядерная модель атома неустойчива?
5. Сформулируйте постулаты Бора.
6. Какие состояния атома называются стационарными?
- *7. Что такое энергетическая диаграмма?
8. Какое из стационарных состояний атома называется основным? Почему?
- *9. Дайте подробное описание опыта Франка и Герца.
- *10. Как можно объяснить результаты опыта?
- *11. Почему атомы ртути могут поглощать энергию только определенных значений?

§ 55. Лазеры. Понятия о нелинейной оптике



Ключевые понятия:

- ✓ лазер
- ✓ оптический квантовый генератор
- ✓ спонтанное излучение
- ✓ вынужденное излучение
- ✓ инверсная заселенность уровней
- ✓ накачка
- ✓ метастабильные состояния
- ✓ нелинейная оптика

На этом уроке вы:



- познакомитесь с устройством и принципом действия лазеров, понятием о нелинейной оптике и перспективами развития голографии.

Лазеры. Создание принципиально новых источников излучения — *лазеров* можно отнести к одному из самых важных достижений физики XX в. Слово *лазер* происходит от первых букв английского выражения “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” — “Усиление света с помощью индуцированного излучения”.

В 1953 г. советскими учеными Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым, американским физиком Ч. Таунсом и немецким физиком В. Вебером было предложено использование вынужденного (индуцированного) излучения для усиления электромагнитных волн в сантиметровом диапазоне. Соответствующие приборы были названы *мазерами*. За эти работы Басову, Прохорову и Таунсу в 1964 г. была присуждена Нобелевская премия. Первый аналогичный прибор, работающий в оптическом диапазоне, — *лазер* (оптический квантовый генератор) — был создан в США в 1960 году Н. Н. Мейманом. Оба типа устройств работают на основе эффекта вынужденного излучения. Рассмотрим это явление.

Это вы знаете

Атомы могут находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии E_1, E_2, E_3, \dots , которым сопоставляются уровни энергий. Состояние, соответствующее минимальному значению энергии E_1 , называется основным, остальные — возбужденными.

Возможны следующие процессы.

1. Атом, находящийся в состоянии с энергией E_n под действием внешнего излучения $E = h\nu$, может перейти в состояние с энергией E_m ($E_m > E_n$), если $h\nu = E_m - E_n$. При этом энергия излучения поглощается.

2. Атом, находящийся в возбужденном состоянии E_m , через некоторое время ($t \approx 10^{-8}$ с) самопроизвольно переходит в более низкое энергетическое состояние E_n . При этом испускается фотон с энергией $h\nu = E_m - E_n$. Такое излучение называется *спонтанным* (самопроизвольным).

3. В 1916 году в работе, посвященной излучению абсолютно черного тела, А. Эйнштейн показал, что помимо поглощения и спонтанного излучения существует третий, качественно иной тип излучения. А именно, если на атом, находящийся в возбужденном состоянии E_m , действует внешнее излучение с энергией $h\nu = E_m - E_n$, то возникает вынужденный (индуцированный) переход в состояние с энергией E_n с излучением фотона той же энергии $h\nu = E_m - E_n$. Таким образом, первичный фотон переводит атом из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией, при этом испускается вторичный фотон. Причем второй фотон является точной копией первого — с той же частотой, фазой и направлением движения. Другими словами, *вынужденное излучение тождественно вынуждающему, они строго когерентны*.

Испущенные фотоны, двигаясь в одном направлении, действуют на другие возбужденные атомы, опять происходит индуцированное излучение, вследствие чего число фотонов растет лавинообразно (рис. 55.1). Однако нельзя забывать, что наряду с вынужденным излучением происходит и поглощение фотонов, что приводит к переходу атома из невозбужденного состояния с энергией E_n в состояние возбужденное с энергией E_m . Поэтому усиливается или, наоборот, ослабляется первичное излучение, зависит от того, какой процесс преобладает. А вероятность перехода из одного состояния в другое пропорциональна *заселенности* этих состояний, т. е. зависит от того, в каком состоянии находится преобладающее количество атомов.

Можно показать, что в случае термодинамического равновесия количество атомов в данном энергетическом состоянии уменьшается с увеличением энергии. Другими словами, если $E_m > E_n$, то $N_m < N_n$, где N_m и N_n — количество атомов на уровнях m и n соответственно. Поэтому обычно в состоянии термодинамического равновесия поглощение световой волны атомами среды будет преобладать над излучением, и падающая волна будет ослабляться.

Для того чтобы получить усиление падающей волны, необходимо каким-нибудь способом увеличить заселенность возбужденного уровня так, чтобы при $E_m > E_n$ было $N_m > N_n$. Такие неравновесные состояния

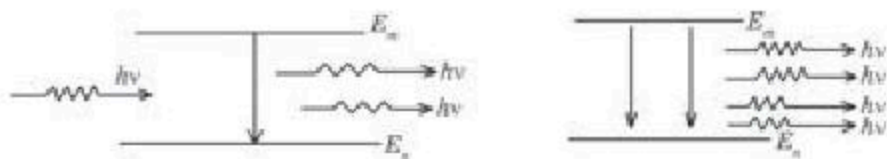


Рис. 55.1. Возникновение индуцированного излучения

называются *состояниями с инверсной заселенностью уровней*. В таком состоянии в веществе количество возбужденных атомов больше, чем невозбужденных, и вынужденное излучение может преобладать над поглощением света атомами. В результате при прохождении через вещество с инверсной заселенностью энергетических уровней пучок света будет усиливаться. Такое вещество называется *активной средой*.

Процесс перехода вещества в состояние с инверсной заселенностью энергетических уровней называется *накачкой*. В возбужденном состоянии атомы находятся примерно 10^{-8} с, потом самопроизвольно переходят в основное, или в возбужденное состояние с меньшей энергией, испустив фотон. Чем больше количество атомов в возбужденном состоянии, тем больше вероятность таких переходов. Отсюда следует, что создание состояния с инверсной заселенностью с использованием только двух уровней — возбужденного и основного, задача практически невыполнимая.

Создание лазера стало возможным благодаря тому, что атомы некоторых веществ имеют так называемые *метастабильные состояния*. Энергия метастабильного состояния больше, чем основного, т. е. это тоже возбужденное состояние. Однако в таком состоянии атом может находиться достаточно длительное время, порядка 10^{-4} с. Это и позволяет перевести вещество в состояние с инверсной заселенностью, когда количество атомов в метастабильном состоянии больше, чем в основном. Практически в лазерах используется трехуровневая система: *возбужденный, метастабильный и основной энергетические уровни*.

В лазере, созданном Н. Н. Мейманом, в качестве рабочего тела (активной среды) используется рубиновый цилиндр. Рубин представляет собой окись алюминия Al_2O_3 с примесью окиси хрома Cr_2O_3 в количестве от 0,03 до 0,05%. В кристаллической решетке Al_2O_3 некоторая часть атомов Al заменена ионами хрома Cr^{+++} . Ионы хрома имеют три энергетических уровня (рис. 55.2): основной уровень (1), широкая полоса возбужденных, очень близко расположенных уровней (3) и метастабильный уровень (2).

В лазере рубин освещается мощной импульсной ксеноновой лампой (накачка), которая преимущественно дает зеленый свет ($\lambda \approx 560$ нм). Ионы хрома при поглощении света переходят в возбужденное состояние (3). Вероятность перехода $3 \rightarrow 1$ очень мала, поэтому большинство ионов переходят на метастабильный уровень (2). При этом ионы передают избыток энергии кристаллической решетке рубина, и излучение не происходит. В результате количество ионов хрома,

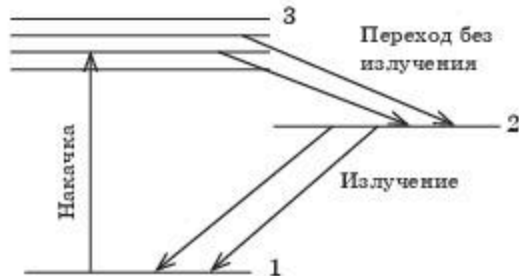


Рис. 55.2. Схема энергетических уровней Cr^{+++}

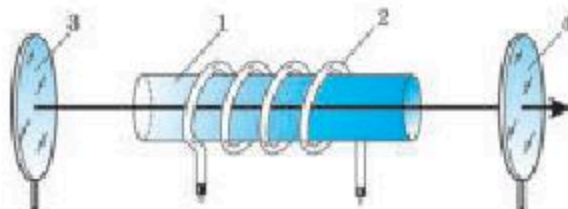


Рис. 55.3. Рубиновый лазер

находящихся на уровне 2, будет больше, чем на уровне 1, создается инверсная заселенность уровней 2 и 1 (рис. 55.2).

Вероятность самопроизвольного перехода $2 \rightarrow 1$ также мала. Допустим, произошел хотя бы один акт такого перехода. Тогда излученный при этом фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать вынужденное излучение, и испускается второй фотон. Теперь вынужденное излучение вызывают два фотона, в результате испускаются еще два точно таких же фотона и т. д. Таким образом, число фотонов может лавинообразно возрастать. Но чтобы превратить активную среду (в данном случае рубин) в генератор световых колебаний, необходимо, чтобы часть излучения многократно проходила через активное вещество и вызывала вынужденное излучение все новых и новых фотонов.

Для этого рубин помещают между двумя параллельными зеркалами (рис. 55.3). Зеркалами могут служить отполированные торцы рубинового цилиндра (3) и (4), на которые наносится отражающий слой. Одно из зеркал полупрозрачное. Накачка производится импульсной ксеноновой лампой (2).

Рассмотрим фотон, движущийся параллельно оси цилиндра (рис. 55.4). Проходя через цилиндр, он рождает лавину фотонов, движущихся в том же направлении. Часть этого потока фотонов, отразившись от зеркала (4), образует новую лавину на своем пути.

Отразившись от зеркала (3), поток фотонов вновь проходит через цилиндр, усиливаясь еще сильнее. Таким образом, с помощью зеркал создается *положительная обратная связь*, необходимая во всяком генераторе. Многократно усиленный поток фотонов выходит через полупрозрачное зеркало (4) и создает строго направленный пучок лазерного излучения огромной яркости.

Рубиновый лазер является импульсным. Сильная световая вспышка ксеноновой лампы вызывает импульс когерентного излучения лазера, который повторяется при каждой вспышке импульсной лампы.



Рис. 55.4. Образование лавины фотонов в рубиновом цилиндре

В газовых лазерах накачка может производиться непрерывно, и эти лазеры работают в непрерывном режиме.

Рассмотрим принцип работы гелиево-неонового лазера. Накачка

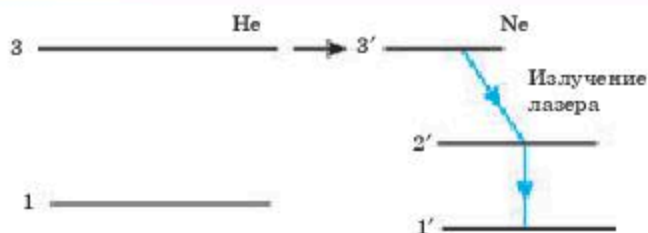


Рис. 55.5. Энергетические уровни атомов в гелий-неоновом лазере

в нем производится за счет электрического разряда в газоразрядной трубке, которая заполняется смесью гелия и неона под давлением 1 мм рт. ст. На концах трубки располагаются зеркала, одно из которых полупрозрачное. В трубке создается тлеющий разряд. Атомы гелия за счет соударения с электронами переходят в возбужденное состояние (3) (рис. 55.5), которое почти совпадает с возбужденным уровнем неона (3'). Время жизни уровня (3) велико. При столкновениях возбужденные атомы гелия передают избыток энергии атомам неона, и они переходят на уровень (3'). Переход атомов неона с этого уровня на уровень (2') сопровождается излучением лазера.

Перечислим основные особенности лазерного излучения.

1. *Высокая степень когерентности.*
2. *Монохроматичность.*
3. *Узость пучка — расходимость пучка лазера ничтожно мала.*
4. *Большая мощность излучения.*

Лазеры широко применяются в различных технологических процессах. Устройства сравнительно небольшой средней мощности используются в ювелирной отрасли. Возможность чрезвычайно тонкой фокусировки луча и точного дозирования энергии позволяет разработать технологию сверления очень тонких отверстий в рубиновых и алмазных камнях для часовой промышленности. Для соединения звеньев золотой цепочки непосредственно при ее формировании и различных узлов ювелирных изделий применяют лазерную сварку.

Современные лазеры, оснащенные компьютерным управлением, позволяют методом лазерной маркировки наносить на металл очень тонкие и четкие гравировки, рисунки, вензеля или логотипы. Маломощные импульсные лазеры используют для резки и сварки миниатюрных деталей в микроэлектронике, в частности, в фотолитографии, без применения которой было бы невозможно изготовление сверхминиатюрных печатных плат, интегральных схем.

Лазеры с большой средней мощностью используют при резке и сварке толстых стальных листов, поверхностной закалке, наплавлении и легировании крупных деталей. При лазерной сварке металла достигается высокое качество шва и не требуется применение вакуумных камер, как при электронно-лучевой сварке.

Лазерная технология находит все более широкое применение в машиностроении, строительстве, автомобилестроении. Узконаправленность и высокая монохроматичность, большая импульсная мощность обусловили применение лазеров в военном деле: лазерная локация, лазерные навигационные системы и лазерное оружие.

В последние годы лазеры широко применяют в медицине как в хирургии, так и в терапевтических процедурах. В косметологии лазеры применяют при лечении сосудистых дефектов кожи, эпиляции и т. д.

Нелинейная оптика. Напряженность электрического поля \vec{E} в световой волне от обычных (не лазерных) источников света пренебрежимо мала по сравнению с напряженностью поля внутри атомов. Поэтому оптические свойства среды (например, показатель преломления) не зависят от интенсивности света, а распространение световых волн описывается линейными дифференциальными уравнениями. В таком случае говорят о *линейной оптике*.

С созданием лазеров появилась возможность получения пучков огромной интенсивности, в которых напряженность электрического поля уже сравнима с внутриатомными полями. В таких пучках возникают *нелинейные оптические явления*, например, показатель преломления зависит от напряженности \vec{E} , нарушается принцип суперпозиции волн.

Рассмотрим некоторые нелинейные оптические явления.

1. *Нелинейное отражение света.* При очень больших интенсивностях в отраженном свете кроме отраженного луча, имеющего ту же частоту, что и падающий, наблюдается отраженный луч частоты в два раза большей. Таким образом, в отраженном свете наблюдаются два луча с разными направлениями распространения и частоты ω , и 2ω .

2. *Самофокусировка светового пучка.* Известно, что первоначально параллельный пучок света при распространении в вакууме или в какой-нибудь среде расходится вследствие дифракции. С увеличением интенсивности света в некоторых жидкостях и кристаллах расходимость пучка уменьшается. При достижении некоторого критического значения интенсивности пучок совсем не расходится. Наконец, при интенсивности большей критической интенсивности пучок при распространении сжимается, т. е. происходит самофокусировка. Объясняется это явление тем, что при напряженности \vec{E} электрического поля световой волны, сравнимой с внутриатомными полями, показатель преломления среды увеличивается с ростом \vec{E} . Поэтому показатель преломления среды n в той области, где распространяется пучок, больше, чем в остальной части, что и приводит к изгибанию лучей к оси пучка.

3. *Многофотонные процессы.* При обычных интенсивностях света атом может поглотить фотон, если $h\nu = E_m - E_n$, т. е. когда его энергия равна разности энергий двух уровней. В одном акте поглощается только один фотон. Оказывается, при очень больших интенсивностях

в одном акте может происходить поглощение двух, трех фотонов. В таком случае возможно поглощение света не только частоты ν , но и $\frac{\nu}{2}$; $\frac{\nu}{3}$ и т. д. Такое поглощение называется *многофотонным*. При больших интенсивностях возможен также многофотонный фотоэффект, это явление мы уже рассматривали.

Голография. При фотографировании обычным методом фотоаппарат фиксирует на фотопленке излучение, рассеиваемое объектом. В этом случае каждая точка объекта является центром рассеяния падающей световой волны и эта точка с помощью объектива фокусируется в небольшое пятнышко на светочувствительной поверхности фотопленки. Так возникает изображение объекта. Это изображение складывается из получающихся на каждом участке светочувствительной поверхности изображений соответствующих точек. При этом трёхмерные объекты регистрируются в виде плоских двухмерных изображений. Дело в том, что при фотографировании на фотопленке фиксируется только распределение интенсивности света, то есть амплитуды электромагнитной волны, отражённой от объекта. Световая волна при отражении от объекта изменяет не только амплитуду, но и фазу в соответствии со свойствами поверхности объекта в данной точке. Но на почернение фотопленки фаза колебаний не влияет. Если бы на фотопленке удалось зафиксировать не только амплитуду световых волн, но и фазу их колебаний, то такая фотография получилась бы трехмерной и точной копией объекта.

Метод получения объемного изображения объекта, основанный на интерференции волн (от греч. *hulos* — весь, полный и *grapho* — пишу) называется *голографией*. Идея голографии была впервые высказана в 1948 году английским физиком Д. Габором. Но техническая реализация метода оказалась такой сложной, что только с появлением лазеров появилась возможность реализации этой идеи.

Для получения голограммы используется широкий пучок когерентного света, который разделяется на два (рис. 55.6). Один из пучков

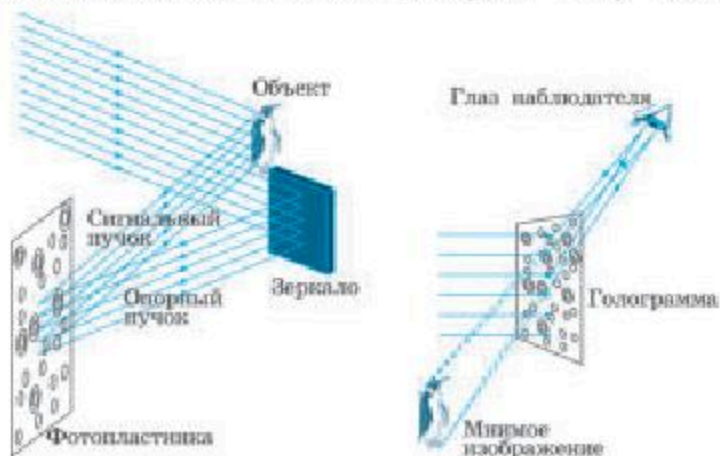


Рис. 55.6

достигает фотопластинки после отражения от объекта. Это *сигнальный пучок*. Другой же пучок попадает на фотопластинку после отражения от плоского зеркала. Этот пучок называется *опорным*. В результате наложения обоих пучков когерентных волн на фотопластинке образуется интерференционная картина. Фотография этой картины, полученная после обработки фотопластинки, называется *голограммой*.

Перспективы развития голографии. Рассмотрим некоторые перспективы применения голографии. 1) Применение в образовании основано на эффекте формирования “объемных представлений и знаний” об исследуемом объекте, предмете или явлении. Допустим, на уроке истории учитель рассказывает, например, о пирамиде Хеопса и показывает ее голографическое изображение. Ученики могут рассмотреть это произведение со всех сторон, что позволяет охарактеризовать и осмыслить его до мельчайших деталей. 2) В медицине голографические технологии совместно с методами медицинской визуализации могут позволить моделировать и заранее прогнозировать последствия хирургических вмешательств. 3) В астрономии голографические технологии могут быть использованы для создания голографических изображений проекций различных вселенных, процессов создания новых звезд и т. д. 4) физика — проекции явлений микромира, проведение экспериментов квантовой физики и т. д. 5) биология — голографическая проекция явлений микромира, взаимодействия бактерий, вирусов, белков и т. д.

В апреле 2017 года два крупнейших оператора Verizon (США) и Korea Telecom (Южная Корея) совершили первый международный голографический звонок с помощью технологии 5G. При звонке формируются голограммы собеседника, которые полностью передают эмоции и жестикуляцию пользователя.

С помощью голографии можно транслировать лектора с другого конца света. Например, в 2015 году нобелевский лауреат и профессор физики в Стэнфордском университете Карл Виман выступил в Наньянском технологическом университете (Сингапур), не покидая США. Подготовка и настройка голографического дисплея заняла три недели. С помощью голографии можно оцифровывать предметы искусства. Например, в 2015 году в музее Фаберже были созданы голографические копии некоторых яиц из их коллекции. А в мае 2017 года в музее мадам Тюссо установили первую голограмму — образ немецкого видеоблогера Бьянки “Биби” Хайнике. Российской компанией WayRay разрабатывается проект создания навигационной системы Navion, основанной на технологии дополненной реальности. В устройство входит голографическая пленка, которая наносится на лобовое стекло автомобиля.

В Японии разрабатываются варианты голографических телевизоров. Большой популярностью на рынке пользуются голографические проекторы. Они показывают голограммы на 360° и позволяют взаимодействовать с ними: крутить, увеличивать и уменьшать, смотреть меню.

Мы рассмотрели только некоторые перспективы развития голографических технологий.



1. Что такое лазер?
2. Перечислите основные свойства лазерного излучения.
3. Расскажите о самопроизвольном и вынужденном излучении атомов.
4. Что понимают под инверсной заселенностью энергетических уровней?
5. Объясните принцип действия рубинового лазера.
6. Расскажите о работе гелиево-неонового лазера.
7. Каковы особенности нелинейных оптических явлений?
8. Приведите примеры нелинейных оптических явлений.
9. Что такое голография?
10. Расскажите о перспективах развития голографии.

§ 56. Трудности теории Бора. Волновые свойства частиц. Волны де Бройля



Ключевые понятия:

- ✓ дифракция электронов
- ✓ интерференция потока микрочастиц
- ✓ волны де Бройля



На этом уроке вы:

- познакомитесь с волновыми свойствами микрочастиц;
- рассмотрите трудности теории Бора;
- научитесь решать задачи с использованием формулы длины волны де Бройля.

Это вы знаете

Результаты опытов Резерфорда по рассеянию альфа-частиц в тонкой золотой фольге и разработанная на их основе ядерная модель атома противоречат теоретическим выводам классической электродинамики. Для преодоления этих противоречий датский физик Н. Бор. В 1913 г. выдвинул свои знаменитые постулаты.

На основе своих постулатов Бор разработал теорию водородоподобного атома, который по сути может быть ионом любого элемента, содержащего в электронной оболочке только один электрон.

Используя в своих расчетах законы классической физики — второй закон Ньютона и закон Кулона, он вывел формулы радиуса так называемой первой боровской орбиты, определил допустимые значения энергетических уровней атома, объяснил закономерности линейчатых спектров.

Трудности теории Бора. Теория Бора явилась крупным шагом в развитии теории строения атома. Она отчетливо показала неприменимость классической физики к явлениям микромира. Однако после первых успехов теория Бора столкнулась со многими трудностями. Например, она потерпела полную неудачу уже при попытке построения

теории атома гелия — одного из самых простейших атомов. Главная причина неудач — внутренняя логическая противоречивость и непоследовательность этой теории. Она как бы является полуклассической, полуквантовой. Главная заслуга боровской теории в том, что она послужила переходным этапом на пути к созданию квантовой механики — механики микромира. Законы микромира существенно отличаются от законов классической физики. Одной из особенностей микрочастиц является корпускулярно-волновой дуализм их свойств.

Волновые свойства микрочастиц. В настоящее время волновые свойства микрочастиц считаются хорошо проверенным и широко известным экспериментальным фактом. Идея о существовании у микрочастиц волновых свойств и о связи длины волны частицы с ее импульсом принадлежит французскому физiku Луи де Бройлю.

Первым экспериментальным подтверждением гипотезы де Бройля можно считать явление дифракции электронов. Американские ученые физики К. Девиссон и Л. Джермер в 1927 году обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся на кристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину, похожую на ту, которая возникает при рассеянии коротковолнового рентгеновского излучения на кристалле. В этих экспериментах кристалл играл роль естественной дифракционной решетки. По положению дифракционных максимумов можно определить длину волны электронного пучка. Позже дифракционные явления были обнаружены также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков.

Открытие волновых свойств электронов вызвало появление новой отрасли науки — электронной оптики, и нового прибора — электронного микроскопа. Разрешающая способность любого микроскопа определяется длиной волны применяемого излучения. Поэтому использование вместо световых лучей электронных пучков позволяет существенно, в тысячи раз, повысить разрешающую способность микроскопа. Явление дифракции электронов, в частности, используют для исследования структуры кристаллических веществ.

В свое время предсказание, а потом и экспериментальное обнаружение волновых свойств частиц было великим открытием в физике. Дело в том, что в то время совмещение в одном объекте свойств волны и частицы казалось неправдоподобным. Тогда физики считали электрон во всем подобным классической частице. Энергия и импульс такой частицы локализованы в том месте, где она находится, она движется по вполне определенной траектории. Другими словами, частица ассоциируется с понятиями *дискретность, прерывистость*.

А монохроматическая волна распространяется непрерывно в пространстве и во времени. Привычно было считать, что излучение света — это электромагнитная волна. Но потом были обнаружены корпуску-

лярные свойства световой волны, затем была осмыслена двойственная, корпускулярно-волновая природа фотонов. С микрочастицами было все наоборот, т. е. сначала они воспринимались просто как классические частицы, а потом были обнаружены их волновые свойства.

В настоящее время общеизвестно, что микрочастицы с ненулевой массой покоя, т. е. электроны, протоны, атомы, так же, как и фотон, обладают одновременно свойствами корпускул и волны. Это присущее им свойство связано с тем, что в мире микрочастиц понятия классической физики неприменимы. Однако, забегая вперед, отметим, что квантовая теория включает в себя классическую, а не опровергает ее (принцип соответствия).

Как отмечено выше, гипотезу о волновых свойствах микрочастиц в 1924 г выдвинул де Бройль. По гипотезе де Бройля корпускулярно-волновой дуализм, присущий фотону, является общим свойством всех микрочастиц. Согласно этой гипотезе, с каждой движущейся частицей, например электроном, связана волна.

Пусть мы имеем частицу массой m , движущуюся равномерно со скоростью v . Она обладает энергией E и импульсом \vec{p} . Нам известны формулы теории относительности $E = mc^2$, $\vec{p} = m\vec{v}$. Здесь в общем случае

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

где m_0 — масса покоя. Но, с другой стороны, если частице присущи волновые свойства, то она должна характеризоваться частотой ν и длиной волны λ . Между корпускулярными и волновыми свойствами частицы должна быть однозначная связь.

Де Бройль переносит на случай частиц с ненулевой массой покоя те же соотношения, которые справедливы для фотона, т. е.

$$E = \hbar\omega; \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad (56.1)$$

где \vec{k} — волновой вектор, модуль которого равен $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Тогда:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv} = \frac{h}{mv}. \quad (56.2)$$

Волна, связанная с частицей импульса p , длина которой определяется выражением (56.2) и называется *волной де Бройля*. Заметим, что в случае нерелятивистской частицы в формуле (56.2) m — масса покоя частицы, так как при $\left(\frac{v}{c}\right) \ll 1$ $m = m_0$.

Отметим, что интенсивность волн де Бройля в каком-либо месте пространства пропорциональна вероятности обнаружить частицу в этом месте. Такое толкование волны де Бройля не затрагивает структуру частицы, она, как и в классической физике, остается точечной.



1. Расскажите о трудностях теории Бора и объясните, чем они обусловлены
2. Назовите эксперименты, в которых обнаруживаются волновые свойства микрочастиц
3. Что такое волна де Бройля?
4. Почему волновые свойства обнаруживаются только у микрочастиц?

Пример решения задачи

Определите длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью 200 Мм/с.

Дано:

$$v = 200 \text{ Мм/с} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

λ — ?

Решение. Скорость электрона довольно высокая — $\frac{v}{c} = 0,666\dots$, поэтому в этой задаче надо учитывать изменение массы электрона в зависимости от скорости $m = \frac{m_e}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,

здесь m_e — масса покоя электрона;

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{m_e v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 0,272 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

($\lambda = 2,72 \text{ пм}$).

Ответ: $\lambda = 2,72 \text{ пм}$.



Упражнение 26

1. Определите длину волны де Бройля: а) электрона, б) протона. Скорость частиц $v = 1 \text{ Мм/с}$.

Ответ: 27 пм; 0,396 пм.

2. Определите длину волны де Бройля для нейтронов, скорость которых 2,5 км/с. Масса покоя нейтрона $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Ответ: 160 пм.

3. Найдите длину волны электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 51 \text{ В}$.

Ответ: 172 пм.

- 4. Чему равна релятивистская масса электрона, длина волны которого равна $4,20 \text{ пм}$?

Ответ: $10,5 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

- *5. Вычислите длину волны де Бройля протона с кинетической энергией $E_k = 100 \text{ эВ}$. Масса протона $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Ответ: $2,86 \text{ пм}$.

Самое важное в главе 9

- Виды излучений: тепловое излучение, люминесценция: электролюминесценция, катодолуминесценция, хемилюминесценция, фотолюминесценция.

- Спектром излучения (испускания) называется совокупность длин волн, присутствующих в излучении данного вещества.

- Спектром поглощения называют совокупность длин волн, которые поглощаются данным веществом.

- Излучение нагретых тел называется тепловым, или температурным излучением. Тепловое излучение является равновесным.

- Явление фотоэффекта заключается в испускании электронов веществом под воздействием света.

- Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

- Фотон — элементарная частица с нулевой массой покоя, движущаяся со скоростью света.

- Энергия и импульс фотона соответственно равны: $E = cp$; $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

- Свет одновременно обладает свойствами непрерывности электромагнитных волн и свойствами дискретности частиц-фотонов.

- Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны порядка ($10^{-12} - 10^{-9} \text{ м}$), которое возникает при торможении быстрых электронов в веществе.

- Ядерная модель атома: атом состоит из положительно заряженного ядра радиусом 10^{-15} м , в котором сосредоточена почти вся масса атома и электронов, вращающихся вокруг ядра по разным орбитам.

- Постулаты Бора:

1. В атоме существуют такие стационарные орбиты, двигаясь по которым электрон не излучает.

2. При переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией E_n на другую стационарную орбиту с энергией E_m излучается или поглощается квант энергии: $h\nu = E_m - E_n$.

- Длина волны де Бройля $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv} = \frac{h}{mv}$.

Глава 10. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 57. Естественная радиоактивность



Ключевые понятия:

- ✓ радиоактивность
- ✓ правила смещения
- ✓ альфа-распад
- ✓ бета-распад
- ✓ гамма-альфа-распад

На этом уроке вы:

- познакомитесь с радиоактивностью и с радиоактивным альфа, бета, гамма распадом.



Это вы знаете

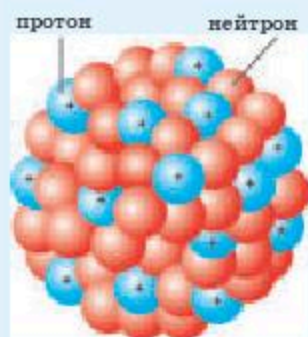


Рис. 57.1

Как вы знаете из курса физики 9 класса, понятие об атомном ядре впервые было введено Э. Резерфордом в 1911 г. Он вместе со своими сотрудниками Э. Марсденом и Х. Гейгером изучал прохождение и рассеяние α -частиц сквозь тонкую металлическую фольгу. Для объяснения результатов проводимых им опытов Резерфорд предложил свою *ядерную модель атома*. Атом состоит из положительно заряженного ядра и совокупности отрицательно заряженных электронов — электронных оболочек, полный заряд которых равен положительному заряду ядра (рис. 57.1). Почти вся масса атома сосредоточена в его ядре. Ядро занимает весьма малый объем по сравнению со всем объемом атома. В связи с открытием атомного ядра перед теоретической и экспериментальной физикой

встала задача изучения структуры и свойств атомного ядра. Так возник новый раздел физики — *ядерная физика*.

Ядерная физика изучает структуру, свойства и взаимные превращения атомных ядер и другие явления, происходящие в микромире, а также природу элементарных частиц, их взаимодействия и взаимные превращения.

Как уже отмечалось, в природе наряду с устойчивыми ядрами существуют также ядра, способные к распаду. История ядерной физики берет свое начало с открытия в 1886 г. французским физиком А. Беккерелем *естественной радиоактивности*. Беккерель исследовал влияние солей урана на фотопластинки. В процессе опытов он обнаружил следующее явление: урановые соли испускают неизвестное излучение с большой проникающей способностью, которое вызывает почернение фотопластинки, обернутой в плотную черную бумагу. В результате тщательных исследований Беккерель установил, что эти неизвестные проникающие лучи излучают сами атомы урана без каких-либо внешних воздействий. При взаимодействии с веществом неизвестные

излучения обладают свойствами: 1) вызывают почернение фотопластинки, т. е. обладают химическими действиями; 2) вызывают ионизацию газов; 3) возбуждают люминесценцию некоторых твердых и жидких тел.

Начались интенсивные исследовательские работы по изучению нового явления. В 1898 г. во Франции М. Склодовская-Кюри и П. Кюри открыли, что элемент торий (Th) также самопроизвольно излучает. М. Кюри предложила называть самопроизвольно излучающие химические элементы *радиоактивными*, а сам процесс излучения *радиоактивностью*. В том же году супруги Кюри сумели выделить два новых химических элемента.

Элемент, радиоактивность которого в миллион раз мощнее радиоактивности урана, назвали *радием* (Ra), а второй элемент — в честь родины М. Склодовской-Кюри (Польши) — *полонием* (Po). В 1908 г. методом спектрального анализа Э. Резерфорд открыл радиоактивный газ — *радон* (Rn). Широкомасштабные исследования показали, что *все тяжелые элементы, расположенные после свинца в таблице Менделеева, обладают естественной радиоактивностью*. Некоторые легкие элементы, как, например, изотоп калия, изотоп углерода, также обладают естественной радиоактивностью.



Мария
Склодовская-Кюри
(1867—1934)

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

История семейства Кюри. Пьер Кюри и Мария Саломея Склодовская впервые встретились в 1894 году в доме физика-эмигранта. Она — способная студентка из Польского царства, приехавшая во Францию в 1891 году для обучения в Сорбонне, ставшая одной из лучших в университете, получившая два диплома (физика и математика) и право на самостоятельные исследования, первая в истории Сорбонны женщина-преподаватель. В 1895 году они заключили брак.

Супруги Кюри вместе занимались исследованием радиоактивности, вместе открыли радий и полоний, вместе в 1903 году получили Нобелевскую премию: "В знак признания исключительных услуг, которые они оказали науке совместными исследованиями явлений радиации, открытой профессором Анри Беккерелем".

После гибели мужа под колесами экипажа Мария продолжает заниматься наукой и в 1911 году получает вторую Нобелевскую премию: "За выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента".

Радиоактивный распад. Э. Резерфорд и П. Кюри обнаружили сложность состава радиоактивного излучения. Радиоактивный препарат радий (Ra) расположен внутри толстостенного свинцового сосуда. В центре сосуда имеется канал цилиндрической формы. На излучение, исходящее

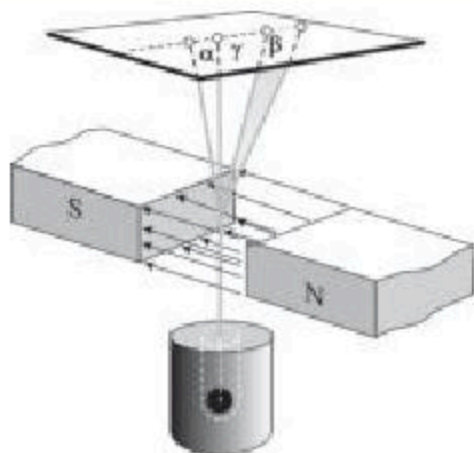


Рис. 57.2

из радия, находящегося на дне сосуда, действует перпендикулярно направленные сильное магнитное поле. Напротив канала расположена фотопластинка. Установка находится в вакууме (рис. 57.2). Поток излучения радия в магнитном поле разделился на три пучка. На разделение излучения на пучки указывали почернения на фотопластинке. Их соответственно назвали α (альфа)-, β (бета)- и γ (гамма)-лучами. Причем α -лучи (α -частицы) являются потоком положительно заряженных, β -лучи (β -частицы) — потоком быстро движущихся отрицательно заряженных частиц с различными скоростями.

Различие углов отклонения в магнитном поле показывает различие α - и β -частиц по массе и заряду. Заряды их противоположны по знаку. Высокоэнергетическими квантами электромагнитного излучения оказались γ -лучи: они не реагируют на магнитное поле. Опираясь на знания о структуре и составе атомного ядра, а также об энергии связи нуклонов, можно легко объяснить природу радиоактивного излучения.

Ядра, у которых число протонов преобладает над числом нейтронов, нестабильны, так как преобладает энергия кулоновского взаимодействия. Нестабильность ядер с преобладающим числом нейтронов над числом протонов объясняется тем, что масса нейтрона больше массы протона ($m_n > m_p$). Избыток массы создает избыток энергии. Ядра с избытком энергии могут освободиться от избытка энергии двумя путями.

1. Без механических, термических и иных внешних воздействий ядро самопроизвольно распадается, испуская радиоактивное излучение и превращаясь в ядро нового элемента. Если самопроизвольный распад сопровождается испусканием α -частиц, его называют α -распадом.

2. Ядро самопроизвольно изменяет свой заряд на единицу заряда, т. е. нейтрон превращается в протон или протон в нейтрон. Такой процесс обычно сопровождается испусканием электрона или позитрона (электрон с положительным зарядом) и поэтому называется β -распадом. Превращения атомных ядер при радиоактивных распадах подчиняются правилу смещения, сформулированному английским ученым Ф. Содди в 1913 г. При радиоактивных распадах наряду с выполнением законов

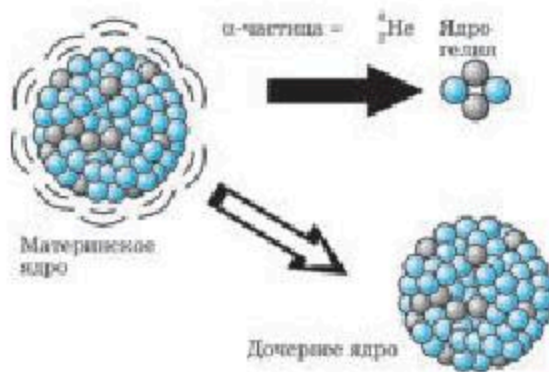
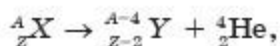


Рис. 57.3

сохранения электрического заряда и массового числа выполняются и законы сохранения импульса и энергии.

Альфа-распад. Природу α -частиц исследовал и установил Э. Резерфорд в 1908 г. При α -распаде из ядра самопроизвольно вылетает α -частица — ядро атома гелия (два протона и два нейтрона), и образуется ядро нового химического элемента. На рисунке 57.3 показан процесс α -распада.

При α -распаде ядро атома превращается в ядро дочернего элемента, у которого зарядовое число Z уменьшено на два и массовое число A — на четыре. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы элементов Менделеева:

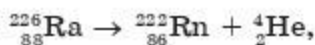


где X — символ материнского ядра; Y — символ дочернего ядра. Для α -частиц использовали символ ядра атома гелия ${}^4_2 \text{He}$.

Приведем примеры. При α -распаде из ядра урана ${}^{238}_{92} \text{U}$ появляется ядро ${}^{234}_{90} \text{Th}$:



Напишем еще одну реакцию α -распада:



где нуклиды ${}^{238}_{92} \text{U}$ и ${}^{226}_{88} \text{Ra}$ называют *материнскими*, а нуклиды ${}^{234}_{90} \text{Th}$ и ${}^{222}_{86} \text{Rn}$ — *дочерними ядрами*. Верхние числа у символа элемента, т. е. массовые числа (число нуклонов), в обеих частях равенства равны: $238 = 234 + 4$. Массовое число сохраняется. Также равны и числа внизу: $92 = 90 + 2$. Выполняется закон сохранения электрического заряда. При распаде материнского ядра α -частица и дочернее ядро разлетаются с определенными кинетическими энергиями. В некоторых случаях

дочернее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Энергию распада можно определить, используя закон сохранения энергии в системе покоя материнского ядра. Энергия распада Q_α равна сумме энергии возбуждения и кинетических энергий. Если учесть, что начальная энергия равна энергии покоя материнской энергии, то:

$$M_m c^2 = (M_d + M_{He}) c^2 + Q_\alpha,$$

где M_m , M_d , M_{He} — соответственно массы материнского, дочернего ядер и ядра атома гелия; отсюда находим энергию распада:

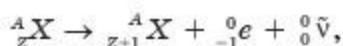
$$Q_\alpha = (M_m - M_d - M_{He}) c^2.$$

Например, при α -распаде ядра урана выделяется 4МэВ энергии. У тяжелых ядер с $Z > 82$ наблюдаются α -распады.

Как показано на рисунке 57.4, проникающая способность α -частиц незначительна, в воздухе — всего лишь 3—7 см, затем поглощаются листом бумаги. α -частицы обладают высокой ионизирующей способностью, из-за этого быстро теряют энергию.

Бета-распад. Природу β -частиц установил в 1899 г. Э. Резерфорд. Это оказался поток быстро движущихся электронов. β -частицу обозначают символом ${}_{-1}^0e$. Массовое число $A = 0$, так как масса электрона в атомных единицах столь незначительна, что ею можно пренебречь. Применим правила смещения для β -распада.

При β -распаде зарядовое число ядра атома Z увеличится на единицу заряда, а массовое число останется неизменным. В результате элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы элементов Менделеева:



где $\tilde{\nu}$ — частица с нулевым электрическим зарядом и без массы покоя под названием *электронное антинейтрино*. Например:

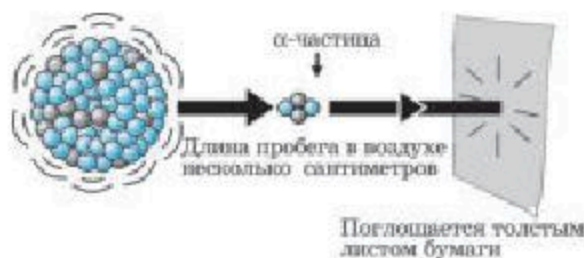
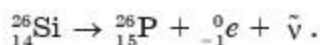


Рис. 57.4

Такой распад называется *электронным β -распадом*. При электронном β -распаде в ядре происходит превращение 1_0n нейтрона в 1_1p протон с одновременным испусканием ${}^0_{-1}e$ электрона и ${}^0_0\bar{\nu}$ антинейтрино:



Появление электрона в ядре оказалось следствием распада нейтрона. При β -распаде, как показали измерения, энергия системы “дочернее ядро — электрон” оказалась меньше, чем энергия материнского ядра. Появились сомнения насчет выполнения закона сохранения энергии.

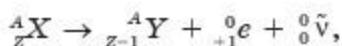
В 1931 г. швейцарский физик-теоретик В. Паули выдвинул гипотезу о том, что при β -распаде из ядра вылетает кроме электрона еще одна, пока неизвестная, частица с массовым числом $A = 0$ и зарядовым числом $Z = 0$. Причиной несохранения энергии при β -распаде является та часть энергии, которую уносит новая частица.

Великий итальянский физик Э. Ферми предложил назвать эту гипотетическую частицу *нейтрино* (от итал. *neutrino* — “маленький нейтрон”). Электрический заряд и масса покоя нейтрино равны нулю, почти не взаимодействует с веществом, поэтому обнаружить его при эксперименте чрезвычайно трудно. После долгой “охоты” за нейтрино его сумели обнаружить лишь в 1956 г. Антинейтрино является античастицей нейтрино.

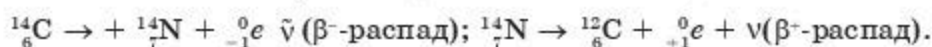
Кроме электронного β -распада существует также позитронный β^+ -распад. При позитронном β^+ -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон, испуская при этом позитрон ${}^0_{+1}e$ и электронное нейтрино:



Зарядовое число ядра Z уменьшается на единицу, в результате элемент смещается на одно место к началу периодической системы элементов Менделеева:



где ${}^0_{+1}e$ — позитрон, античастица электрона, масса его равна массе электрона. Примерами β -распада являются реакции:



Материнское и дочернее ядра являются изобарами. В системе отсчета, связанной с материнским ядром, используя закон сохранения энергии, можно определить Q_β энергию β -распада:

$$M_m c^2 = M_d c^2 + Q_\beta,$$

отсюда

$$Q_\beta = (M_m - M_d) c^2.$$

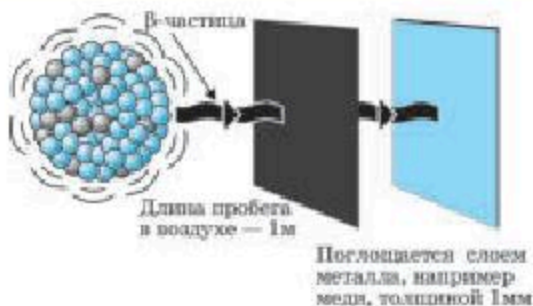


Рис. 57.5

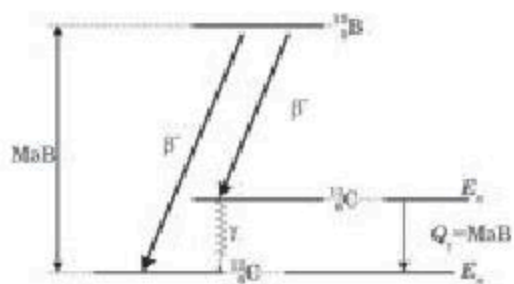


Рис. 57.6

Эта энергия распада распределяется между электроном (позитроном), антинейтрино (нейтрино) и дочерним ядром. Дочернее ядро может оказаться возбужденным. Скорость β -электронов в вакууме порядка $v_e = 2 \cdot 10^8 \frac{c}{m}$. Как показано на рисунке 57.5, проникаемость β -частиц выше, чем α -частиц, их пробег в воздухе равен порядка 1 м, но их полностью задерживает медная пластинка толщиной 1 мм.

Гамма-распад. В 1900 г. французский физик П. Виллард открыл сильно проникающее слабое излучение. Лучи Вилларда стали называться *гамма-лучами* (γ -лучи). Радиоактивный распад с испусканием γ -лучей не является самостоятельным видом распада, он сопровождает процессы α - и β -распадов. Как уже было сказано, дочернее ядро является возбужденным. (Вспомните возбужденное состояние атома.)

Возбужденное ядро, как и атом, при переходе из высокоэнергетического в низкоэнергетический уровень испускает гамма-квант с энергией

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

где E_x и E_n — соответственно энергии возбужденного и нормального уровней (рис. 57.6).

Испускаемые из ядра γ -лучи оказались потоком фотонов. Напишем формулу гамма-распада:

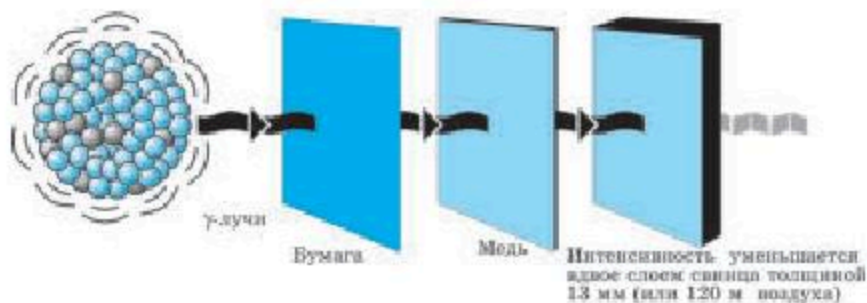
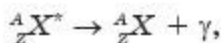


Рис. 57.7

где X^* — возбужденное материнское ядро; X — его нуклид в нормальном состоянии. На рисунке 57.7 изображена схема β -распада ядра бора.

Длина волны γ -лучей чрезвычайно коротка: $\lambda = 10^{-8} - 10^{-11}$ см. Поэтому среди радиоактивных лучей проникающая способность γ -лучей самая высокая. Как показано на рисунке 57.7, они свободно проходят через слой свинца толщиной 10 см.



1. В чем важность эксперимента Беккереля?
2. Каков состав радиоактивного излучения? Как его определили?
3. Что такое α -распад?
4. Объясните ценность открытия Содди.
5. Как понимают β -распад? Каковы различия между электронным и позитронным β -распадами?
6. В чем трудность регистрации нейтрино?
7. Каков механизм γ -распада?



Упражнение 27

1. Какое ядро появляется при α -распаде изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$?
2. Какой элемент образуется после трехкратного α -распада из изотопа актиния ${}_{89}^{225}\text{Ac}$?

Ответ: ${}_{83}^{218}\text{Bi}$.

3. При радиоактивном распаде из изотопа ${}_{82}^{209}\text{Pb}$ свинца вылетает β^- -частица. В ядро какого элемента превращается ядро изотопа свинца?

Ответ: ${}_{82}^{209}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{209}\text{Bi} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$.

4. После четырех β^- -распадов в какое устойчивое ядро превращается ядро ксенона ${}_{54}^{140}\text{Xe}$?

Ответ: ${}_{54}^{140}\text{Xe}$.

5. Ядро протона тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ испытывает два раза α -распад, два раза β^- -распад и еще один α -распад. Ядро какого элемента появится после этих преобразований?

Ответ: ${}_{86}^{220}\text{Rn}$.

6. Радиоактивный изотоп золота ${}_{79}^{196}\text{Au}$ может распадаться с испусканием как электрона, так и позитрона. Напишите реакцию распада.

Ответ: ${}_{79}^{196}\text{Au} \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{80}^{196}\text{Hg} + \tilde{\nu}$; ${}_{79}^{196}\text{Au} \rightarrow {}_{+1}^0e + {}_{78}^{196}\text{Pt} + \nu$.

7. Ядро висмута ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ может превращаться после α -распада в ядро изотопа таллия или после β^- -распада в ядро изотопа полония ${}_{84}^{212}\text{Po}$. Напишите соответствующие реакции.

Ответ: ${}_{83}^{212}\text{Bi} \rightarrow {}_{81}^{208}\text{Tl} + {}_2^4\text{He}$; ${}_{83}^{212}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{212}\text{Po} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$.

8. Какое количество α -, β -распадов содержится в цепочке превращений урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в свинец ${}_{82}^{207}\text{Pb}$?

Ответ: $n_\alpha = 7$; $n_\beta = 4$.

9. После какого числа α - и β -распадов искусственно полученный радиоактивный элемент нептуний ${}_{93}^{241}\text{Np}$ превращается в стабильный изотоп висмута ${}_{83}^{209}\text{Bi}$?

Ответ: восемь α -распадов и шесть β -распадов.

§58. Закон радиоактивного распада



Ключевые понятия:

- ✓ постоянная распада
- ✓ закон радиоактивного распада
- ✓ период полураспада
- ✓ активность

На этом уроке вы:

- на основе закона радиоактивного распада поймете долгосрочные последствия ядерных отходов;
- узнаете, как использовать формулу закона радиоактивного распада для решения задач.



Экспериментальные исследования доказали, что радиоактивный распад полностью подчиняется статистическим закономерностям. Ядра определенного радиоактивного изотопа совершенно одинаковы. Невозможно предсказать, в какой момент времени распадается ядро. Какое ядро и в какой момент времени распадется — событие случайное. Для примера возьмем два одинаковых ядра одного и того же нуклида. Одно из этих ядер образовалось 3 млрд. лет назад вследствие взрыва звезды, а второе ядро образовалось 3 мин назад в ядерном реакторе. Независимо от времени образования вероятность распада в какой-то следующий момент у обоих ядер одинакова. Для описания статистических явлений используют понятие *вероятность события*. Вероятность распада ядра в единицу времени называют *постоянной распада* и обозначают буквой λ .

Для любого ядра данного изотопа постоянная распада одинакова, а для ядер различных изотопов постоянные распада различны. Если в начале отсчета времени ($t_0 = 0$) у радиоактивного изотопа с постоянной распада λ число нераспавшихся ядер N_0 известно, тогда число ядер dN , распавшихся за очень малое время dt , будет пропорциональным наличным нераспавшимся в этот момент времени ядрам N :

$$dN = -\lambda dtN, \quad (58.1)$$

где минус указывает на то, что число ядер со временем уменьшается. Из формулы (58.1) найдем зависимость числа нераспавшихся ядер за определенное время t от времени. Для этого обе части уравнения (58.1) разделим на dt :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N.$$

Отсюда получим зависимость распада ядер от времени:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (58.2)$$

где e — основание натурального логарифма; $e = 2,718\dots$; t — время; N_0 — число ядер в начальный момент времени ($t_0 = 0$); N — число нераспавшихся ядер за время t ; λ — постоянная распада (единица измерения s^{-1}).

Эту зависимость называют *законом радиоактивного распада*. Число нераспавшихся ядер уменьшается по времени экспоненциально. На рисунке 58.1. показан график зависимости $N = f(t)$.

Промежуток времени, необходимый для распада половины радиоактивных ядер, называется периодом полураспада $T_{\frac{1}{2}}$. Значит, если начальное число радиоактивных ядер N_0 , то через промежуток времени $t = T_{\frac{1}{2}}$ их число станет $N = \frac{1}{2}N_0$. Формулу (58.2) можно записать так:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}.$$

Если прологарифмировать это уравнение: $\ln \frac{1}{2} = -\lambda \cdot T_{\frac{1}{2}}$ или $-\ln 2 = -\lambda \cdot T_{\frac{1}{2}}$, то получим $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$, что является постоянной величиной, поэтому период полураспада тоже постоянная величина.

Закон радиоактивного распада открыли Э. Резерфорд и Ф. Содди в 1902 г. Используя период полураспада, формулу (58.2) можно переписать так:

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \cdot t} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}}.$$

Эту формулу вы знаете из курса физики 9 класса. Вычисления дают для среднего времени жизни радиоактивных ядер формулу:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 1,44 \cdot T_{1/2}.$$

Среднее время жизни ядра пропорционально периоду полураспада.

Можно показать еще одну величину для описания свойств радиоактивного ядра. Величина, определяемая числом ядер распавшихся за единицу времени, называется *активностью (A) радиоактивного вещества (препарата)*:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

Единица измерения активности в Международной системе единиц — *беккерель*.

1 беккерель (Бк) — активность такого радиоактивного препарата, когда за единицу времени (1с) распадается одно ядро:

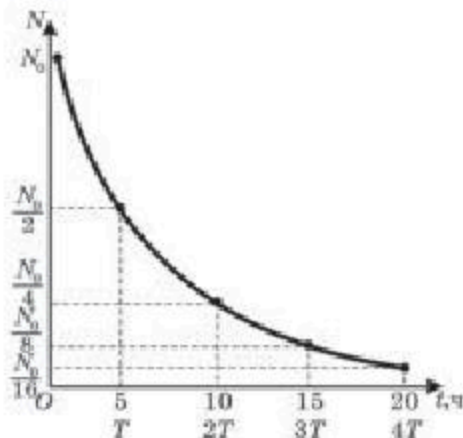


Рис. 58.1

$$[A] = 1 \text{ Бк} = \frac{1 \text{ распад}}{1 \text{ с}}.$$

На практике часто используют другую единицу — **кюри (Ки)**:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}; \quad 1 \text{ мКи} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк}.$$

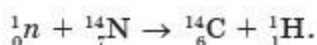
Более половины элементов в таблице Менделеева имеют естественные радиоактивные изотопы. Диапазон периода их полураспада необычайно широк. Например, у изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ период полураспада $T_{\frac{1}{2}} = 4,5$ млрд. лет, а период полураспада изотопа тория — 14 млрд. лет. Если учесть, что планета Земля образовалась 4—5 млрд. лет назад, то само собой разумеется, что уран и торий не успели еще полностью распасться.

В природе встречаются элементы, периоды полураспада которых очень коротки, даже есть элементы, периоды полураспада которых равны одной миллионной доле секунды. Например, для: изотопа радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ $T_{\frac{1}{2}} = 1600$ лет; радона ${}_{86}^{222}\text{Ra}$ $T_{\frac{1}{2}} = 3,28$ суток; полония ${}_{84}^{218}\text{Po}$ $T_{\frac{1}{2}} = 3$ мин.

Уникальной особенностью этих элементов является то, что изотопы с коротким периодом полураспада можно встретить в природе и сегодня, и завтра, и через 100 лет. Радиоактивные изотопы “не стареют”, так как скорость распада не зависит от времени. Дочерние ядра, появляющиеся в процессе распада ядер изотопов урана и тория, нестабильны, они радиоактивны. Таким образом, непрерывный процесс ядерных распадов может продолжаться до тех пор, пока не появится нерадиоактивное, стабильное ядро. Такой ряд распадов называют *радиоактивным рядом* (рис. 58.2). Так как закон радиоактивного распада подчиняется статистическим закономерностям, он выполняется для огромного числа атомных ядер.

Радиоуглеродный метод датировки — метод датирования археологических находок биологического происхождения, возраст которых составляет от 1000 до 75 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом определяют возраст египетских мумий, тканей, костей, древесины и т. д.

Попадающие в атмосферу Земли космические лучи, сталкиваясь с атомами в атмосфере Земли, в основном состоят из протонов. Протоны выбивают из них вторичные протоны и нейтроны, которые вступают в новые ядерные реакции с атомом азота:



Углерод ${}_{6}^{14}\text{C}$ распадается с периодом полураспада $T_{\frac{1}{2}} = 5730$ лет.

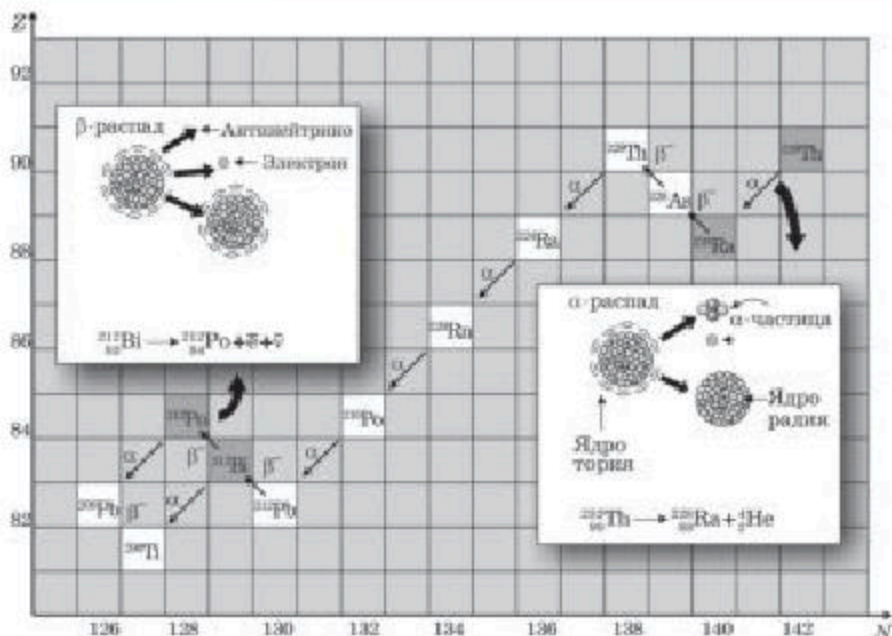


Рис. 58.2

В атмосфере устанавливается равновесие между числом распавшихся и вновь образовавшихся ядер атомов $^{14}_6\text{C}$. Нынешнее соотношение между числом атомных ядер $^{14}_6\text{C}$ и $^{12}_6\text{C}$ составляет $1 : 1,5 \cdot 10^{-12}$. Радиоактивный углерод $^{14}_6\text{C}$ вступает в реакцию с находящимся в атмосфере кислородом и превращается в двуокись углерода. При усвоении углекислого газа все растения наряду с углеродом $^{12}_6\text{C}$ постоянно потребляют определенное количество радиоактивного углерода $^{14}_6\text{C}$. Вместе с растительной пищей ядра атомов $^{14}_6\text{C}$ попадают в организм животных и людей. Однако с момента гибели живого организма число атомов $^{14}_6\text{C}$ уменьшается в соответствии с законом радиоактивного распада. Измеряя скорость распада, можно определить возраст любой археологической находки. За это открытие американский физик У. Либби удостоен Нобелевской премии (1960 г.).



1. Какому закону подчиняется радиоактивный распад атомных ядер?
2. Как вы понимаете смысл термина постоянная распада?
3. В чем смысл закона радиоактивного распада?
4. Какое правило подтверждает тем, что период полураспада $T = const$?
5. Что называется активностью радиоактивного изотопа? Единица какой величины есть беккерель?
6. Дочернее ядро стабильно. Какие изменения произойдут в этом элементе?
7. Известно, что возраст Земли составляет несколько миллиардов лет, а период полураспада радия 1600 лет. Почему на Земле до настоящего времени сохранилась какая-то часть радия?

Примеры решения задач

1. Период полураспада радиоактивного ${}_{11}^{24}\text{Na}$ натрия 14,8 ч. Определите число распавшихся атомов 1 г радиоактивного натрия за 7,4 ч. Молярная масса натрия $24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Дано:

$$T_{\frac{1}{2}} = 14,8 \text{ ч}$$

$$m = 1 \text{ г}$$

$$t = 7,4 \text{ ч}$$

$$M = 24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$\Delta N = ?$$

Решение. Определим число атомов ΔN , распавшихся за время t : $\Delta N = N_0 - N$, где N_0 — начальное число атомов ($t = 0$), N — число нераспавшихся атомов к моменту времени t . Формулу (58.2) закона радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$ подставим в выражение для ΔN :

$$\begin{aligned} \Delta N &= N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) = N_0 (1 - e^{-\frac{\ln 2}{T} t}) = \\ &= N_0 \left(1 - \left(e^{\ln 2} \right)^{-\frac{t}{T}} \right) = N_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right). \end{aligned}$$

Для определения числа атомов используем известную вам формулу: $N = \frac{m}{M} \cdot N_A$, где m — масса вещества; N_A — число Авогадро; M — молярная масса. Из последних выражений находим:

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{m}{M} \cdot N_A \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right) = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \left(1 - 2^{-\frac{7,4 \text{ ч}}{14,8 \text{ ч}}} \right) = \\ &= 7,5 \cdot 10^{21}. \end{aligned}$$

$$(\Delta N = 7,5 \cdot 10^{21})$$

2. Масса радиоактивного кобальта 4 г. Сколько граммов кобальта распадается за 216 сут, если его период полураспада 72 сут?

Дано:

$$m_0 = 4 \text{ г}$$

$$t = 216 \text{ сут}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = 72 \text{ сут}$$

$$\Delta m = ?$$

Решение. Так как масса вещества прямо пропорциональна числу атомов, можно считать, что масса вещества также изменяется со временем по экспоненциальному закону: $m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

$$\text{Следовательно, } \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = N_0 \frac{\left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right)}{N_0}.$$

$$\text{Отсюда } \frac{\Delta m}{m_0} = 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \Delta m = m_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}\right),$$

$$\Delta m = 4 \text{ г} \cdot (1 - 2^{-3}) = \frac{4 \text{ г} \cdot 7}{8} = 3,5 \text{ г}.$$

$$(\Delta m = 3,5 \text{ г})$$

3. $\frac{5}{8}$ частей начального числа ядер радиоактивного изотопа распались за 849 с. Найдите период полураспада этого изотопа.

<p>Дано: $t = 849 \text{ с}$ $\frac{\Delta N}{N} = \frac{5}{8}$ $T_{\frac{1}{2}} = ?$</p>	<p>Решение. Напишем закон радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$ или $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$. По условию задачи за время t распались $\frac{5}{8}$ частей ядер. Так как $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0}$, где N_0 — начальное число нераспавшихся ядер;</p>
--	--

N — число нераспавшихся ядер к моменту времени t , то $\frac{5}{8} = 1 - e^{-\lambda t}$, отсюда $e^{-\lambda t} = \frac{3}{8}$. Прологарифмируем это равенство: $-\lambda t = \ln \frac{3}{8}$,

$\lambda t = \ln \frac{8}{3}$, $\lambda = \frac{\ln \frac{8}{3}}{t}$. Воспользуемся формулой для периода полураспада:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2 \cdot t}{\ln \frac{8}{3}} = 600 \text{ с} = 10 \text{ мин}.$$

$$(T_{\frac{1}{2}} = 10 \text{ мин})$$



Упражнение 28

1. Сколько атомов распадается за одни сутки в препарате полония $^{210}_{84}\text{Po}$ массой $m = 1 \text{ г}$?

$$\text{Ответ: } \Delta N = 1,44 \cdot 10^{19} \text{ атомов}.$$

2. Определите период полураспада висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$, если известно, что за 1 с из висмута массой 1 г вылетает $N = 4,58 \cdot 10^{15}$ β^- -частиц.

$$\text{Ответ: } 5 \text{ сут}.$$

3. За 150 с распались $\frac{7}{8}$ первоначальных радиоактивных ядер. Чему равен период полураспада элемента?

$$\text{Ответ: } T = 50 \text{ с}.$$

4. Период полураспада изотопа йода $^{131}_{53}\text{I}$ — восемь суток. Если первоначальная масса препарата 40 г, сколько ядер радиоактивного изотопа останется после 80 суток?

$$\text{Ответ: } 1,8 \cdot 10^{20}.$$

5. Определите, сколько атомов распадается в $m = 1 \text{ мг}$ радиоактивного изотопа цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$ в течение промежутка времени $t = 20 \text{ дн}$. Период полураспада цезия $T_{\frac{1}{2}} = 30 \text{ дн}$.

$$\text{Ответ: } N = 1,6 \cdot 10^{18}.$$

- *6. Активность изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ в древних деревянных предметах составляет $\frac{2}{3}$ активности этого изотопа в свежесрубленных деревьях. Оцените с точностью до тысячи лет возраст древних предметов, если период полураспада атомов $^{14}_6\text{C}$ 5570 лет.

Ответ: ≈ 3000 лет.

- *7. Свинец, содержащийся в урановой руде, является конечным продуктом распада уранового ряда, поэтому из отношения массы урана в руде к массе свинца в ней можно определить возраст руды. Найдите возраст t урановой руды, если известно, что на массу $m_{\text{ур}} = 1$ кг урана $^{238}_{92}\text{U}$ в этой руде приходится масса $m_{\text{св}} = 320$ г свинца $^{206}_{82}\text{Pb}$.

Ответ: $t = 3 \cdot 10^9$ лет.

- *8. В составе руды с радиоактивными элементами всегда присутствует свинец. Известно, что радиоактивный ряд тория замыкает свинец ($^{234}_{90}\text{Th} \Rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb}$). Если возраст ториевых руд считать равным $t \approx 4 \cdot 10^9$ годам (порядка возраста Солнечной системы), найдите массу свинца, получаемую из 1 кг тория.

Ответ: $m_2 = m_1 \frac{M_1}{M_2} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \approx 0,16$ кг.

- *9. Возраст археологических находок определяют с помощью встречающегося в них радиоактивного углерода $^{14}_6\text{C}$, полупериод распада которого 5730 лет. В атмосферном углероде радиоактивность в 1 г равна $A = 0,255$ Бк. Найдите возраст находки, если в 100 г углерода в составе находки наблюдают 35 распадов в час.

Ответ: $t = T \cdot \ln\left(\frac{\tau m_2 \cdot A}{m_1 \cdot N}\right) / \ln 2 = 65000$ лет.

§ 59. Атомное ядро



Ключевые понятия:

- ✓ заряд ядра
- ✓ масса ядра
- ✓ атомная единица массы
- ✓ относительная атомная масса

На этом уроке вы:

- познакомитесь с характеристиками атомного ядра и единицами измерения.



Заряд атомного ядра. Одной из основных характеристик атомного ядра является его *заряд*. Заряд атомного ядра впервые точно измерил Г. Мозли в 1913 г. Непосредственные измерения ядерного заряда осуществил Дж. Чедвик в 1920 г. Заряд атомного ядра равен произведению порядкового номера химического элемента Z в таблице Менделеева на величину элементарного заряда e :

$$q = Z \cdot e. \quad (59.1)$$

Таким образом, порядковый номер любого химического элемента в таблице Менделеева определяется числом положительных зарядов ядра атома этого элемента. Поэтому порядковый номер Z элемента называют *зарядовым числом*.

Масса атомного ядра. Физические свойства атомного ядра определяются наряду с его зарядом еще и его массой. *Масса* — одна из важнейших характеристик ядер. В ядерной физике массы ионов и атомных ядер определяют в основном с помощью масс-спектрографа. На рисунке 59.1 приведена схема масс-спектрографа. Атомы

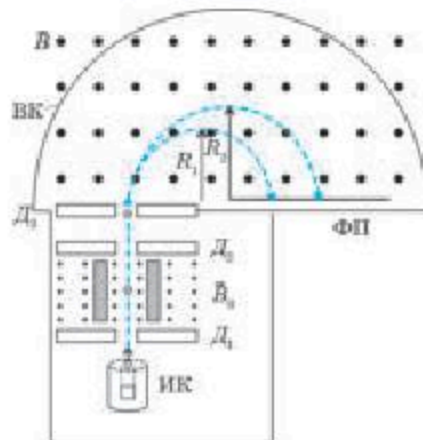


Рис. 59.1

излучаемых веществ положительно ионизируются в ионном источнике и под действием слабого электрического поля проходят через диафрагму D_1 с различными скоростями. В электрическом поле между диафрагмами D_1 и D_2 положительные ионы движутся с ускорением. Одновременно с электрическим полем на положительные ионы действует слабое магнитное поле с индукцией \vec{B}_0 . Ускоренные таким образом положительные ионы проходят через взаимно перпендикулярные электрическое \vec{E}_0 и магнитное \vec{B}_0 поля. Для прохождения через диафрагму D_2 без отклонений необходимо выполнение условия: $F_e = F_m$ или $qE_0 = vqB_0$. Отсюда определим скорость:

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \quad (59.2)$$

Таким образом, обладающие одинаковыми скоростями v положительные ионы через щель диафрагмы D_3 проходят в вакуумную камеру $ВК$, расположенную в однородном магнитном поле \vec{B} . Вектор индукции магнитного поля \vec{B} перпендикулярен вектору скорости. На движущиеся в магнитном поле положительные ионы действует сила Лоренца $F = qvB$.

Ионы под действием этой силы движутся по окружности. Описав полуокружность, ионы с одинаковыми массами попадают в одно место фотопластинки $ФП$. Ионы с различными массами, двигаясь соответственно по дугам окружностей с различными радиусами, попадают в различные места фотопластинки.

Из равенства $F_n = F_m$ или $M \cdot \frac{v^2}{R} = qvB$ можно определить массу иона с большой точностью:

$$M = \frac{qBR}{v}. \quad (59.3)$$

Массу ядра атома принято обозначать буквой M .

Единицы измерения в ядерной физике. Наряду с применяемыми в Международной системе единиц длины, массы и других привычных единиц в ядерной физике пользуются также и специальными единицами. Это вызвано тем, что ядерные процессы протекают в *субатомном мире*.

Так, например, самое большое расстояние в ядерной физике — радиус атома — всего лишь 10^{-10} м. Единица длины в ядерной физике называется **фемтометр**: $1 \text{ фм} = 10^{-15}$ м. За единицу массы атома принято считать часть массы атома. Эту единицу называют **атомной единицей массы** (а.е.м.):

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,660546 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad 1 \text{ кг} = 6,023091 \cdot 10^{26} \text{ а.е.м.}$$

Относительная атомная масса $A_r = \frac{m_A}{1 \text{ а.е.м.}}$ показывает, сколько атомных единиц массы содержится в абсолютной атомной массе. Например, для: водорода $A_r = 1,00783$; углерода $A_r = 12,0$; кислорода $A_r = 15,99482$.

В ядерной физике энергию выражают в **электронвольтах** (вспомните сведения из 9 класса): $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Чаще всего применяют кратные величины: $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$; $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$; $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$.

Массы элементарных частиц выражают наряду с атомными единицами массы в единицах энергии (МэВ или ГэВ). Определим энергетический эквивалент атомной единицы массы. По формуле Эйнштейна $E_0 = m_0 c^2$. Для частицы с массой, равной атомной единице массы $m_0 = 1 \text{ а.е.м.}$: $E_0 = 1,605402 \cdot 10^{-27} \cdot 2,99792458 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 1,49242 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,49432 \text{ МэВ} \approx 931,5 \text{ МэВ}$; $1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ}$. Например, для электрона энергетический эквивалент массы равен: $m_0 = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,485779 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.} = 0,5109906 \text{ мэВ} \approx 0,511 \text{ МэВ}$.

Массы электронов в атоме по сравнению с массой ядра пренебрежимо малы. Поэтому целое число, ближайшее к атомной массе, выраженной в а.е.м., называется **массовым числом** и обозначается буквой A . Оно используется в расчетах, не требующих высоких точностей; чаще всего применяется в выражениях, содержащих отношения масс ядер, в качестве массы ядер. Так, масса атома гелия $M_{\text{He}} = 4,0026 \text{ а.е.м.}$, а массовое число $A = 4$.

Формы и размеры атомного ядра. Экспериментально установлено, что форма ядра напоминает сферу. Радиус ядра приближенно можно выразить формулой:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad (59.4)$$

где $R_0 = 1,25 \cdot 10^{-15}$ м; A — массовое число. Предполагая, что ядро имеет форму сферы радиуса R , для средней плотности ядерного вещества имеем:

$$\rho = \frac{M_{\text{я}}}{V} = \frac{M_{\text{я}}}{\frac{4}{3}\pi R^3}, \quad (59.5)$$

где $M_{\text{я}}$ — масса ядра. Как показывают расчеты, $\rho \approx 2,7 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Это колоссальная величина, такая плотность вещества характерна для нейтронных звезд — *пульсаров*.



1. Как связан в периодической системе Д. И. Менделеева порядковый номер элемента с зарядом его ядра?
2. Почему химические свойства атома определяются зарядом его ядра?
3. Какие единицы измерения дополнительно применяются в ядерной физике?
4. С какой целью применяется масс-спектрограф? Объясните принцип его работы.
5. Что называется массовым числом?
6. Как рассчитывают радиус атомных ядер?
7. Какова средняя плотность ядерного вещества?
8. Какого порядка размеры атома и атомного ядра?



Упражнение 29

1. Во сколько раз радиус атома брома ${}^{79}_{35}\text{Br}$ больше радиуса его ядра?

Ответ: $\approx 3 \cdot 10^5$.

2. Определите радиус ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ атома урана.

Ответ: $\approx 8,03 \cdot 10^{-15}$ м.

3. Однозарядный ион цезия массой 133 а.е.м., предварительно ускоренный в электрическом поле с напряжением 2000 В, движется в однородном магнитном поле масс-спектрографа. Если индукция магнитного поля 0,25 Тл, определите радиус окружности, по которой движется ион.

Ответ: 29,6 см.

§ 60. Нуклонная модель ядра



Ключевые понятия:

- ✓ протон
- ✓ нейтрон
- ✓ массовое число
- ✓ нуклоны
- ✓ нуклиды
- ✓ изотопы
- ✓ изобары

На этом уроке вы:

- познакомитесь с протон-нейтронной моделью ядра и изотопами.



Открытие протона. После открытия атомного ядра на повестку дня встал вопрос: какова структура ядра? В 1919 г. Э. Резерфорд, продолжая свои опыты с α -частицами, открыл первую частицу, входящую в атомное ядро.

В закрытом сосуде находится источник α -частиц элемент Ra и прозрачный экран Э, покрытый сульфидом цинка (рис. 60.1). Воздух из сосуда выкачан. Вылетевшие α -частицы при столкновении с экраном вызывают свечения, которые наблюдают в микроскоп М. На следующем этапе эксперимента был взят сосуд и наполнен азотом. Теперь энергии α -частиц растрачиваются на ионизацию атомов азота и на их возбуждение, благодаря этому они уже не долетают до экрана. Все же хотя редко, но свечения появляются на экране. Электроны, возникающие при ионизации атомов азота, не в состоянии вызывать свечения. Следовательно, α -частицы при столкновении с атомом азота выбивают из его ядра неизвестные заряженные частицы, которые и вызывают свечение. Исследования этих частиц в электрическом и магнитном полях показали, что они обладают положительным зарядом. Масса их оказалась равной массе ядра атома водорода. Эксперимент повторяли и с другими веществами — фтором, натрием, бором, алюминием и т. д. При бомбардировке α -частицами почти всегда наблюдался вылет ядра атома водорода. Все это доказывало, что в состав ядра входит ядро

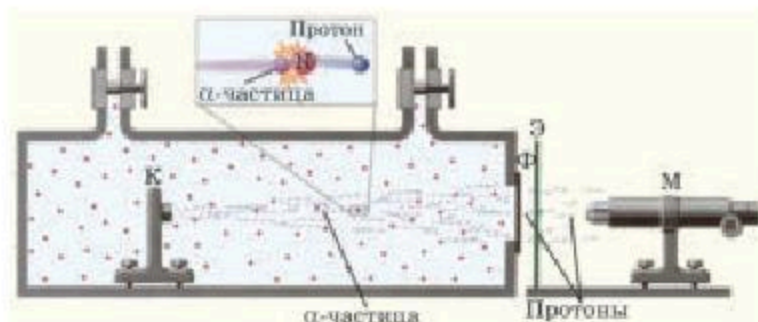


Рис. 60.1

атома водорода. Это ядро атома водорода назвали **протоном** (от греч. *protos* — “первый”).

Протон заряжен положительно, и его заряд равен по величине элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.е.м.} = 938,27 \text{ МэВ.}$$

Открытие протона родило надежду создать протонно-электронную модель ядра. Несмотря на ее простоту и естественность, протонно-электронная модель ядра по мере развития ядерной физики была оставлена. Она оказалась в противоречии с важнейшими свойствами атомных ядер.

Открытие нейтрона. Немецкие ученые В. Боте и Г. Беккер при бомбардировке α -частицами атомов лития и бериллия в 1930 г. обнаружили испускание новых, до того времени неизвестных частиц, которые очень плохо взаимодействовали с веществом и свободно проходили через слой свинца толщиной 20 см. Аналогичные опыты ставили и французские ученые Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. На пути появляющихся лучей они ставили парафиновую пластину (рис. 60.2). Исследователи ожидали, что из богатой протонами парафиновой пластины вылетят протоны. Аналогичные опыты были поставлены и английским ученым Дж.Чедвиком — учеником Э.Резерфорда. Еще раньше Резерфордом было высказано предположение, что в состав атомного ядра входит пока неизвестная, нейтральная тяжелая частица, подобная протону. Чедвик сразу же приступил к бомбардировке α -частицами бериллия и исследовал свойства неизвестного излучения.

Используя законы сохранения энергии и импульса, он рассчитал массу неизвестной частицы. Ученый установил, что неизвестным источником излучения является поток электрически нейтральных частиц. Масса “незнакомки” оказалась близкой массе протона.

Пророчество Э. Резерфорда, высказанное им еще в 1920 г., о том, что в состав атомного ядра входит массивная, как протон, нейтральная ча-

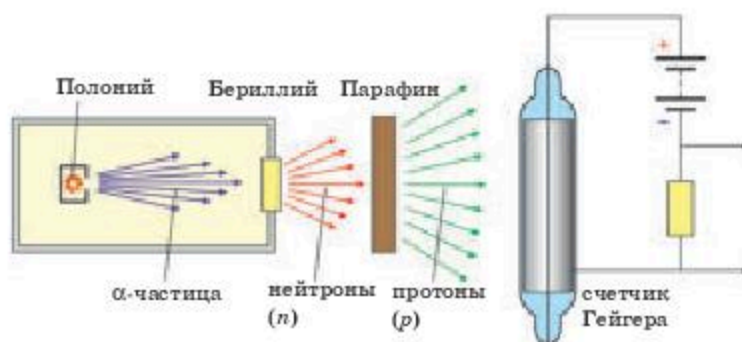


Рис. 60.2

стица, сбылось. И тогда же гипотетическую частицу назвали *нейтроном* (от лат. *neutrum* — “ни то, ни другое”). Электрический заряд нейтрона равен нулю, поэтому эта частица обладает высокой проникаемостью через вещество. По современным данным масса нейтрона равна:

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.е.м.} = 939,56 \text{ МэВ.}$$

Обозначение нейтрона ${}_0^1n$, электрически нейтрален, относительная атомная масса близка к единице. Масса нейтрона больше массы протона приблизительно на 2,5 электронных масс. Долгое время не могли обнаружить нейтрон в свободном состоянии. Только в 1950 г. выяснили причину явления. Нейтрон — не стабильная частица. Время жизни нейтрона порядка 14 мин. После этого частица распадается на протон, электрон и безмассовую частицу — *антинейтрино*. Об этом речь пойдет в последующих главах.

Состав атомного ядра. После открытия нейтрона советский ученый Д. Д. Иваненко в 1932 г. высказал гипотезу о том, что *атомные ядра состоят только из Z протонов и N нейтронов*. Эта же гипотеза чуть позже (в том же году) была высказана немецким ученым В. Гейзенбергом. Взгляды ученых очень быстро получили всеобщее признание и явились основой для создания современной теории атомного ядра.

Атом в нормальном состоянии электрически нейтрален, поэтому заряд протонов в ядре по модулю должен быть равен заряду электронов в атоме, значит, число протонов равно числу электронов в электронных оболочках. Число протонов в ядре, называемое *зарядовым числом*, обозначают буквой *Z*. Зарядовое число *Z* равно порядковому номеру соответствующего химического элемента в периодической таблице Менделеева.

Согласно современным представлениям, массовое число ядра *A* представляет собой всеобщее число частиц — протонов и нейтронов, находящихся в ядре и называемых *нуклонами* (от лат. *nukluis* — “ядро”):

$$A = Z + N. \quad (60.1)$$

Число нейтронов в ядре можно определить как разность массового числа и числа протонов: $N = A - Z$.

Для описания состава ядра используют его атомный номер *Z* в таблице Менделеева и массовое число *A*. Масса электронов в атоме пренебрежимо мала по сравнению с массой ядра. Поэтому массовое число *A* атомного ядра равно округленному до целого числа относительной атомной массе химического элемента, выраженной в а.е.м. Ядро химического элемента с атомным номером *Z*, массовым числом *A* принято обозначать ${}_Z^A X$. Например, ${}_{6}^{12}C$ является символом ядра атома

углерода с атомным номером (зарядовым числом) $Z = 6$, массовым числом $A = 12$.

Обозначается протон через 1_1p , а нейтрон — 1_0n . Протон является также ядром атома водорода, поэтому нередко протон обозначают также через 1_1H . Вместо термина *атомное ядро* широкое применение находит название *нуклиды*.

Изотопы. Массы атомов измерены с большой точностью. При этих измерениях были обнаружены *изотопы* (от греч. *isos* — “одинаковый”, *topos* — “место”). Это *разновидности атомов данного химического элемента, обладающие одинаковым зарядом, но различающиеся массой*. Измерения масс изотопов показывают, что они всегда выражаются в а.е.м. числами, близкими к целым. *Атомные массы изотопов называются изотопными массами*. Например, в природе встречаются следующие изотопы ядра атома аргона с $A = 38$ (с числом нейтронов в ядре $N = 18; 20; 22$): ${}^{36}_{18}Ar$, ${}^{38}_{18}Ar$, ${}^{40}_{18}Ar$. Количество электронов в оболочках одинаково, поэтому химические свойства изотопов также одинаковы, а массы ядер различны, поэтому в их физических свойствах имеются различия.

Один из самых тяжелых элементов в природе — уран — имеет следующие изотопы: ${}^{238}_{92}U$, ${}^{235}_{92}U$, ${}^{234}_{92}U$ и др. У самого легкого элемента водорода — имеются три изотопа: 1_1H ; 2_1H ; 3_1H . Легкий изотоп водорода 1_1H называют *протием*, а изотоп 2_1H — *дейтерием*. (Это вы уже знаете из курса физики 9 класса.) В природном водороде доля дейтерия составляет 0,015%. При соединении дейтерия с кислородом образуется тяжелая вода. Третий изотоп водорода называют *тритием*, и в природе он не встречается.

Ядра с одинаковыми массовыми числами A , но с различными зарядами и Z называются изобарами (т. е. одинаково тяжелыми).

Сейчас известно, что все химические элементы обладают изотопами.



1. Как был открыт протон?
2. Каковы цели экспериментов Чедвика?
3. Что называется массовым числом?
4. Почему в природе не встречаются нейтроны в свободном состоянии?
5. Что называют нуклонами и нуклидами?
6. В чем заключается основное отличие изотопов химического элемента? Сколько протонов и нейтронов содержится в 1 г алюминия?
7. Что называют изобарами?



Упражнение 30

1. Определите состав ядра в атомах бериллия, кремния и брома.
2. Определите химические элементы, в ядрах атомов которых содержатся 7 протонов и 7 нейтронов, 51 протон и 71 нейтрон, 101 протон и 155 нейтронов.
3. Ядра каких элементов получим, если в изотопах ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{16}_8\text{O}$ заменить протоны нейтронами, а нейтроны — протонами?
Ответ: ${}^1_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{16}_{10}\text{Ne}$.
4. Сколько электронов, протонов, нейтронов и нуклонов содержится в следующих нейтральных атомах: а) ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{26}_{12}\text{Mg}$; б) ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$; в) ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$? Что объединяет каждую группу?

Ответ: а) изотопы; б) изобары.

§ 61. Энергия связи нуклонов в ядре



Ключевые понятия:

- ✓ ядерные силы
- ✓ энергия связи
- ✓ дефект массы
- ✓ магические числа

На этом уроке вы:

- узнаете как считать энергию связи ядра и графическую зависимость удельной энергии связи с массовым числом.



Ядерные силы. Из фундаментальных сил взаимодействия во Вселенной мы познакомились с двумя видами сил — гравитационными и электромагнитными. В 9 классе вы получили первые сведения о силах взаимодействия между нуклонами, составляющими атомное ядро. Известно, что между одноименно положительно заряженными протонами в ядре атома действуют громадные электростатические силы отталкивания: $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$.

В ядрах тяжелых элементов, например в ядре урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, имеются 92 протона. Силы отталкивания их друг с другом достигают нескольких тысяч ньютонов. Какая сила удерживает взаимно отталкивающиеся протоны, электрически нейтральные нейтроны в ядре? Из-за наличия масс протонов и нейтронов можно было бы подумать, что их удерживает сила гравитационного взаимодействия $F_\gamma = G_1 \frac{m_p \cdot m_n}{r^2}$. Но расчеты показывают, что сила гравитационного притяжения между двумя протонами в ядре слабее силы их электростатического отталкивания: $\frac{F_\gamma}{F_{эл}} = \frac{1}{10^{36}}$.

Стабильность атомных ядер указывает на то, что в ядре действует особо мощная сила, природа которой резко отличается от известных до того времени сил. Силы, которые не дают разлететься нуклонам и

обеспечивают их особо сильную связь, называются *ядерными силами*. В настоящее время свойства ядерных сил изучены экспериментально довольно хорошо.

1. На расстоянии $r = 10^{-15}$ м от центра протона ядерные силы превышают силы Кулона в 305 раз, а гравитационные силы — в 10^{38} раз. Ядерные силы относят к *сильным взаимодействиям* — самым интенсивным из всех четырех известных видов сил взаимодействия.

2. Ядерные силы *короткодействующие*. С увеличением расстояния они резко падают. На расстоянии $r > 3 \cdot 10^{-15}$ м ядерными силами можно пренебречь. Максимум сил притяжения между нуклонами приходится на $r = 1,41 \cdot 10^{-15}$ м. А на расстоянии $r < 0,5 \cdot 10^{-15}$ м между нуклонами появляются огромные силы отталкивания. Таким образом, ядерные силы являются *силами притяжения*.

3. Опыт показывает, что между парами протон — нейтрон, нейтрон — нейтрон и протон — протон ядерные силы взаимодействия во всех случаях одинаковы. Это означает, что *ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия электрических зарядов у нуклонов*.

4. Ядерные силы обладают свойством *насыщенности*, которое указывает на то, что *в ядре нуклон взаимодействует не со всеми окружающими нуклонами, а только с близлежащими*.

5. Ядерные силы *не являются центральными* (кулоновские силы центральные).

6. Ядерные силы, или сильное взаимодействие в ядре атома, обеспечивают процессы, происходящие с очень большой интенсивностью. Они создают сильное взаимодействие между элементарными частицами. Благодаря сильному взаимодействию атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, устойчиво. *Они обеспечивают устойчивость ядер всех веществ на Земле*. Для объяснения свойств ядерного взаимодействия необходима его теория. Из-за особой сложности ядерных взаимодействий законченной количественной теории ядерных сил пока не существует.

Энергия связи нуклонов в ядре. Измерения показали, что заряд ядра равен сумме зарядов протонов в ядре. Точные измерения, проведенные с помощью масс-спектрографа, показали, что масса ядра атома любого покоящегося химического элемента меньше суммы масс отдельных протонов и нейтронов, составляющих это ядро:

$$M_n < Z \cdot m_p + N \cdot m_n. \quad (61.1)$$

Куда исчезает разность масс? Ответ дает установленная Эйнштейном формула связи между массой и энергией: $E = mc^2$. Чтобы вырвать один нуклон из атомного ядра, необходимо совершить определенную работу против действия ядерных сил, т. е. сообщить ядру значительную энергию. *Минимальная энергия, необходимая для разложения атомного ядра на составляющие его нуклоны, называется энергией связи ядра*.

По закону сохранения энергии точно такая же энергия выделяется при соединении протонов и нейтронов в атомное ядро. Разность масс, появляющаяся при образовании атомного ядра из нуклонов за счет работы ядерных сил притяжения, называется *дефектом масс*. Дефект масс рассчитывается по формуле $\Delta M = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_a$. Теперь можно вычислить энергию связи ядра:

$$E_{св} = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_a) \cdot c^2. \quad (61.2)$$

Учитывая, что в ядерной физике используют атомную единицу массы (а.е.м.) и мегаэлектронвольты (МэВ) для энергии, формулу (61.2) перепишем в этих единицах:

$$E_{св} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_a) \cdot 931,5 \text{ МэВ}.$$

Таким образом, когда из отдельных нуклонов образуется ядро, выделяется энергия, равная энергии связи ядра $E_{св}$. Из-за выделения энергии масса ядра уменьшается на величину дефекта массы:

$$\Delta M = \frac{E_{св}}{c^2}.$$

Энергия связи ядра является одной из важнейших величин, характеризующих стабильность ядра. Наряду с ней в ядерной физике используют понятие *удельная энергия связи*.

Удельной энергией связи называется отношение энергии связи ядра к массовому числу A , т.е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$E_{у.св} = \frac{E_{св}}{A}. \quad (61.3)$$

Удельные энергии связи в различных атомах различны. Зависимость удельной связи нуклонов в ядре от массового числа A показана на рисунке 61.1. С ростом массового числа A удельная энергия связи начинает расти от значения $1,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ для ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ до значения $8,8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ для изотопа железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$. Ядра элементов с максимальными удельными энергиями связи являются самыми стабильными. Далее с ростом массового числа A удельная энергия связи начинает уменьшаться, например, для протона урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ удельная энергия связи:

$$E_{у.св} = 7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}.$$

Уменьшение удельных энергий связи нуклонов у тяжелых элементов вызвано увеличением числа протонов, а это, в свою очередь, приводит к увеличению кулоновских сил отталкивания между ними. Следует заметить, что энергия связи нуклонов в ядре в сотни тысяч раз больше энергии связи электронов в атоме.

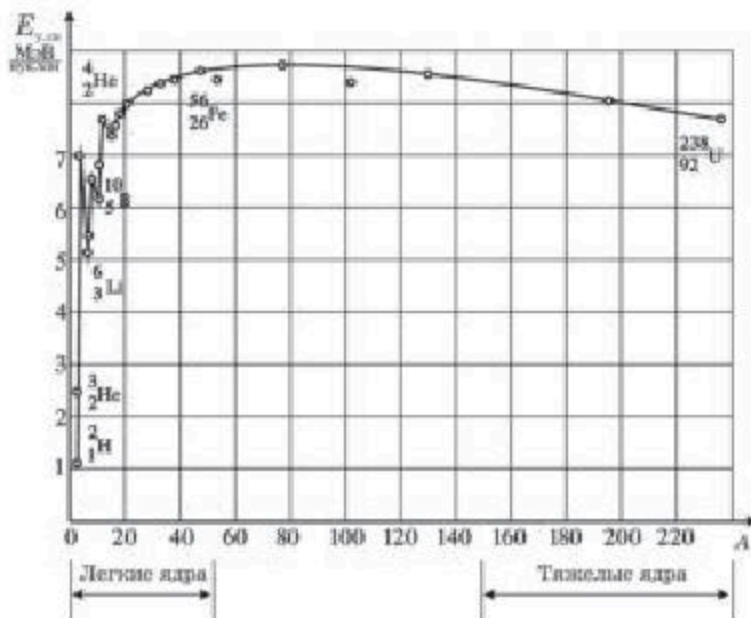


Рис. 61.1

Уменьшение удельных энергий связи у легких элементов связано с поверхностными явлениями. У нуклонов, расположенных ближе к поверхности ядра, по сравнению с нуклонами внутри ядра меньше соседних нуклонов, с которыми они взаимодействуют, так как ядерные силы короткодействующие. Поэтому у нуклонов, расположенных на поверхности ядра, удельная энергия связи меньше, чем у нуклонов, расположенных внутри ядра. У малых по объему ядер большая часть нуклонов расположена на поверхности ядра, поэтому у легких ядер удельная энергия связи мала.

Уменьшение удельной энергии связи у тяжелых ядер ($Z > 82$) связано с ростом числа протонов, что ведет к усилению кулоновских сил отталкивания. Значит, ядра тяжелых элементов являются менее устойчивыми. Кулоновские силы стараются разрушить ядро. Ядра, число протонов или нейтронов которых равно так называемым *магическим числам* 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, являются более устойчивыми. А если числа и протонов, и нейтронов являются магическими числами, то такие ядра называются *дважды магическими ядрами*, которые очень устойчивы:



Устойчивость магических ядер можно объяснить с помощью оболочечной модели ядра.



1. Какие силы удерживают нуклоны в ядре?
2. Каковы главные особенности ядерных сил?
3. Что называется дефектом массы?
4. Что характеризует энергия связи ядра?
5. Что называется удельной энергией связи?
6. Почему ядро цинка более устойчиво, чем ядро урана?



Упражнение 31

1. Докажите эквивалентность формул для вычисления дефекта массы: $\Delta M = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{я}}$, $\Delta M = ZM_H + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{а}}$, где $M_{\text{я}}$ — масса ядра; $M_{\text{а}}$ — масса атома.

2. Дефект массы ядра бора ${}^{11}_5\text{B}$ выразите в килограммах и атомных единицах массы.

Ответ: 0,08186 а.е.м., $1,359 \cdot 10^{-28}$ кг.

3. Найдите энергию связи ядра гелия ${}^4_2\text{He}$.

Ответ: 28,3 МэВ.

4. Найдите энергию связи ядра лития ${}^7_3\text{Li}$.

Ответ: 39,3 МэВ.

5. Какую минимальную работу надо совершить, чтобы разложить ядро кальция ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ на протоны и нейтроны?

Ответ: 3421 МэВ.

6. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в ядре лития ${}^6_3\text{Li}$.

Ответ: $5,33 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

7. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в ядре железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$.

Ответ: $8,79 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

8. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в нуклиде урана ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Ответ: $7,68 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

9. Энергия связи дейтерия ${}^2_1\text{H}$ составляет 2,23 МэВ. Определите массу ядра и массу нейтрального атома (в а.е.м).

Ответ: 2,01356 а.е.м; 2,01411 а.е.м.

10. Энергия связи ядра одного из изотопов бериллия превышает энергию связи ядра его изотопа ${}^9_4\text{Be}$ на $\Delta E_{\text{св}} = 38,6$ МэВ, а разность масс их атомов составляет $\Delta M = 5,00188$ а.е.м. Определите неизвестный изотоп бериллия.

Ответ: ${}^{14}_4\text{Be}$.

11. На сколько энергия связи ядра изотопа углерода больше энергии связи ядра его другого изотопа ${}^{12}_6\text{C}$, если разность масс соответствующих атомов этих изотопов составляет 3,0106 а.е.м?

Ответ: 14,6 МэВ.

§ 62. Методы регистрации ионизирующих излучений

Основной метод регистрации ионизирующих частиц и γ -квантов основан на их взаимодействиях с веществом, возбуждении атомов и их ионизации.

Метод фотоэмульсии. Исследуя ионизацию фотоэмульсии на фотопластинке α -частицами, вылетающими из солей урана, в 1886 г. Беккерель открыл естественную радиоактивность. Ясно, что фотоэмульсия, которую мы применяем в фотоаппарате, здесь непригодна, так как слой ее фотоэмульсии всего лишь 10—20 мкм. Для регистрации быстро движущихся заряженных частиц используют фотопластинки со слоем фотоэмульсии толщиной 0,5—1 мм. В слое фотоэмульсии имеется громадное количество мельчайших кристаллов бромистого серебра. Высокоэнергетичная заряженная частица, пролетая через слой эмульсии, ионизирует атомы брома и тем самым создает невидимые центры изображений. После проявления металлическое серебро снова восстанавливается, первичная частица и заряженные частицы, продукты ядерного взаимодействия создают вдоль траектории цепочку серебряных зерен — *трек-частицу* (от англ. *track* — “след, путь”) (рис. 62.1). По толщине и длине на фотографии можно определить энергию, массу и заряд. Преимущество фотоэмульсионного метода заключается в том, что он, непрерывно регистрируя происходящие процессы, дает суммарный результат.

Сцинтилляционный счетчик. Быстро движущиеся заряженные частицы с высокой энергией при падении на поверхность люминесцентного кристалла (NaI, ZnS и др.) вызывают кратковременные вспышки света, или так называемую *сцинтилляцию*. Подсчитывая эти вспышки, можно определить число заряженных частиц, взаимодействующих с веществом. *Простое устройство, регистрирующее отдельные α -частицы, называется спинтарископом.* Его устройство показано на рисунке 62.2. Альфа-радиоактивный препарат находится на острие. Вблизи него расположен покрытый сульфидом цинка экран 1. Вылетающие из препарата α -частицы при соударении с кристаллом сульфида цинка вызывают вспышки света, которые можно наблюдать через короткофокусный окуляр. В настоящее время для подсчета сцинтилляции используют очень чувствительные фотоэлементы — *фотоэлектрические умножители (фотоумножители)*. Схема такого сцинтилляционного счетчика изображена на рисунке 62.3. Сцинтилляции, вызванные α -, β -частицами и

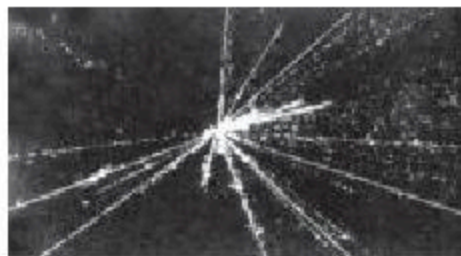


Рис. 62.1

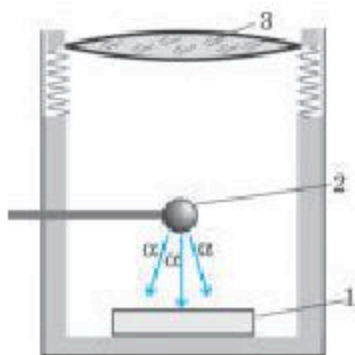


Рис. 62.2

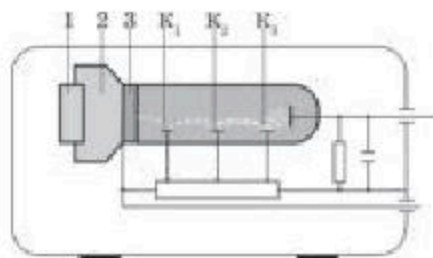


Рис. 62.3

γ -квантами, невозможно наблюдать визуально (просто глазом), для них используют фотоэлектронные умножители.

Люминесцентный экран (1) с помощью световода соединен с катодом (2) фотоэлектронного умножителя. Попадание заряженной частицы или γ -кванта на сцинтилляционный кристалл вызывает вспышку света. Фотоны, которые вдоль световода действуют на фотокатод, выбивают электроны с его поверхности, а фотоэлектроны, в свою очередь, бомбардируют K_1 катод, который подключен к источнику напряжения, и с поверхности катода выбивают вторичные электроны. Ускоренные электрическим полем фотоэлектроны попадают на катод K_2 , из которого также вырываются электроны. Число вторичных электронов увеличивается лавинообразно, появляется импульс электрического тока. Он усиливается и регистрируется.

Исследуя амплитуду электрического импульса, можно исследовать энергетический спектр падающих частиц.

Газоразрядный счетчик Гейгера. Немецкие ученые Х. Гейгер и Э. Мюллер изобрели газоразрядный счетчик, который используется для регистрации α - и β -частиц, а также высокоэнергетических γ -квантов. Счетчик Гейгера—Мюллера (рис. 62.4)

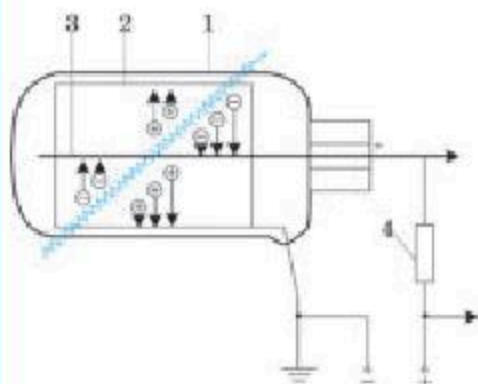


Рис. 62.4

состоит из стеклянной трубки (1), внутренняя поверхность которой покрыта металлом (2) — (катод), и протянутой по оси трубки тонкой металлической нити (3 — анод). Рабочий объем трубки наполнен разреженной до 100—200 мм рт. ст. газовой смесью, обычно метилового спирта и аргона. Между катодом и анодом поддерживается высокое постоянное напряжение.

Принцип работы счетчика основан на ионизации атомов смеси при столкновении с проникающими частицами. Летящая по рабочему объему заряженная частица выбивает электрон у атома газа и рождает положительные ионы и свободные электроны. Под действием электрического поля свободные электроны устремляются к аноду, а положительные ионы — к катоду. Вблизи анода напряженность электрического поля высока, поэтому электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов. Возникает лавина ионов и электронов, в счетчике импульс тока резко возрастает. Импульс тока, полученный резистором (4), через усилитель передается регистрирующему прибору. Раздается треск, и с помощью электронно-счетных устройств можно узнать число регистрируемых частиц. В момент регистрации частицы лавинный разряд гаснет, так как сопротивление резистора порядка 10^8 — 10^9 Ом, на нем напряжение большое. Из-за этого напряжение между катодом и анодом падает, ионизация газов прекращается. После гашения импульса тока напряжение между катодом и анодом снова нарастает. Счетчик автоматически готов к приему следующей частицы.

Из-за низкой ионизирующей способности счетчик Гейгера непосредственно не регистрирует γ -кванты. Для их регистрации внутреннюю поверхность стеклянной трубки покрывают металлом, из которого γ -кванты легко выбивают электроны. Недостатком счетчика Гейгера — Мюллера является то, что он не может определить энергию частицы. Поэтому созданы другие виды счетчиков, работающие на других принципах.

Камера Вильсона. Английский ученый Ч. Вильсон в 1912 г. изобрел прибор, который является замечательным устройством для наблюдения за заряженными частицами и фотографирования их следа, или треков. Камера Вильсона имеет цилиндрическую форму с поршнем (5) (рис. 62.5), герметически закрываемый сосуд. Верхняя часть сосуда (2) стеклянная. В сосуде имеются чистый, без каких-либо примесей, воздух и близкие к насыщению пары спирта или воды.

Принцип работы камеры Вильсона основан на том, что заряженная частица, попадая в перенасыщенный пар, конденсирует его, и тем самым вдоль траектории частицы образуется цепочка капелек жидкости. Когда поршень резко опускается, воздух и пар в камере адиабатически очень быстро расширяются, и пар, охлаждаясь, переходит в перенасыщенное состояние. Это неустойчивое состоя-

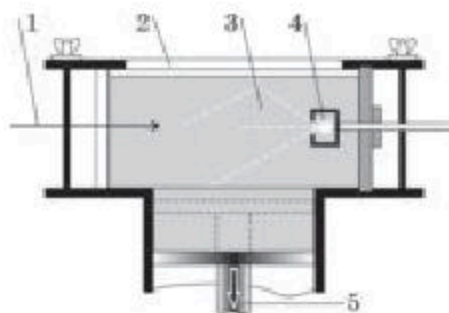


Рис. 62.5



Рис. 62.6

ние, когда пар легко конденсируется. Заряженные частицы, вылетевшие из радиоактивного препарата (4), создают на своем пути цепочку ионизированных газовых молекул. Эти ионы и становятся центрами конденсации. Перенасыщенный пар конденсируется на этих ионах, и образуется цепь водяных капель. Эти капельки делают видимой траекторию, частицы создают *трек-частицы*. Осветив камеру, можно увидеть трек и сфотографировать его. После этого камеру возвращают в начальное состояние, а электрическое поле нейтрализует ионы. Перед следующим адиабатическим расширением электрическое поле отключают.

Располагая камеру Вильсона в однородном магнитном поле, расширяют возможности определения физических характеристик регистрируемых частиц. Этот метод предложили русские ученые П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын. Траектории заряженных частиц в магнитном поле под действием силы Лоренца искривляются (рис. 62.6). Чем больше заряд частицы, тем меньше масса частицы и тем больше кривизна траектории. По радиусу кривизны траектории и известной скорости движения определяют отношение заряда частицы к ее массе. Если известен заряд частицы, можно определить ее массу. У более энергичных частиц более длинный трек. Чем толще трек, тем больше заряд частицы.

Пузырьковая камера. По строению пузырьковая камера похожа на камеру Вильсона. Разница состоит в том, что вместо перенасыщенного пара в пузырьковой камере применяется перегретая жидкость. Пузырьковую камеру в 1952 г. создал американский физик Д. Глейзер. Для наполнения пузырьковых камер используют пропан, жидкий водород, дейтерий, ксенон и другие жидкости. В начальном состоянии жидкость в закрытом сосуде хотя и нагрета до температуры кипения, но высокое давление мешает закипанию. При резком уменьшении давления жидкость переходит в перегретое состояние и некоторое время находится в неустойчивом состоянии. Именно в этот момент быстро движущиеся заряженные частицы, проникающие через тонкое стекло на стенки камеры, создают на своем пути цепочку ионов. Ионы имеют избыток кинетической энергии, за счет которого вокруг каждого иона в микрообъеме температура жидкости повышается, и она вскипает. Пузырьки пара показывают следы частиц, или треков (рис. 62.7).

Плотность жидкости в пузырьковой камере в несколько тысяч раз больше, чем плотность пара в камере Вильсона. Поэтому пузырьковая камера дает возможность регистрировать частицы с высокой энергией. Причина этого в том, что длина пробега частиц будет очень короткой. Камера Глейзера дает возможность наблюдать взаимодействие быстродействующих частиц с атомными ядрами и цепные превращения частиц. Кроме того, очень высока эффективность исследований.



Рис. 62.7



1. Как регистрируют заряженные частицы методом толстослойных фотоэмульсий?
2. Каков принцип работы сцинтилляционного счетчика?
3. В чем эффективность камеры Вильсона?
4. На каком явлении основан принцип работы счетчика Гейгера — Мюллера? Какие частицы регистрируют с помощью счетчика?
5. Для чего камеру Вильсона располагают в однородном магнитном поле?
6. Есть ли преимущества пузырьковой камеры перед камерой Вильсона?
7. Какой метод устройства дает наибольшую информацию при регистрации ионизирующих частиц, γ -квантов?

§ 63. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность



Ключевые понятия:

- ✓ ядерная реакция
- ✓ составные ядра
- ✓ искусственная радиоактивность
- ✓ экзотермическая реакция
- ✓ эндотермическая реакция

На этом уроке вы:

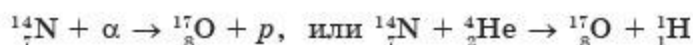
- научитесь использовать законы сохранения массового и зарядного числа при написании ядерных реакций.



Диапазон ядерных реакций широк: как правило, к ним относят любые явления, возникающие при столкновениях с участием ядерных взаимодействий между двумя или более элементарными частицами. Ясно, что столкновения с участием ядер также относятся к ядерным реакциям. Иногда под *ядерными реакциями* понимают лишь такие превращения с участием ядер. В ядерной физике изучают как ядра, так и элементарные частицы, поэтому понятие *ядерная реакция* используют в более широком смысле.

Преобразования, возникающие при взаимодействии атомного ядра с другими ядрами, элементарными частицами и γ -квантами, называются ядерными реакциями. Ядерную реакцию записывают как $a + A \rightarrow B + b$ или в краткой форме как $A(a, b)B$. Здесь A — начальное ядро, или мишень-ядро; a — бомбардирующая частица; B — производное ядро; b — частица, выделившаяся из ядра.

Как уже отмечалось в § 61, первую ядерную реакцию осуществил Э. Резерфорд. В 1919 г., бомбардируя α -частицами ядро азота, он получил ядро кислорода, тем самым осуществив первую ядерную реакцию:



Известно, что и при естественном радиоактивном распаде ядро атома превращается в производное ядро. И при ядерной реакции происходят такие же процессы. При внешней схожести их главное различие состоит в том, что радиоактивный распад происходит без внешних воздействий, самопроизвольно, а ядерная реакция осуществляется под воздействием бомбардирующей частицы.

Закон сохранения энергии в ядерных реакциях. В ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и числа нуклонов. Используя законы сохранения, можно заранее предсказать, как будут проходить ядерные реакции.



Выполняются ли законы сохранения электрического заряда и числа нуклонов в первой ядерной реакции, осуществленной Резерфордом? Проверьте.

Механизм ядерной реакции. Для осуществления ядерной реакции необходимо, чтобы частицы или ядра достигли области ядерных взаимодействий, т. е. они должны сблизиться до расстояния порядка 10^{-15} см. Для того чтобы положительно заряженная частица или ядро приблизились к ядру-мишени, следует иметь достаточную кинетическую энергию для преодоления кулоновских сил отталкивания. Таким незаряженным частицам, как нейтрон, нет необходимости иметь большую кинетическую энергию, поэтому открытие нейтрона стало поворотным в ядерных исследованиях.

Энергию от десятков МэВ до сотен ГэВ, необходимую для осуществления реакции, заряженные частицы и атомные ядра получают в процессе ускорения в электрических или магнитных полях, специальных ускорителях заряженных частиц (циклотронах, синхрофазотронах и т. д.).

Когда энергия бомбардирующих частиц не слишком высока, реакция проходит, как предположил Н. Бор в 1936 г. при объяснении механизма ядерных реакций, в два этапа. Сначала при столкновении падающей частицы с ядром-мишенью ядро захватывает ее (рис. 63.1). В результате этого образуется возбужденное *составное ядро*. Вследствие слитного взаимодействия энергия возбуждения ядра быстро распределя-

ется между всеми нуклонами. Теперь энергии каждого нуклона недостаточно для выхода из ядра. В процессе взаимодействия нуклоны начинают обмениваться энергией друг с другом. Вдруг в какой-то момент у одного или группы нуклонов оказывается энергия, которая больше, чем энергия связи ядра. Поэтому начинается второй этап ядерной реакции, во время которого составное ядро распадается.

Распад ядра может быть различным: *протонным, нейтронным, γ -квантовым* и др. Такие типы ядерных реакций происходят в процессе бомбардировки ядер-мишеней протонами, дейтронами (ядра тяжелого водорода), α -частицами и многозарядными ионами тяжелых элементов.

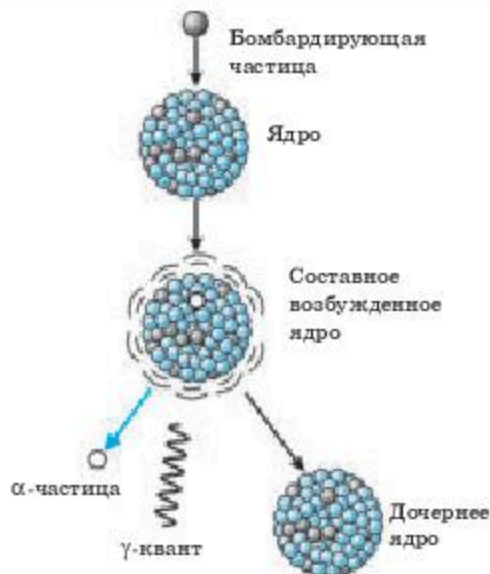
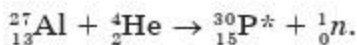


Рис. 63.1

Искусственная радиоактивность. В процессе ядерных реакций появляются радиоактивные ядра, которые в природе вообще не существуют. Радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций, открыли в 1934 г. французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они назвали это явление *искусственной радиоактивностью*. Бомбардируя ядра алюминия, бора и других легких элементов и изучая продукты реакции с помощью камеры Вильсона в магнитном поле, они констатировали вылет позитронов, который продолжался и после прекращения бомбардировок α -частицами. Но их число со временем уменьшалось по закону радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Так было открыто явление *искусственной радиоактивности*.

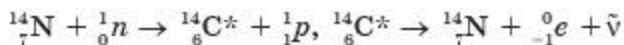
Открытие искусственной радиоактивности осуществилось с помощью следующей реакции:



Радиоактивный изотоп фосфора оказался источником β^- -лучей. Его ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:



Напишем реакцию, реализуемую при бомбардировке ядра β^- -радиоактивного азота нейтроном:



При бомбардировке быстрыми протонами ядра лития впервые осуществилась реакция распада его ядра: ${}_{3}^7\text{Li} + {}_1^1p \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$

В последнее время открыт еще один вид радиоактивности — *протонная радиоактивность*. В этом процессе из ядра самопроизвольно вылетает протон.

Область применения искусственных радиоактивных изотопов достаточно широка: медицина, промышленность, военные цели, долговременные источники тока и т. д.

Преобразование энергии в ядерных реакциях. В ядерных реакциях ядерные превращения сопровождаются изменением внутренней энергии, т. е. энергии связи. Используя закон взаимосвязи массы с энергией, можно рассчитать изменения энергии в ядерных реакциях. Напишем закон сохранения энергии для ядерных реакций: $E_{01} + E_{к1} = E_{02} + E_{к2}$, где E_{01} и E_{02} — энергии покоя системы до и после реакции; $E_{к1}$ и $E_{к2}$ — соответственно их кинетические энергии.

Чтобы описать энергии реакции, протекающей по схеме $A + a \rightarrow B + b$, воспользуемся формулой:

$$E_{01} = M_A c^2 + m_a c^2; E_{к1} = E_{кА} + E_{кa}; E_{02} = M_B c^2 + m_b c^2; E_{к2} = E_{кВ2} + E_{кb}.$$

После преобразований получим: $\Delta E = E_{01} - E_{02} = E_{к2} - E_{к1}$.

Разность энергии связи частиц и ядер до реакции и после реакции называется энергетическим выходом ядерной реакции. Если $\Delta E > 0$, то во время реакции выделяется энергия, за счет энергии покоя кинетическая энергия продуктов реакции растет. *Изменение кинетической энергии во время ядерной реакции равно изменению энергии покоя частиц и ядер, участвующих в ядерной реакции.* Такая реакция называется *экзотермической*. А если $\Delta E < 0$, то реакция проходит с поглощением энергии, за счет уменьшения кинетической энергии энергия покоя (масса) повышается. Такая реакция называется *эндотермической*.

Во время ядерной реакции выделяется огромная энергия. Повышение безопасности и эффективности применения ядерной энергии на благо человечества является одной из сложных проблем, стоящих перед современной наукой.



1. Что называется ядерной реакцией?
2. Напишите уравнение ядерной реакции. Какие законы сохранения выполняются во время ядерной реакции?
3. В чем заключается разница между естественной радиоактивностью и ядерной реакцией?
4. Объясните механизм ядерной реакции.
5. Какими частицами выгодно осуществлять ядерные реакции?
6. Что называется энергией ядерной реакции?
7. Почему во время ядерной реакции выделяется огромная по сравнению с химической реакцией энергия?
8. Как получают искусственную радиоактивность?

Примеры решения задач

1. При бомбардировке ядер бора (${}^{11}_5\text{B}$) протонами появляются ядра бериллия (${}^8_4\text{Be}$). Напишите уравнение реакции. Энергия в этой реакции выделяется или поглощается?

Дано:

$$M_{{}^{11}_5\text{B}} = 11,0931 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{{}^1_1\text{H}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{{}^8_4\text{Be}} = 8,00538 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta E = ?$$

Решение. ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} = {}^8_4\text{Be} + {}^A_Z\text{X}$. По закону сохранения заряда: $5 + 1 = 4 + Z$; $4Z = 2$; по закону сохранения массового числа: $11 + 1 = 8 + A$; $A = 4$. Значит, ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$. Напишем выход энергии реакции: $\Delta E = E_{\text{от}} - E_{\text{оз}}$, или $\Delta E = [(M_{\text{B}} + M_{\text{H}}) - (M_{\text{Be}} + M_{\text{He}})] \cdot 931,5 \text{ МэВ}$.

Подставим численные значения:

$$\Delta E [(11,00931 + 1,00783) - (8,00531 + 4,00260)] \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 0,00923 \cdot 931,5 \text{ МэВ} \approx 8,6 \text{ МэВ.}$$

В результате реакции выделяется $\Delta E = 8,6 \text{ МэВ}$ энергии.

2. Найдите минимальную энергию γ -кванта, достаточную для осуществления реакции: ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$.

Дано:

$$M_{{}^2_1\text{H}} = 2,01410 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{\text{н}} = 1,00866 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{\text{p}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}$$

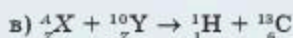
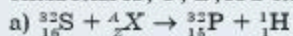
$$\Delta E_{\gamma} = ?$$

Решение. $\Delta E_{\gamma} = [M_{{}^2_1\text{H}} - (M_{\text{н}} + M_{\text{p}})] \cdot 931,5 \text{ МэВ}$,
 $\Delta E_{\gamma} = [2,01410 - 2,01649] \cdot 931,5 \text{ МэВ}$.
 $\Delta E_{\gamma} = -2,2 \text{ МэВ}$, энергия поглощается.
 Значит, энергия γ -кванта должна быть равной $\Delta E_{\gamma} = -2,2 \text{ МэВ}$.



Упражнение 32

1. Воспользовавшись таблицей Менделеева, найдите неизвестные символы X, Y, Z, A в следующих ядерных реакциях и допишите их:

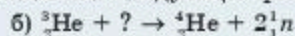
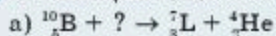


Ответ: а) ${}^1_0\text{n}$; б) ${}^{38}_{19}\text{K}$; в) ${}^4_2\text{He}$; г) ${}^9_4\text{Be}$.

2. В результате захвата нейтрона ядром азота ${}^{14}_7\text{N}$ образуются неизвестный элемент и α -частица. Запишите реакцию и определите неизвестный элемент.

Ответ: ${}^{11}_5\text{B}$.

3. С помощью каких частиц осуществляются следующие реакции?



Ответ: ${}^1_0\text{n}$; ${}^3_2\text{He}$.

4. Рассчитайте энергетический выход ядерной реакции: ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_1\text{H}$

Ответ: 2,3 МэВ.



5. Поглощается или выделяется энергия в следующей ядерной реакции?



Ответ: 15 МэВ.

6. Энергия эндотермической реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{15}_7\text{N}$ равна $\Delta E = -7,89$ МэВ. Зная массы нейтральных атомов из таблицы, определите массу изотопа азота.

Ответ: 17,00899 а.е.м.

§ 64. Деление тяжелых ядер



Ключевые понятия:

- ✓ деление ядер
- ✓ капельная модель ядра
- ✓ спонтанное деление

На этом уроке вы:

- на основе капельной модели ядра узнаете о реакции деления ядер.



Среди ядерных реакций особо важное значение имеет деление тяжелых ядер, особенно урановых, под воздействием внешних факторов. Причина этого в том, что в атомном ядре сосредоточена колоссальная по мощности энергия. Внутреннюю энергию ядра можно выделить двумя путями: 1) реакцией деления тяжелых ядер; 2) реакцией синтеза легких ядер.

Реакция деления урановых ядер. Исследовательские работы по изучению искусственной радиоактивности в результате реакции при бомбардировке нейтронами атомных ядер были начаты Э. Ферми в 1934 г.

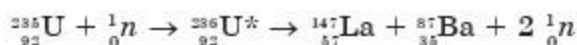
Во время бомбардировки нейтронами ядер урана и Жолио-Кюри, и П. Савич в 1938 г. обнаружили, что одним из продуктов ядерных реакций было ядро атома *лантана* (La). В том же году немецкие физики О. Хан и Ф. Штрассман во время бомбардировки нейтронами ядер урана установили, что появляются два новых, вдвое легче урана, элемента: *барий* Ba и *криптон* Kr, расположенные в середине таблицы Менделеева. Эти результаты в 1939 г. английским ученым О. Фришем и австрийской ученой Л. Мейтнер были объяснены тем, что, захватив нейтрон, ядро урана делится на два осколка. Эти явления назвали *делением ядер*.

Механизм деления ядер. В 1939 г. Я. Френкель, Н. Бор и Дж. Уиллер для объяснения механизма деления ядер предложили “капельную модель ядра”. Нуклиды можно принять как несжимаемую каплю заряженной жидкости (рис. 64.1). Ядро урана-235 по форме напоминает шар. Поглотив нейтрон, ядро (1) превращается в составное ядро (2).

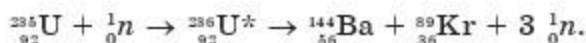
Получив избыток энергии за счет кинетической энергии и энергии связи, составное ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (3). При этом его объем не изменяется, а площадь поверхности растет. Поверхностная энергия жидкости прямо пропорциональна площади ее поверхности. Поверхностная энергия увеличивается, деление энергетически невыгодно. Поэтому поверхностные силы стараются придать жидкости первоначальную шаровидную форму. Кулоновские силы отталкивания между протонами, наоборот, стремятся еще более вытянуть ядро.

Если растет расстояние между нуклонами, значит, кулоновские силы отталкивания уменьшаются, и им было бы выгодно разделиться. Ядро начинает интенсивно колебаться, и если энергия возбуждения повышается, то кулоновские силы отталкивания начинают превышать силы притяжения между нуклонами. В результате ядро делится на два осколка, которые под действием силы отталкивания разлетаются с большими скоростями ($\frac{1}{30}c$).

Деление ядра происходит из-за превышения массы покоя ядра над суммой масс покоя осколков, появляющихся при делении ядра. Выделяется энергия, эквивалентная уменьшению массы покоя. Полная масса сохраняется, так как массы осколков, движущихся с огромными скоростями, превышают их массы покоя. Так как у тяжелых ядер избыток числа нейтронов, то при делении ядер наряду с осколками вылетают и нейтроны. Этот факт имел большое значение. При делении каждого ядра выделяются два или три нейтрона. Напишем реакцию деления ядра урана-235:



или



Здесь ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ — возбужденное составное ядро.

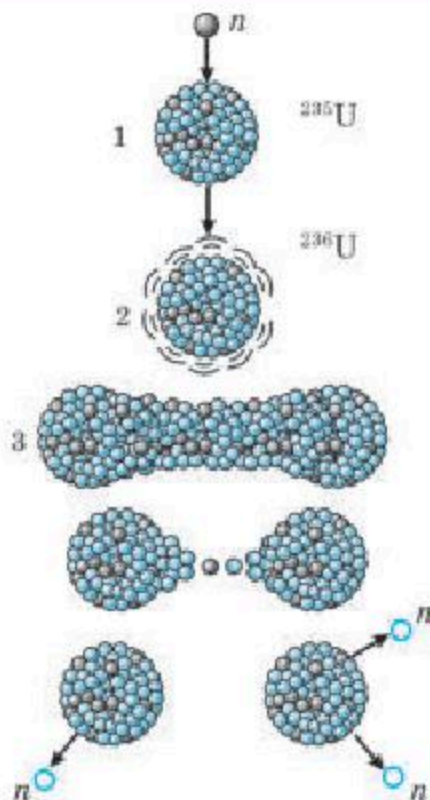


Рис. 64.1

Удельная энергия связи ядра урана $7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, а осколков — $8,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Разность удельных энергий связи $0,9 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Значит, при делении одного ядра урана выделяется энергия 200 МэВ. Прямые измерения показали правильность расчетов. Большая часть освобожденной энергии (≈ 165 МэВ) — это кинетические энергии осколков, остальную часть уносят нейтроны и появляющиеся при делении γ -кванты.

Энергии свободных нейтронов лежат в широком диапазоне — от незначительной — $5 \cdot 10^{-3}$ эВ до нескольких миллионов эВ. Массы осколков деления в большинстве случаев соотносятся как 2:3. У осколков образуется избыток нейтронов, поэтому они высоко-радиоактивны.

После нескольких β -распадов образуется ядро стабильного изотопа. Русские физики Г. Флеров и К. Петражак в 1940 г. открыли *спонтанное деление ядер урана*. Ядро урана может делиться самопроизвольно, т. е. без внешних воздействий — бомбардировок нейтронами.

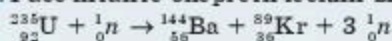


1. Какую реакцию называют делением ядер?
2. Как можно объяснить деление урана на основе "капельной модели ядра"?
3. Почему при делении ядра урана выделяется такая огромная, порядка 200 МэВ, энергия?
4. Почему при делении ядра вылетают несколько нейтронов?
5. Почему осколки подвергаются β -распадам? После скольких β -распадов осуществится преобразование ${}_{56}^{143}\text{Ba} \rightarrow {}_{50}^{143}\text{Na}$?



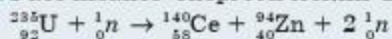
Упражнение 33

1. Рассчитайте энергетический выход ядерной реакции:



Ответ: ≈ 188 МэВ.

2. Рассчитайте энергетический выход следующей ядерной реакции:



Ответ: ≈ 208 МэВ.

3. При делении одного ядра урана-235 на два осколка выделяется 208 МэВ энергии. Какое количество керосина должно сгореть, чтобы выделилось столько же энергии, сколько выделяется при делении 1 г урана-235? Удельная теплота сгорания керосина $4,3 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Ответ: 2 т.

- *4. При делении ядер изотопа урана-235 появляются два осколка с массовыми числами 92 и 138. Сколько нейтронов выделяется в реакции? Считая, что общая кинетическая энергия осколков 158 МэВ, определите кинетическую энергию каждого осколка. Кинетическую энергию нейтронов можно не учитывать.

Ответ: 94,8 МэВ; 63,2 МэВ.

§ 65. Цепные ядерные реакции



Ключевые понятия:

- ✓ цепные реакции деления
- ✓ замедлители
- ✓ тепловые нейтроны
- ✓ коэффициент размножения
- ✓ критическая масса
- ✓ атомная бомба

На этом уроке вы:

- используете законы сохранения массового и зарядного чисел при написании ядерных реакций;
- поймете природу ядерного синтеза и естественного радиоактивного распада.



Деление тяжелых ядер под воздействием нейтронов имеет важную особенность: при ядерной реакции деления высвобождается несколько нейтронов. Например, при делении каждого ядра урана-235 в среднем выделяются два-три нейтрона, которые называют *производными*, или *вторичными нейтронами*. Теперь представьте, что эти нейтроны, выделившиеся при делении, поделят соседние два ядра, а выделившиеся из двух ядер нейтроны совершат деление соседних четырех ядер и т. д. Так будет продолжаться, и число нейтронов, и число подвергнутых делению ядер будет лавинообразно возрастать. *Явление лавинообразного роста числа деления ядер называется цепной реакцией деления ядер.*

Цепной ядерной реакцией называется процесс, в котором определенная ядерная реакция вызывает такие же последующие реакции.

На рисунке 65.1 показано развитие цепной реакции деления уранового ядра. Для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые тяжелые ядра, способные к делению с помощью нейтронов. Причина заключается в том, что энергия большинства нейтронов, освобожденных при делении, равна порядка 1 — 4 МэВ. В этот момент их скорости достигают величины $v = 10^7$, поэтому их называют *быстрыми нейтронами*.

Природный уран является в основном смесью двух изотопов: $^{238}_{92}\text{U}$. Изотоп урана-238 составляет 99,3%

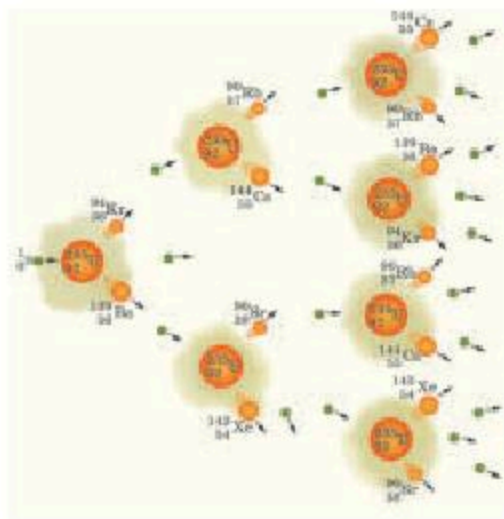


Рис. 65.1

этой смеси, а остальную часть — 0,7% — изотоп урана-235. Ядра изотопа урана-238, поглощая нейтроны, необязательно делятся. Обычно лишь один из пяти нейтронов вызывает деление.

Чтобы повысить вероятность совершения реакций деления с малочисленными ядрами урана-235, необходимо уменьшить скорость быстрых нейтронов. Это осуществляется с помощью веществ, называемых *замедлителями*. Хорошими замедлителями являются обыкновенная вода, тяжелая вода (H_2O) и графит. При столкновении с их ядрами энергии нейтронов уменьшаются. Нейтроны со скоростями, равными скорости теплового движения молекул при комнатной температуре $v \approx 2000 \frac{m}{c}$, называются *тепловыми (медленными) нейтронами*. Вероятность распада ядер урана-235 с помощью тепловых нейтронов в сотни раз выше вероятности деления с помощью быстрых нейтронов. Для непрерывности цепной ядерной реакции необходимо, чтобы среднее число вторичных нейтронов во времени не изменялось. Но не все нейтроны, которые появились в процессе деления, вызовут ядерные реакции деления, некоторые захватывают ядра, не производя деления, некоторые рассеиваются в окружающую среду.

Физическую величину, характеризующую степень размножаемости нейтронов, называют коэффициентом размножения нейтронов. Коэффициентом k размножения нейтронов называется отношение числа нейтронов в любом поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении.

Если $k = 1$, то число нейтронов остается неизменным во времени, и цепная реакция протекает стационарно и равномерно. А если $k > 1$, то нарастает скорость цепных реакций, и произойдет ядерный взрыв. Если $k < 1$, то число нейтронов со временем падает, и цепная реакция гаснет.

Критическая масса. Чтобы цепная реакция проходила непрерывно в постоянном темпе, необходимо учесть еще одно обстоятельство. Существует определенная масса урана, при которой цепная реакция проходит равномерно. Если масса урана меньше, чем эта масса, то нейтроны, не встречая на своем пути достаточного количества ядер, рассеиваются в окружающей среде. Цепная реакция гаснет.

Минимальную массу делимого вещества (урана), обеспечивающую постоянное равномерное протекание цепной ядерной реакции, называют критической массой. Для чистого урана-235 критическая масса близка к 50 кг. Радиус шара, сделанного из такой массы урана плотностью 18950 кг/м^3 , приблизительно равен 8,5 см. Для плутония-239 (для массы размером с теннисный шар) критическая масса — 5,6 кг.

Атомная бомба (А-бомба). Результатом неуправляемой цепной ядерной реакции будет ядерный взрыв, освобождающий немислимо мощную энергию. Для осуществления такого взрыва служит атомная бомба, в которой применяют чистый уран-235 или плутоний-239. В бомбе металлический уран состоит из двух частей, каждая из которых по массе меньше критической, поэтому цепная ядерная реакция не может осуществиться.

С помощью обычного взрывчатого вещества обе части урана резко объединяют, что способствует быстротечной цепной ядерной реакции — бомба взрывается. За мгновение температура достигает миллионов градусов, появляется ослепительно яркий свет. Уран и другие вещества превращаются в газы. Сверхтемпературный газовый шар быстро увеличивается, сжигает и разрушает все вокруг себя. Продукты реакции при атомном взрыве высокордиоактивны и опасны для окружающей среды.

Первые атомные бомбы были созданы в 1945 г. в США и сброшены в том же году на города Японии: 6 августа на Хиросиму и 9 августа на Нагасаки. В атомной бомбе, сброшенной на Хиросиму, масса урана была приблизительно равна 1 кг. Освобожденная энергия эквивалентна взрыву 20000 т тринитротолуола.

Единственный путь избежать ядерного столкновения и сохранить жизнь на Земле — это уничтожение всего запаса ядерных боеприпасов.

Республика Казахстан полностью избавилась от ядерного оружия и является одним из мировых лидеров по нераспространению ядерного оружия.



1. Как осуществляется цепная ядерная реакция?
2. На какие типы делятся нейтроны по своим энергиям?
3. Почему не происходит цепная ядерная реакция в уране-238?
4. Что называется коэффициентом размножения нейтронов? Каково его влияние на прохождение цепной ядерной реакции?
5. Что называется критической массой?
6. Какую опасность представляет атомная бомба для человечества?



Почему при взрыве атомной бомбы возникает светящийся шар?

§ 66. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации



Ключевые понятия:

- ✓ радиация
- ✓ Грэй
- ✓ Зиверт
- ✓ радиационный фон

На этом уроке вы:

- объясните природу, свойства и биологическое действие α , β и γ — излучений.



Радиоактивные лучи, потоки нейтронов оказывают вредное влияние на окружающую среду, особенно на живые организмы. *Радиоактивные лучи называют ионизирующими лучами*, или коротко — *радиацией*. Обладающие определенной энергией эти лучи и частицы ионизируют молекулы и атомы тел. Изменяется их химическая активность, клетки подвергаются мутации, повреждаются гены в хромосомах, вызывая различные физиологические отклонения.

Если излучение большой интенсивности, то оно вызывает злокачественные опухоли, лучевую болезнь, может привести к летальному исходу. Огромное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах. Опасность радиации заключается в том, что облучение даже высокой степени проявляется не сразу. Ионизирующие лучи в первую очередь действуют на нервную систему, в результате чего нарушается кроветворная способность. Затем наступает поражение клеток пищеварительного тракта, других органов. Ограниченные дозы радиоактивных лучей, особенно γ -лучей, применяют для уничтожения клеток злокачественных опухолей.

Биологическое влияние ионизирующих лучей характеризуется особыми величинами. Чем больше энергия, полученная клетками живых организмов, тем больше активность химических реакций, и повреждение усиливается. Поэтому надо уметь правильно определять дозу энергии, полученной живым организмом вследствие радиации.

Поглощенной дозой испускаемых лучей называется отношение поглощенной энергии к массе облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В системе СИ единицей измерения поглощенной дозы излучения является 1 Гр (*грэй*).

Когда облученное вещество получает 1 Дж энергии, поглощенная часть испущенного излучения равняется одному грэю (1 Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

На практике используют величину, называемую *экспозиционной дозой*. Она измеряется по ионизационному эффекту рентгеновских и γ -лучей. Ее внесистемная единица **1Р (рентген)**:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

В дозиметрах радиация считается $1\text{Р} \approx 0,01 \text{ Гр}$. Влияние излучения на живые организмы зависит от его вида. Воздействие ионизирующих излучений принято сравнивать с биологическим влиянием рентгеновских и γ -лучей.

Влияние излучений на живые организмы характеризуют специальной величиной — *эквивалентной дозой*.

Эквивалентной дозой поглощения излучения называется произведение поглощенной дозы на коэффициент биологической эффективности:

$$D_{\text{экв}} = k \cdot D,$$

где k — коэффициент биологической эффективности, который определяют опытным путем. Для рентгеновских β - и γ -лучей $k = 1$, для тепловых нейтронов $k = 2,3$, для быстрых нейтронов $k = 10,0$, для α -лучей $k = 20,0$. Единицей измерения эквивалентной дозы является *зиверт* — **1 Зв**.

Мы все время подвергаемся влиянию радиоактивных лучей. Источниками такой радиации являются: космические лучи; радиоактивные вещества на Земле, здания, в которых живем, рентгеновские установки, телевизоры, человеческое тело (в нашем организме содержится $0,01 \text{ г}$ радиоактивного калия — $^{40}_{13}\text{К}$). Их называют *естественным радиационным фоном*. За счет естественного радиационного фона человек получает дозу $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$. Для лиц, работающих с радиоактивными препаратами, годовая предельно допустимая доза составляет $0,05 \text{ Гр}$.

Защита от радиации. Люди, работающие на атомных электростанциях с радиоактивными изотопами, радиоактивными остатками, должны принять меры защиты от радиации. Учитывая, что интенсивность радиоактивных излучений обратно пропорциональна квадрату расстояния, необходимо держать работников на определенном расстоянии от опасных источников. Для защиты от рентгеновских и γ -лучей используют свинец, который хорошо их поглощает. Чтобы радиоактивные вещества не проникли через органы дыхания в организм человека, используют специальные защитные материалы.



1. В чем заключается опасность радиоактивных лучей для живых организмов?
2. Что называется поглощенной дозой? В чем она измеряется?
3. Что такое эквивалентная доза?
4. Вызывает ли болезни естественный радиационный фон? От чего зависит?
5. Как защититься от радиации?

§67. Ядерный реактор. Ядерная энергетика



Ключевые понятия:

- ✓ ядерный реактор
- ✓ тепловыделяющий элемент
- ✓ регулирующие стержни
- ✓ бридеры
- ✓ ядерная энергетика

На этом уроке вы:

- познакомитесь со структурой и принципом работы ядерных реакторов;
- обсудите перспективы развития ядерной энергетики.



Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называется ядерным реактором. Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. под руководством Э. Ферми, а второй — в СССР в 1946 г. группой ученых во главе с И. В. Курчатовым.

В настоящее время во всех развитых странах существуют установки с ядерными реакторами. Реакторы по своим мощностям и целям назначения делятся на:

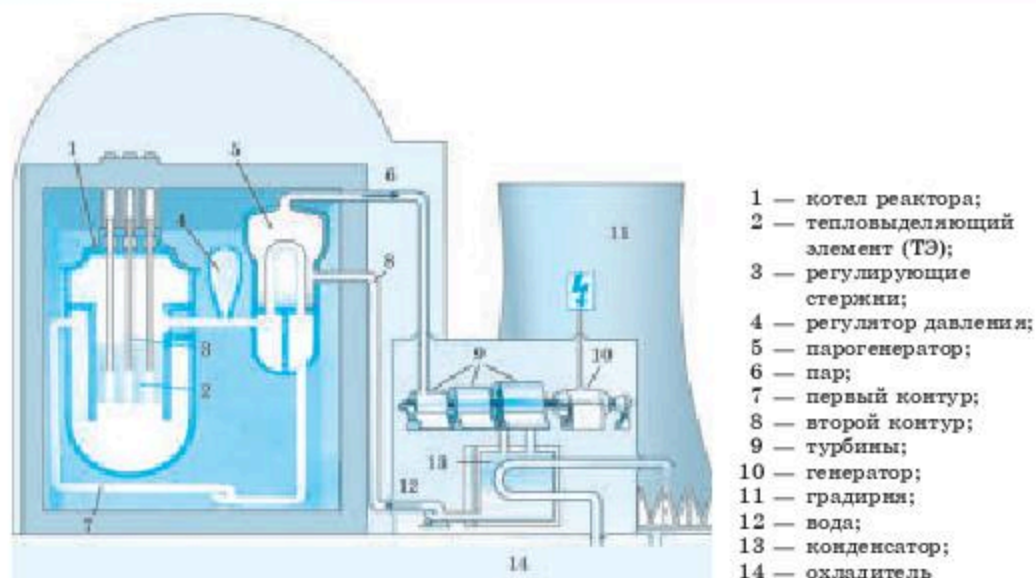
- научно-исследовательские;
- промышленные, т. е. реакторы по производству радиоактивных изотопов;
- энергетические, преобразующие ядерную энергию в электрическую.

Ядерный реактор на тепловых нейтронах. Принципиальная схема и структура ядерного реактора с энергетической установкой показаны на рисунке 67.1. Любой ядерный реактор состоит из следующих основных частей:

- активная зона, где происходит цепная реакция;
- замедлитель нейтронов;
- теплоноситель, уносящий выделяемую энергию из активной зоны;
- отражатель нейтронов;
- стержни, регулирующие скорость цепных реакций;
- стальная защитная оболочка;
- железобетонная биологическая защита;
- автоматическая система управления.

В активной зоне реактора с тепловыми нейтронами в качестве ядерного горючего используют уран-235. В природном уране доля изотопа урана-235 составляет всего лишь 0,7%, поэтому, чтобы это количество довести до 5%, его обогащают. Приготовленные из обогащенного урана так называемые *тепловые элементы* (ТЭ) помещают в стальную, герметически закрытую трубку. Трубку с ТЭ помещают в *замедлитель нейтронов* — вода или *тяжелая вода*. В зависимости от типа реактора в качестве замедлителя используют и графит.

Энергию, выделяемую во время реакции, удаляют с помощью теплоносителя. В основном в качестве теплоносителя используют обычную



- 1 — котел реактора;
- 2 — тепловыделяющий элемент (ТЭ);
- 3 — регулирующие стержни;
- 4 — регулятор давления;
- 5 — парогенератор;
- 6 — пар;
- 7 — первый контур;
- 8 — второй контур;
- 9 — турбины;
- 10 — генератор;
- 11 — градирни;
- 12 — вода;
- 13 — конденсатор;
- 14 — охладитель

Рис. 67.1

воду под высоким давлением. Высокое давление не дает воде закипеть. Хорошими теплоносителями являются *тяжелая вода, водяной пар, газ гелия, жидкий натрий*.

Активную зону окружают *бериллиевым слоем*, который уменьшает рассеивание нейтронов во внешнюю среду и отражает их. Снаружи закрывают стальным панцирем для защиты от сильно проникающих γ -лучей и нейтронов, а его в свою очередь — железобетоном толщиной в несколько метров. Скорость реакции меняется с помощью регулирующих стержней из *бора* или *кадмия*. Когда регулирующие стержни полностью введены в активную зону, реактор не работает. Основная часть нейтронов поглощается, цепная реакция не развивается. До того как начавшаяся цепная реакция не стабилизируется, регулирующие стержни постепенно вынимаются. Когда мощность реактора начинает превышать установленный уровень, регулирующие стержни автоматически вводятся в активную зону.

Цепная реакция на тепловых нейтронах показана на рисунке 67.2. Большая часть энергии, освобожденной на ТЭ во время цепных реакций, преобразуется в кинетические энергии осколков и нейтронов, а остальная — в электромагнитную энергию γ -квантов. Осколки и нейтроны, проходя через воду, нагревают ее до высокой температуры (330°C). Высокотемпературную воду с помощью насоса приводят в движение по первому замкнутому контуру, состоящему из реактора, труб и теплообменника. В паровом генераторе во втором контуре вода превращается в пар. Пар под высоким давлением начинает вращать турбины, связанные с ротором электрогенератора.

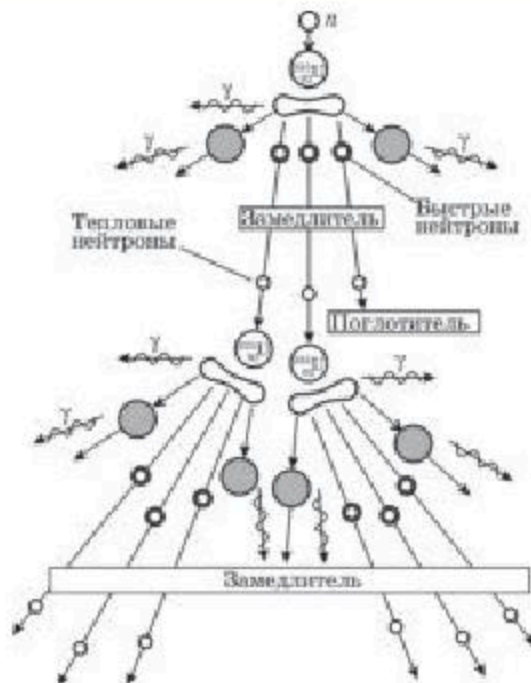
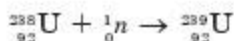


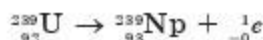
Рис. 67.2

Реактор на быстрых нейтронах. В обогащенном уране с содержанием $^{235}_{92}\text{U}$ до 20% — 30% цепная реакция может идти и без замедления нейтронов. Реактор без замедлителя называют *реактором на быстрых нейтронах*.

Приблизительно $\frac{1}{3}$ быстрых нейтронов, освобождающихся в процессе цепной реакции, поглощаются ядрами изотопа урана-238. Поглотив быстрый нейтрон, изотоп урана-238 по следующему ряду превращается в изотоп плутония $^{239}_{92}\text{Pu}$:



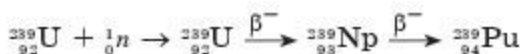
Полученный изотоп $^{239}_{92}\text{U}$ через 23 мин в результате β^- -распада превращается в изотоп нептуния $^{239}_{93}\text{Np}$:



$^{239}_{93}\text{Np}$ — *первый трансурановый химический элемент*, полученный искусственным путем. Нептуний сам β^- -радиоактивен, в процессе распада превращается во второй трансурановый элемент — плутоний:



Описанные реакции коротко записываются так:



Особенность плутония заключается в том, что он так же, как изотоп $^{235}_{92}\text{U}$, делится под действием тепловых нейтронов, в результате чего осуществляется цепная реакция, и выделяется большое количество энергии. Активной зоной реакторов на быстрых нейтронах является сплав урана, обогащенного изотопом $^{238}_{92}\text{U}$, с тяжелым металлом торием $^{234}_{90}\text{Th}$ (висмут, свинец), поглощающим нейтроны в малом количестве. У них отсутствует замедлитель. Эту область называют *зоной воспроизводства*. По этой причине реакторы на быстрых нейтронах называют *воспроизводящими реакторами*, или *бридерами* (от англ. *to breed* — “размножаться”). Схема воспроизводящего реактора показана на рисунке 67.3.

Теплоносителем в реакторах является жидкий натрий. В этих реакторах при делении 1 кг изотопа урана-235 выделяется до 1,5 кг плутония.

Ядерная энергетика. Наиболее эффективным способом использования выделяемой энергии при ядерных цепных реакциях является преобразование ее в электрическую энергию. Это осуществляется с помощью реакторов на атомных электростанциях (АЭС). Первая атомная электростанция мощностью 5000 кВт была построена в 1954 г. в Обнинске. С 1971 г. в Казахстане (Ақтау) работают атомная электростанция с реактором на быстрых нейтронах и опреснитель морской воды. В развитых странах в связи с трудностями строительства гидроэлектростанций и уменьшением запаса органических источников топлива быстрыми темпами развиваются отрасли ядерной энергетики. По сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на орга-

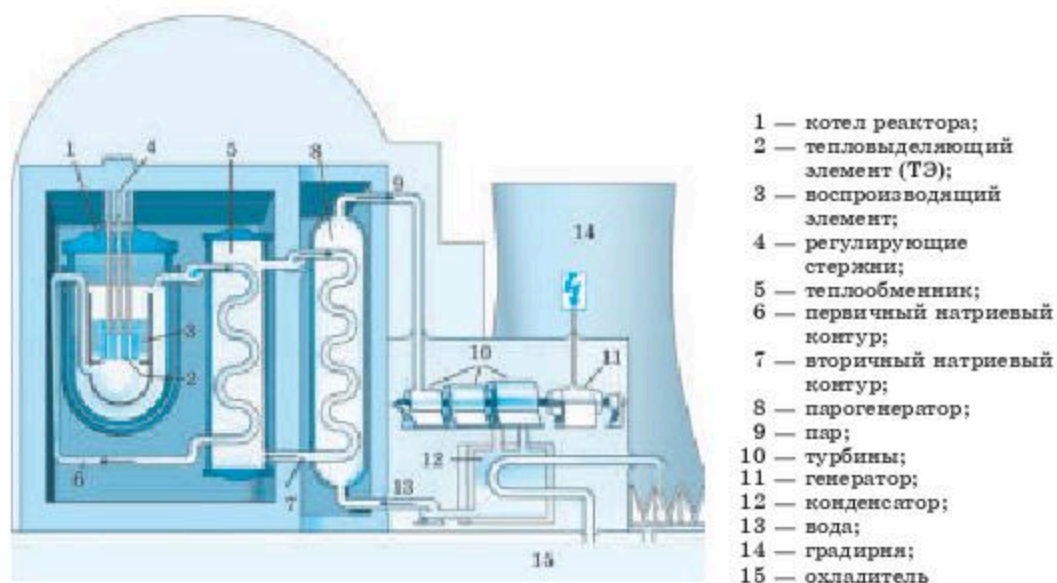


Рис. 67.3

ническом топливе, атомные имеют преимущества — они не загрязняют окружающую среду.

Однако ядерная энергетика оказывает вредное влияние на окружающую среду. Защита персонала АЭС от γ -излучений и потоков нейтронов требует особого внимания. Радиоактивное загрязнение крайне опасно. Существуют также проблемы радиоактивных отходов, возникающих при делении ядер, отработанных ТЭ, и т. д. Срок работы АЭС порядка 20 лет, после этого блоки, детали и все материалы, которые долгое время подвергались радиации, восстановить невозможно. Авария на Чернобыльской АЭС показала огромную опасность радиоактивных излучений. Все люди должны иметь представление об этой опасности и мерах защиты от нее.

Но, несмотря на все это, значение ядерной энергетике для человечества невозможно перечеркнуть. В настоящее время по повышению безопасности ядерных реакторов ведутся усиленные исследовательские изыскания.



1. Назовите основные части ядерного реактора и опишите их работу.
2. В каких целях в реакторах с тепловыми нейтронами используют замедлители нейтронов?
3. Как управляют цепными реакциями?
4. Что используют в качестве ядерного топлива в реакторах с тепловыми и быстрыми нейтронами?
5. Можно ли уменьшить критическую массу урана в реакторах?
6. Какие реакторы называют воспроизводящими?
7. Как преобразуют ядерную энергию в электрическую?
8. В чем причина более быстрого темпа развития ядерной энергетике по сравнению с другими видами?

Пример решения задачи

Мощность атомной электростанции с КПД 25% равна 1 млн. кВт. Определите массу изотопа урана-235, расходуемого за один год. При расщеплении одного ядра урана выделяется 200 МэВ энергии.

Дано:

$$P = 10^6 \text{ Вт}$$

$$t = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$$

$$E_0 = 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{ядро}}$$

$$\eta = 0,25$$

$$M = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$m = ?$$

Решение. Количество ядер находим по формуле определения количества молекул:

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где m — масса изотопа урана-235, расходуемого за один год; M — молярная масса изотопа. N_A — число Авогадро. Энергия, выделяемая при расщеплении:

$$E = E_0 \cdot N = E_0 \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A$$

Энергия, подаваемая потребителю:

$$W = P \cdot t.$$

$$\eta E = W,$$

или

$$\eta E_0 \frac{m}{M} N_A = P \cdot t,$$

$$\text{отсюда: } m = \frac{PtM}{\eta E_0 N_A} = \frac{10^9 \text{ Вт} \cdot 3,16 \cdot 10^7 \text{ с} \cdot 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{0,25 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{ядро}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1650 \text{ кг.}$$



Упражнение 34

1. Мощность атомной электростанции с КПД 20% 1000 МВт. Определите суточный расход массы изотопа урана-235.

Ответ: 5,3 кг.

2. Мощность атомной подводной лодки США “Наутилиус” 14,7 МВт, КПД — 25%. В качестве топлива используют обогащенный уран. При делении ядер 1 кг урана выделяется $6,9 \cdot 10^{13}$ Дж энергии. Какой запас топлива необходим для плавания атомной подводной лодки в течение года?

Ответ: 26,9 кг.

3. Вычислите КПД двигателей атомного ледокола, если его мощность $3,2 \cdot 10^4$ кВт, а атомный реактор расходует 200 г урана-235 в сутки. Вследствие деления одного ядра атома урана выделяется энергия 200 МэВ.

Ответ: $\eta = 17\%$.

§ 68. Термоядерные реакции



Ключевые понятия:

- ✓ термоядерные реакции
- ✓ термоядерный синтез
- ✓ токамак

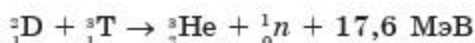
На этом уроке вы:

- получите информацию о термоядерных реакциях.
- обсудите перспективы развития ядерной энергетики.

Один из видов ядерной реакции, при которой выделяется значительная энергия, — **синтез ядер легких элементов** (^1_1H ; ^2_1H ; ^3_1H ; и т. д.). Синтез ядер легких элементов осуществляется лишь при температуре, равной десяткам миллионов кельвин ($10^7 - 10^9$ К).

Создание более тяжелого ядра при объединении легких ядер при высоких температурах называется **термоядерной реакцией**. Сумма масс

покоя ядер легких элементов больше массы покоя ядра, образованного при их объединении. За счет дефекта массы должно освободиться огромное количество энергии. Вычисления доказали справедливость этих выводов. Например, при реакции синтеза ядер изотопов водорода дейтерия ${}^2_1\text{D}$ и трития ${}^3_1\text{T}$ создается ядро атома гелия ${}^3_2\text{He}$ и выделяется 17,6 МэВ энергии:

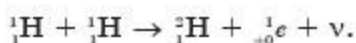


При термоядерном синтезе на один нуклон приходится $\frac{17,6}{5} = 3,5$ МэВ энергии, а при реакции деления ядра урана на один нуклон 0,9 МэВ энергии. Значит, удельная энергия, выделяющаяся при синтезе легких ядер, почти в четыре раза выше, чем удельная энергия при ядерной реакции деления.

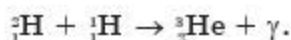
Трудности при осуществлении термоядерного синтеза таковы. Известно, что объединению положительно заряженных легких ядер препятствует кулоновская сила отталкивания. Чтобы преодолеть это, нужно придать частицам в плазме громадные кинетические энергии путем разогрева плазмы до очень высоких температур. При сближении на расстояние 10^{-14} м ядра, вошедшие в сферу влияния ядерных сил, объединяясь, образуют новое ядро, в результате чего и высвобождается очень большое количество энергии.

По современным представлениям, источником энергии в недрах Солнца и звезд является термоядерная реакция. В ядре Солнца температура достигает 15 млн. кельвинов ($1,5 \cdot 10^7$ К), давление 200 млрд. атмосфер. Атомы солнечного вещества при такой температуре лишаются внешних электронов, превращаются в ионизированный газ — *плазму*, состоящую из ядер (протонов) и свободных электронов.

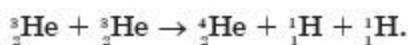
Американский физик Х. Бете в 1938 г. выдвинул гипотезу, что основной реакцией в звездах является превращение водорода в ядро гелия в результате *протон-протонного термоядерного цикла*. При слиянии двух протонов образуется дейтерий и испускаются позитрон и нейтрино:



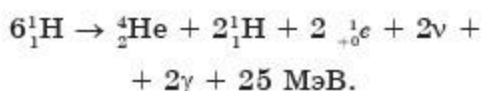
Теперь дейтерий сам взаимодействует с протоном, образуя ядро изотопа гелия ${}^3_2\text{H}$, при этом выделяется энергия в виде γ -кванта:



Образовавшиеся в результате реакции два ядра изотопа ${}^3_2\text{He}$ синтезируют ядро ${}^4_2\text{He}$:



В результате четыре ядра водорода образуют одно ядро гелия, и в процессе реакции выделяется 25 МэВ энергии:



На рисунке 68.1 показан этот процесс.

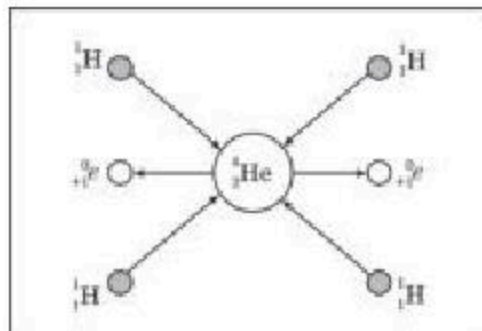


Рис. 68.1

В звездах могут происходить и другие термоядерные синтезы. При полном сгорании водорода в центре звезды образуются ядра гелия. Теперь начинается *цикл углерод — азот* и синтезируется один из последних продуктов реакции — изотоп ${}^4_2\text{He}$. В процессе цикла выделяется 26,7 МэВ энергии. За счет излучения Солнце каждую секунду теряет $4 \cdot 10^{26}$ Дж энергии, значит, его масса каждую секунду уменьшается на 4,3 млн. т. Однако запаса “топлива” на Солнце хватит еще на 6 млрд. лет. Следовательно, в эволюции звезд термоядерные реакции играют решающую роль.

Водородная бомба (H-бомба). Первая термоядерная реакция на Земле была осуществлена 1 ноября 1952 г. в южной части Тихого океана, а следующая — в 1953 г. в Казахстане (Семипалатинский полигон) путем взрыва водородной бомбы. Смесь дейтерия и трития вместе с атомной бомбой (${}^{235}_{92}\text{U}$ или ${}^{239}_{92}\text{U}$) расположены в общей оболочке. Необходимые для неуправляемой термоядерной реакции температуру и давление получают в результате взрыва атомной бомбы.

Таким образом, взрыв атомной бомбы ($\approx 10^{-6}$ с) переходит в сверхмощный взрыв термоядерной (водородной) бомбы.

Управляемый термоядерный синтез. Использование энергии термоядерной реакции в мирных целях — еще не решенная проблема современности. Если учесть, что запаса углеводородного топлива в недрах хватит на 200, запаса урана — на 1000 лет, то создание управляемых термоядерных реакторов для человечества является первоочередной задачей, ведь на Земле имеется неисчерпаемый запас водорода. Синтез тяжелых изотопов водорода дейтерия и трития — одна из эффективных реакций. Для этого надо повысить температуру плазмы до десятков миллионов градусов ($\approx 5 \cdot 10^7$ К) и чтобы плотность смеси дейтерия и трития была не менее 10^{22} частиц в 1 м^3 . Высокотемпературную плазму можно получить, пропуская через плазму особо мощный электрический заряд (1 млн. А).

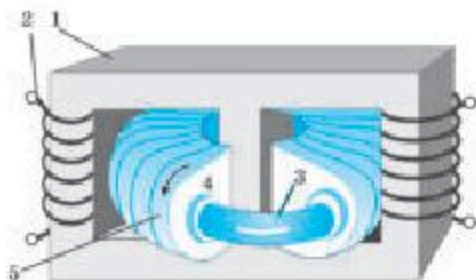


Рис. 68.2

Удерживать реакцию в плазме, температура которой миллионы градусов, — труднейшая задача. При такой температуре стенки реактора из самого сверхпрочного материала превратятся в пары. Метод удержания плазмы в сильном магнитном поле без контакта со стенками реактора был предложен в 1950 г. русскими физиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом. Для осуществления этой идеи была построена экспериментальная установка “Токамак”. Ее устройство показано на рисунке 68.2.

“Токамак” состоит из трансформатора со стальным сердечником (1); источника переменного магнитного поля (витков) (2); тороидальной вакуумной камеры (4); плазмы (3) и витков (5), создающих бегущее магнитное поле.

Вторым методом осуществления термоядерного синтеза является разогрев мощными импульсами лазерных лучей стеклянного шара, наполненного смесью дейтерия и трития. Во время эксперимента температура поднимается до десятков миллионов кельвинов. Реакция успевает произойти до взрыва плазмы, поэтому этот метод называют *инерционным*.

Мировое научное сообщество уверено, что в XXI в. будут построены термоядерные реакторы, и энергетические проблемы найдут свое решение.



1. Что называется термоядерным синтезом?
2. В каком случае энергетический выход больше: при делении ядер или при их синтезе?
3. Почему в звездах термоядерные реакции могут происходить самостоятельно?
4. Гаснут ли звезды?
5. Какие способы осуществления термоядерных реакций вы знаете?
6. Почему считается, что у термоядерной энергетики большое будущее?



Упражнение 35

1. Какая энергия выделяется при следующей реакции? ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$

Ответ: 23,8 МэВ.

2. В мире ежегодно потребляется около $3 \cdot 10^{20}$ Дж энергии. Сколько дейтерия нужно сжигать в термоядерном реакторе ежегодно, чтобы обеспечить современную потребность в энергии?

Ответ: 6300 т.

3. Какую частоту имеет испускаемый при термоядерной реакции γ -квант ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$, если α -частица обладает энергией 19,7 МэВ?

Ответ: 10^{21} Гц.

Самое важное в главе 10

- В ядерной физике изучают *структуру атомного ядра*, его преобразования, рассматривают явления, происходящие в микромире.

- Э. Резерфорд, основываясь на экспериментальных данных, предложил *ядерную модель атома*. Размеры ядра оказались порядка 10^{-15} м.

- Резерфорд, бомбардируя α -частицами атомные ядра, впервые осуществил *искусственные превращения ядер*. В 1919 г. он открыл *протон*, а в 1932 г. Дж. Чедвик открыл вторую частицу, входящую в состав ядра, — *нейтрон*.

- В. Гейзенберг и Д. Иваненко предложили *протон-нейтронную модель ядра*. По этой модели ядро состоит из протонов и нейтронов, т. е. нуклонов: $A = Z + N$.

- *Короткодействующие ядерные силы удерживают в ядре нуклоны*.

- Энергия связи нуклонов в ядре является важнейшей характеристикой в ядерной физике. *Энергия связи равна энергии, которая необходима для разделения ядра на отдельные нуклоны*.

- В 1896 г. А.Беккерель открыл *явление естественной радиоактивности*. Радиоактивные элементы самопроизвольно испускают α -, β - и γ -лучи. Природа этих лучей известна: *альфа-лучи* — это ядра атомов гелия; *бета-лучи* — поток электронов; *гамма-лучи* — очень коротковолновые электромагнитные излучения.

- *Закон самопроизвольного распада атомных ядер и закон радиоактивного распада* установил Резерфорд:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}, \text{ или } N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

- Для регистрации и изучения столкновений и взаимных преобразований атомных ядер и элементарных частиц используют счетчик Гейгера, камеру Вильсона, пузырьковую камеру, метод толстослойных фотоэмульсий, сцинтилляционный счетчик.

- Изменения ядер при взаимодействии друг с другом или с элементарными частицами называются *ядерными реакциями*. В процессе ядерных реакций происходит испускание или поглощение энергии.

- Тяжелые ядра (U, Th, Pu и др.) могут делиться под действием нейтронов. При делении испускаются два-три нейтрона, и выделяется энергия порядка 200 МэВ. В ядерных реакторах это позволяет осуществить *управляемую цепную реакцию*.

- При сверхвысоких температурах осуществляется синтез легких ядер — *термоядерные реакции*. Благодаря термоядерным реакциям Солнце и звезды излучают энергию на протяжении миллиардов лет.

- Радиоактивные лучи при превышении определенной дозы представляют большую угрозу для живых организмов.

Раздел VI. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Глава 11. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

§ 69. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы разработки наноматериалов



Ключевые понятия:

- ✓ наноматериалы
- ✓ наноробот

На этом уроке вы:

- узнаете физические свойства наноматериалов и способы их получения;
- обсудите сферы применения нанотехнологии.



Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов разработки материалов (веществ) на атомном, молекулярном и супрамолекулярном (на уровне нескольких молекул) уровнях с целью получения особых и новых свойств. Как правило, для этого проводятся действия со структурами в пределах 1—100 нанометров, по крайней мере, в одном измерении. Например, известный **графен** представляет собой плоский наноматериал: два его измерения очень велики, а третье измерение одноатомное, то есть только одно измерение материала имеет наноразмеры, углеродные нанотрубки представляют собой линейные наноматериалы (два измерения имеют наноразмеры), а фуллерен — точечный наноматериал (все три измерения имеют наноразмер) (рис. 69.1). *Наноматериал* — это макроскопическое вещество, состоящее из наночастиц или изготовленное на основе нанотехнологий. Наночастица сильно отличается от макроскопического тела с одинаковым химическим составом основными физическим, химическим, оптическим и биологическим свойствами. Например, температура плавления наночастиц золота размером 5 нм ниже золота нормального размера на 260° С. Одна из причин этого заключается в том, что количество атомов на поверхности частицы значительно по сравнению с полным числом атомов в объеме вещества (поверхностные эффекты). Еще одна серьезная причина — увеличение доли квантовых эффектов.

К нанотехнологиям относятся наномеханика, наноионика, наноэлектроника, нанофотоника, нанороботика, нанотоксикология, наномедицина и др. В связи с быстрым развитием нанонауки в последние годы появилось много новых отраслей промышленности.

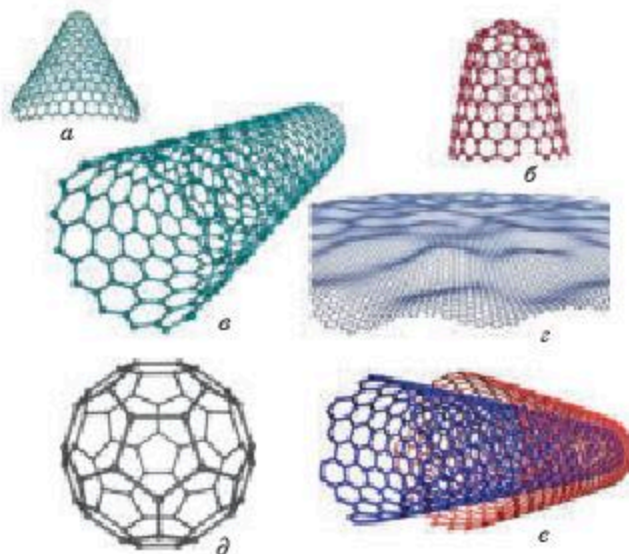


Рис. 69.1. *a* — нанокон, *б* — нанохорн, *в* — нанотрубка, *г* — графен, *д* — фуллерен, *е* — двухслойные нанотрубки

Приставка “нано”, в переводе с греческого означает карликовый, и в физике обозначает миллиардную долю ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Следует отметить, что в некоторых случаях добавление “нано” используется в значении “относительно малое, карликовое”: например, наноспутник — спутник, масса которого составляет несколько килограммов, а нанотираннус — карликовый тиранозавр, рост которого составляет один-два метра.

На рисунке 69.2 можно посмотреть различие предметов на наноуровне от предметов других размеров.

Впервые о нанотехнологиях научно рассказал американский ученый Ричард Фейнман в своей лекции “There’s Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics” (Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики) 29 декабря 1959 года на собрании Американского Физического Общества в Калтехе. Но тогда не было термина нанотехнологии. Термин “нанотехнология” был впервые введен в 1974 году японским ученым Норио Танигучи. А понятие нанотехнологии в области науки стало формироваться с 1980 года. В 1981 году немецкий ученый Герд Карл Бинниг и швейцарский ученый Генрих Рорер разработали сканирующий туннельный микроскоп (рис. 69.3), позволяющий не только изображать



Ричард Фейнман
(1918—1988 гг.)

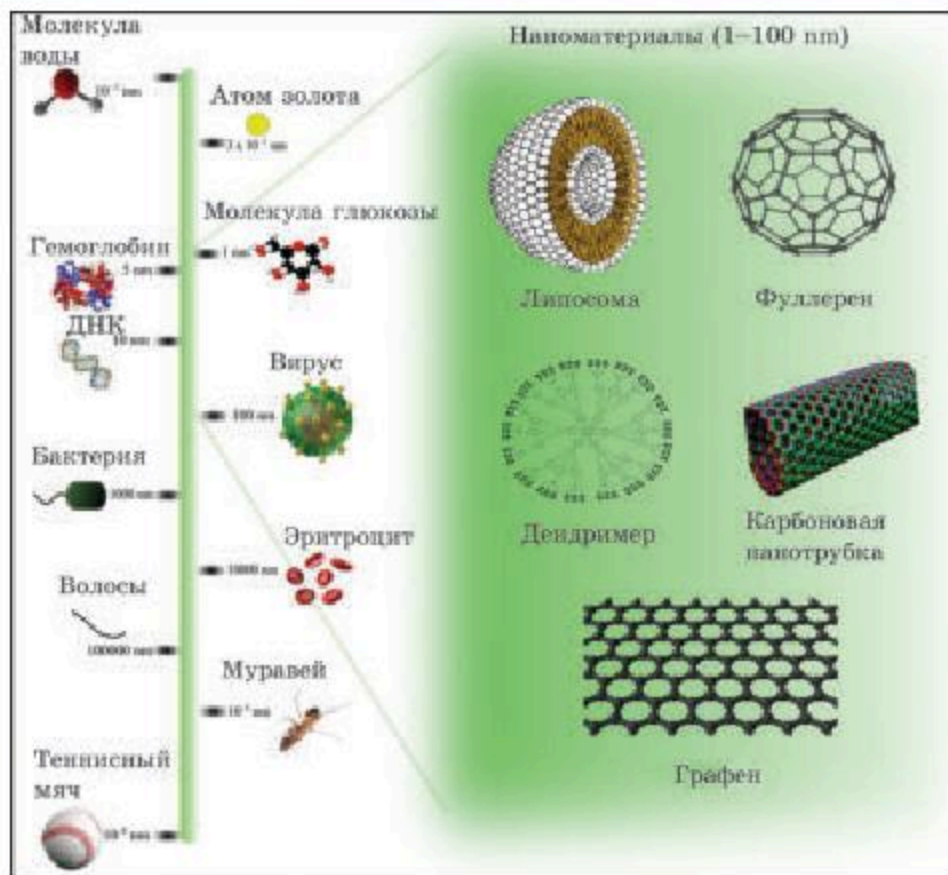


Рис. 69.2. Соотношение наноуровня к другим параметрам

атомы, но и производить с ними действия, что дало реальное средство для получения наноструктур. С этого времени началась эпоха нанотехнологии.

Человечество начало ощущать применение нанотехнологий с начала 21 века. С тех пор развитые страны выделяют большое количество средств на исследования по разработкам в области нанотехнологий. Нанотехнология получила широкое применение в области физики, химии, биологии, медицины, электроники и сельского хозяйства, наноматериалы и наночастицы вошли в состав предметов повседневного потребления. В настоящее время передовой компанией по нанотехнологиям является корпорация Samsung с наибольшим количеством патентов в этой области. Эта компания объявила, что в 2021 году компания запустит в коммерческое применение новейшую на сегодняшний день (2019 г.) технологию производства процессора в 3 нм. Также в этой области лидируют компании (Корея), IBM (США) и Toshiba (Япония), научно-исследовательские организации США, Европейского союза, Китая, Японии, России.

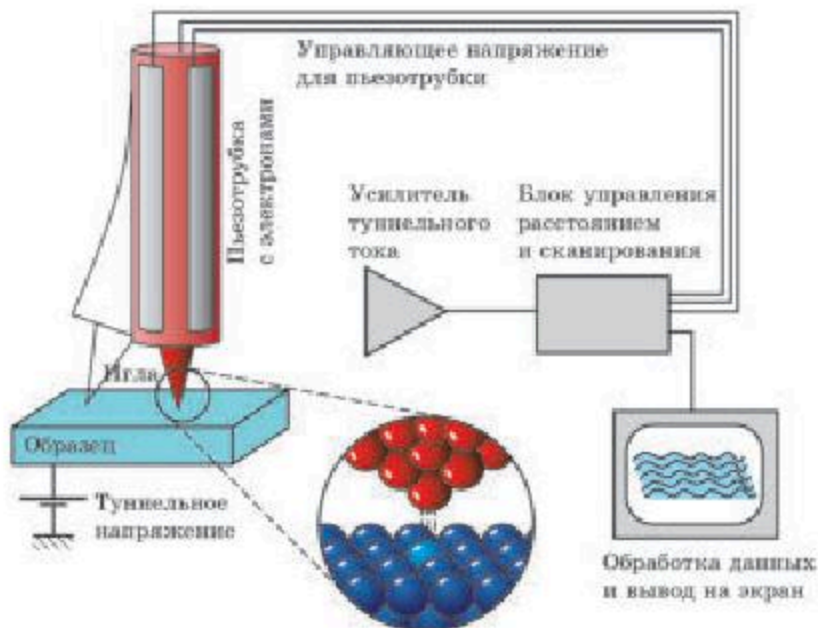


Рис. 69.3. Сканирующий туннельный микроскоп

Нанотехнологии по обобщенным методам подразделяются на два типа: сверху вниз и снизу вверх. *По методу сверху вниз* нанометрические частицы получают путем механического дробления или применением других способов измельчения крупных твердых частиц. Существуют методы, используемые для получения наноматериалов и наноструктур из объемных веществ в технологии такого типа: специальные дробилки; кристаллизация аморфных сплавов; быстрая пластическая деформация; электрический взрыв. *По методу снизу вверх* формирование наночастиц происходит из атомов и молекул, т. е. осуществляется укрупнение наименьших размеров до нанометрических размеров. К технологиям такого типа относятся: газофазный синтез с конденсацией паров; плазмохимический синтез с конденсацией; отстаивание коллоидных растворов; химическое и физическое осаждение оболочек из газовой фазы (CVD и PVD), электрическое осаждение оболочек и т. д.

Все наноматериалы делятся на трехмерные, двухмерные, одномерные и 0-мерные (рис. 69.4).

3D принтеры. 3D принтеры — это устройства, работающие на основе аддитивной технологии при соприкосновении слоев объемного вещества. В настоящее время разрабатываются 3D принтеры лазерной плавки наночастиц. Эти устройства являются мощным инструментом для создания наноматериалов.

Нанороботы. В 1986 году американский ученый Эрик Дрекслер в книге “Машины создания: грядущая эра нанотехнологии” (Engines



Рис. 69.4. Виды наноматериалов

of Creation: The Coming Era of Nanotechnology), изучив возможность создания машин со способностями двигаться, делать операции, программировать, обмениваться информацией и обрабатывать ее, внедрил термин “наноробот”.

Нет сомнений в том, что в случае создания таких машин человечество перейдет на следующий этап своего развития. В настоящее время проводятся интенсивные исследования по созданию нанороботов. Есть успехи — уже сформирована часть составных деталей. Планируется создание медицинских нанороботов для лечения больного на наноуровне (уничтожение вредных бактерий и вирусов, обезвреживание ядовитых веществ, восстановление организма, транспортировка лекарств в нужное место, диагностика) (рис. 69.5).

Влияние наночастиц на живой организм разнообразно. Необходимо помнить, что при применении нанотехнологий может возникнуть опасность для здоровья человека. Наночастица оказывает различное действие в зависимости от размера, формы, концентрации и формы действия: с одной стороны — лечебные свойства, с другой — токсичные. Например, если фуллерен полезен для здоровья при смешивании с определенными маслами, то коллоид в очень малой концентрации воды будет токсичен для кожи и клеток почек. А большинство наночастиц из углеродных нанотрубок подвергают мутации живые организмы и вызывают апоптоз клеток (рис. 69.6). Поэтому при производстве наноматериалов разработаны правила предотвращения загряз-

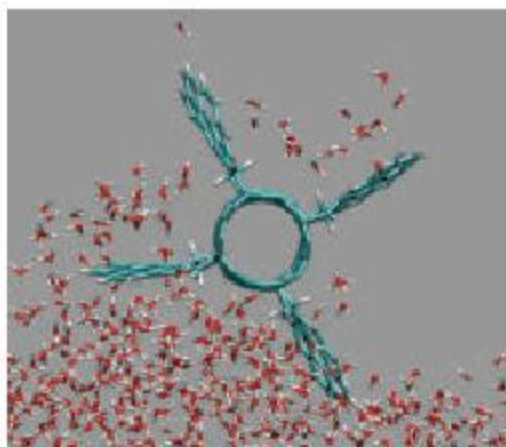


Рис. 69.5. Нанопропеллер

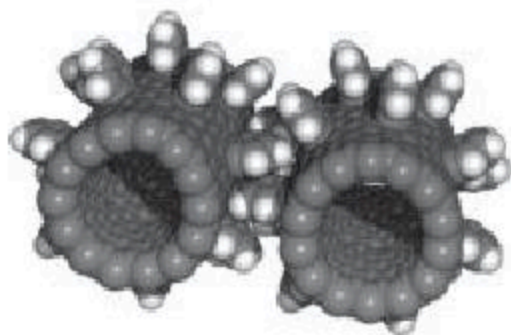


Рис. 69.6. Зубчатые колеса, сделанные из нанотрубок

нения окружающей среды, особое внимание уделяется разработке мер безопасности в отношении нанотехнологий со стороны международных организаций и государств.

Нанотехнологические исследования в Казахстане ведутся практически во всех технических и исследовательских университетах. Например, Назарбаев университет, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, нанолаборатории при Карагандинском государственном университете им. Букетова

проводят всесторонние научные исследования.



1. На каких свойствах вещества основана нанотехнология?
2. Чем отличаются методы нанотехнологий?
3. Могут ли наноматериалы быть большими?
4. Как наночастицы влияют на организм?
5. В каких областях может применяться производство нанороботов?

Раздел VII. КОСМОЛОГИЯ

Глава 12. КОСМОЛОГИЯ

§70. Астрономия, астрофизика и космология



Ключевые понятия:

- ✓ астрономия
- ✓ космология

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основами науки, изучающей космос — круг изучения астрономии и взаимосвязи ее частей.



Современные достижения в исследовании законов природы привели к тому, что человек значительно углубил понимание природы и уже приблизительно определяет границы между многими науками. Основываясь на последних достижениях астрономии, его исследовательские объекты могут варьироваться от невидимой материи до живых организмов в космосе. Если физика — это наука, которая изучает самые основные наиболее общие и фундаментальные закономерности природы, то астрономию можно назвать наукой, изучающей Вселенную с использованием методов физики.

Слово Астрономия происходит от греческого слова “*астрон*” — звезда и “*номос*” — название, закон. В соответствии с рамками рассмотрения настоящей главы *астрономия* — наука, изучающая физическое строение, возникновение, движение и развитие небесных тел, их систем и всей Вселенной. Основные исследуемые объекты астрономии — Солнце, планеты и их спутники, метеорные тела, туманности, звезды, звездные скопления, галактики и другие космические объекты. Если рассматривать Землю как планету Солнечной системы, как небесное тело, то она также является объектом исследования астрономии. Одна из особенных задач исследования астрономии — поиск внеземной жизни и связь с внеземными цивилизациями. Этот вопрос является одним из самых актуальных, стоящих перед человечеством.

Основной метод исследования астрономии — наблюдение. Наблюдения проводятся в основном с помощью различных телескопов. В настоящее время в связи с развитием технологий, появлением мощных компьютеров значительно расширились возможности мониторинга и анализа электромагнитного излучения, спектрального анализа, фотосъемки и видеосъемки, детектирования электромагнитного излучения вне оптического диапазона. В связи с развитием космонавтики в астрономии появилась возможность экспериментировать. С помощью

космических кораблей и искусственных спутников астрономы поднялись на новый уровень исследования космоса. Использование межпланетных космических кораблей в исследовании Солнечной системы позволило сделать в астрономии множество открытий. Еще один способ исследования небесных тел — это исследование космических лучей и метеоритов, попадающих на Землю.

При изучении небесных тел в Астрономии ставятся три основные задачи:

1. Определить видимые места и движение небесных тел, их истинное место и движение, на основе этих данных определить размеры и форму.
2. Определить физическое строение, химический состав небесных тел, физическое состояние в них (давление, температура, плотность).
3. Решить проблемы возникновения и развития небесных тел и их систем.

В зависимости от характера данных, используемых в астрономии, ее в основном подразделяют на четыре части: астрометрия, небесная механика, астрофизика и космология.

Астрометрия занимается поиском видимого места и движения небесных тел, теоретических и технических методов измерения вращения Земли, разработкой и дальнейшим совершенствованием способов их математической обработки. Астрометрия занимается такими важными вопросами, как назначение систем небесных координат, нахождение набора параметров, наиболее полно характеризующих вращение Земли, определение точного времени (функции времени) на основе астрономических наблюдений, составление календаря, точное определение географических координат земной поверхности на основе наблюдений. Астрометрию можно разделить на две части: “Сферическая астрономия”, занимающаяся в основном системами измерения времени и математическими методами определения видимого места и движения небесных тел и “Практическая астрономия”, занимающаяся теорией создания наблюдений и астрономических устройств.

Небесная механика изучает движение небесных тел и их систем в результате взаимодействия (в основном всемирного притяжения). Основные практические проблемы небесной механики — выявление элементов орбит небесных тел (а также искусственных спутников и космических кораблей), определение их траектории, исследование устойчивости движения, исходя из данных, полученных из наблюдений. Часть небесной механики под названием “Теоретическая астрономия” занимается расчетом видимых мест (эфемерид) и орбит небесных тел. Необходимость запуска космических аппаратов способствует быстрому развитию небесной механики.

Астрофизика занимается практически всеми проблемами, оставшимися от двух предыдущих частей. В частности, она изучает возникновение небесных тел (“Космогония”), их физическое состояние в них, их физическое строение и химический состав, процессы, происходящие на их поверхности и в недрах, свойства среды (межзвездные и т. д.) между ними. “Звездная астрономия”, изучающая звезды и их системы, является частью астрофизики. В целом астрофизику можно рассматривать как теоретическую и наблюдательную часть. К наблюдательной астрофизике, кроме оптической астрофизики, относятся астроспектроскопия, радиоастрономия, а также в качестве сфер астрофизики, возникших во второй половине 20 века, можно выделить инфракрасную, ультрафиолетовую, рентгеновскую, гамма-астрономию, нейтринную астрономию и гравитационно-волновую астрономию, которая появилась в 21 веке.

В рамках астрономии очень динамично развивается Космология, которая имеет особое место, и в последнее время рассматривается как отдельное направление. Современная космология была основана после создания общей теории относительности Эйнштейна. Космология изучает Вселенную в целом, его возникновение и развитие, геометрическую структуру, как возникло в нем вещество, природу темной энергии и темной материи и их место в развитии Вселенной.

Научные исследования в области астрономии в нашей стране начались с наблюдений за полным затмением Солнца в сентябре 1940 года. В Алматы прибыли астрономы со всех уголков Советского Союза, чтобы наблюдать за полным затмением Солнца. При поддержке Первого Президента Казахской академии наук академика Каныша Имантаевича Сатпаева при Академии был создан Научный институт астрономии и астрофизики (позже переименован в институт астрофизики им. Фесенкова). Этот институт работает до настоящего времени и является основным учреждением страны, ведущим исследования по астрономии.



1. В чем заключается особенность исследования астрономии?
2. Что изучает космология?
3. Какими исследованиями занимаются институты астрофизики в Казахстане?

§71. Звездное небо. Мир звезд. Расстояние до звезд. Переменные звезды



Ключевые понятия:

- ✓ созвездия
- ✓ светимость
- ✓ параллакс
- ✓ световой год
- ✓ парсек
- ✓ законы Вина и Стефана-Больцмана
- ✓ формула Погсона
- ✓ диаграмма Герцшпрунга-Рассела
- ✓ протозвезда
- ✓ белый карлик
- ✓ нейтронная звезда
- ✓ черная дыра

На этом уроке вы:

- узнаете, как определяют расстояние до звезд, как идет становление и развитие звезд и чем оно заканчивается.



Звезда — это шаровидное небесное тело в состоянии плазмы с большой массой, в основном состоящее из водорода и гелия, постоянно выделяющее энергию в виде электромагнитного излучения и потока частиц благодаря протеканию термоядерных реакций в ее ядре. К звездам относятся также белые карлики и нейтронные звезды, которые являются конечным этапом их эволюции.

Основные характеристики звезд: светимость, температура поверхности, радиус, химический состав и масса. Многие из них измеряются в единицах характеристик Солнца (табл. 71.1):

Таблица 71.1

Основные характеристики Солнца

Название	Обозначение	Значение
Масса Солнца	M_{\odot}	$1,989 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Солнца	R_{\odot}	$6,957 \cdot 10^8$ м
Светимость Солнца	L_{\odot}	$3,827 \cdot 10^{26}$ Вт

Кроме того, размер гигантских звезд измеряется астрономическими единицами ($1 \text{ а.е.} = 149597870700 \text{ м}$). Расстояние до звезд — расстоянием, пройденным светом в год (Юлианский год — 356,25 суток) $1 \text{ св.год} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} = 63241,1 \text{ а.е.} = 0,306 \text{ пк}$

$$1 \text{ св.год.} = 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \cdot 2,99 \frac{\text{м}}{\text{с}} = \\ = 9 \ 460 \ 730 \ 472 \ 580 \ 800 \ \text{м,}$$

либо измеряется парсеком (расстояние по горизонтали 1 а.е., под видимое углом 1 секунды — $1 \text{ пк} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м} = 206264,8 \text{ а.е.} = 3,262 \text{ св.год}$):

$$1 \text{ пк} = \frac{1 \text{ радиан}}{1''} \text{ а.е.} = \frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi} \text{ а.е.} = 3,0856776 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

Звезды в основном располагаются внутри галактики и передвигаются вокруг ее центра. Начиная с образования в межзвездной среде из газопылевых туманностей внутри галактики, звезда проходит через различные эволюционные стадии.

Расстояние до звезд. Солнце является самой близкой к нам звездой. Самая близкая к Солнцу звезда — это звезда Проксима в созвездии Центавр. Расстояние до нее 4,244 световых года.

Это вы знаете

Свет летит от Солнца около 8 минут.

Расстояние до ближайших к нам звезд определяется методом параллакса (рис. 71.1). Современные оптические телескопы могут измерять параллакс с относительной погрешностью $\sim 0,001\%$. Можно измерить расстояние с помощью орбитального телескопа на спутнике Земли в 1000 пк. В зависимости от атмосферных возмущений с поверхности Земли можно измерить расстояние до 100 пк. С помощью радиотелескопов проводятся измерения расстояния до 10 Мпк.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Фотон, излученный внутри ядра Солнца, идет до его поверхности больше сотни тысяч лет.

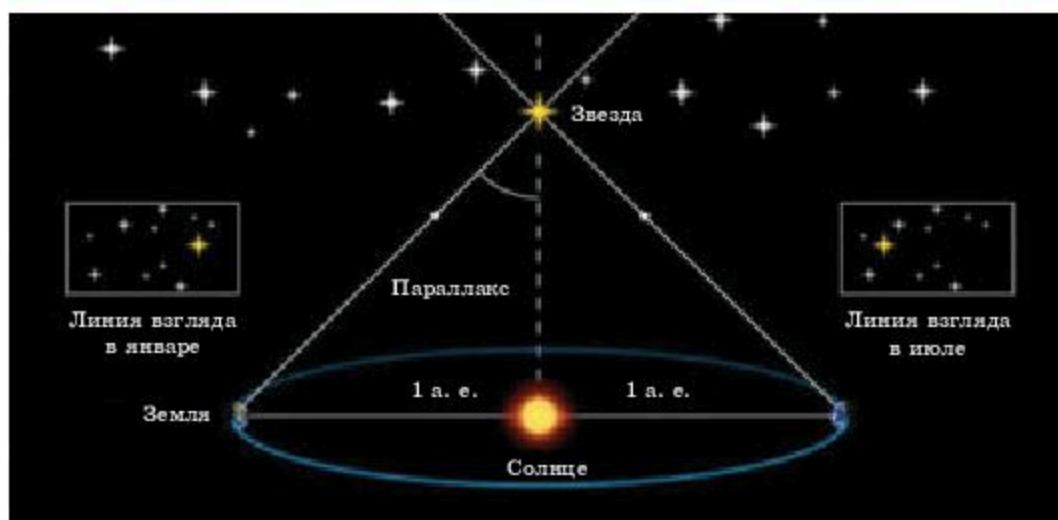


Рис. 71.1. Годи́чный параллакс звезды

Если годичный параллакс равен 2^*p , то расстояние до нее:

$$r = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi \cdot p}{360 \cdot 60 \cdot 60}\right)} \text{ а.е.} = \frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi \cdot p} \text{ а.е.} = \frac{206265''}{p} \text{ а.е.}$$

Для исследования звезд используются специальные телескопы, оснащенные фотокамерой, спектрографом, магнитографом и многими другими приборами. Ученые получают информацию о звездах, классифицируя их спектр света. Спектр определяет температуру и химический состав поверхности звезды (фотосферы звезды). Длина волны, соответствующая максимальному количеству энергии, вырабатываемой звездой в непрерывном спектре, можно определить по закону смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2900}{T},$$

где λ_{\max} — длина волны в микрометрах, b — постоянная Вина, T — абсолютная температура. На основе наблюдений можно определить зону максимального излучения в спектре звезды и рассчитать ее температуру по закону Вина.

В случае установления температуры можно обнаружить полное энергетическое сияние звезды (единица энергии излучения, исходящей по всей площади спектра в единицу площади в единицу времени, единица измерения [Вт/м²])) с помощью закона Стефана-Больцмана:

$$S_{\text{пол}} = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4,$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана.

После определения расстояния до звезды можно найти другие его характеристики.

Видимая звездная величина была введена греческим астрономом Гиппархом во II веке до н.э. Видимая звездная величина показывает величину яркости звезды (световой энергии, генерируемой звездой в единичное время). Если видимые звездные величины двух звезд m и их яркость L , то их соотношение выражается через формулу Погсона:

$$m_1 - m_2 = -2.5Lg \frac{L_2}{L_1}.$$

Мы видим, что яркость звезды 1^m в 100 раз превышает яркость звезды 6^m . Расстояние до звезд, у которых известны светимость и блеск, можно найти по закону обратного квадрата. Источники света, у которых известна светимость, в астрономии называются **стандартными свечами**.

Звезды расположены на разных расстояниях от нас, поэтому их видимые звездные величины не могут прямо определить мощность излучения звезды (ее истинную светимость). Для того, чтобы определить истинную светимость звезды (в астрономии принято говорить “абсолютная”), необходимо найти расстояние до нее.

Если видимая звездная величина и расстояние до нее дается парсеком, то с помощью следующей формулы можно вычислить абсолютную звездную величину звезды:

$$M = m + 5 - 5Lgr$$

Переменные звезды. В результате наблюдений наряду с обычными звездами также были обнаружены звезды, у которых блеск изменяется с течением времени. Такие звезды называются **переменными звездами**. Они подразделяются на три группы: пульсирующие переменные, эруптивные переменные и затменные переменные.

Пульсирующие переменные звезды. К пульсирующим переменным звездам относят звезды, связанные с процессами в их недрах. Эти процессы приводят к периодическому изменению звездного блеска, а также изменению других характеристик звезды — температуры поверхности, радиуса фотосферы и т. д.

Цефеиды — группа звезд пульсирующих переменных, названная в честь звезды δ Цефея. Одна из самых популярных цефеидов — Полярная звезда. Для астрономов цефеиды используются в качестве эталона светимости при определении расстояния до удаленных объектов благодаря периодической зависимости от периода ее колебания (один из видов стандартных свечей).

Эруптивные переменные звезды. В эту группу входят звезды, которые меняют свой блеск или меняются только один раз за время наблюдений. Все изменения блеска эруптивных звезд связаны с взрывными процессами на их поверхности или вокруг них или со взрывами самих звезд. Этот класс переменных звезд подразделяется на две подгруппы: звезды, связанные с диффузными туманностями, а также переменные, похожие на новые звезды.

Затменные переменные звезды. К этим переменным звездам относят двойные системы, при вращении которых результирующий блеск периодически изменяется. Причина изменения блеска связана с затмением звезд или изменением формы под влиянием взаимного притяжения в соседних системах, то есть изменчивости геометрических факторов, а не физических изменений.

Переменные звезды и их роль в определении характеристик звезд. Эталонные переменные звезды называют “стандартными свечами”. Интересными объектами для исследования являются периодические переменные звезды. Зная период изменения блеска таких звезд, можно определить их абсолютный блеск, массу, размеры и другие характеристики. Например, средняя абсолютная звездная величина и период цефеида характеризуются следующей закономерностью:

$$M = -2,43LgT - 1.62,$$

где T измеряется в сутках. Соответственно расстояние:

$$5Lgr = m + 5 - M.$$

Образование звезд. Во второй половине XX века астрономы, опираясь на результаты наблюдений, открыли образование звезд в межзвездной среде из молекулярных облаков, в основном содержащих водород и гелий.

От действия случайных сил (например, от колебания гравитационного поля, от внешней ударной волны и т. д.) это облако начинает сжиматься к центру благодаря собственной гравитации. При значительном увеличении плотности сжатая область превращается в глобулу (темная газопылевая туманность) (рис. 71.2). В глобуле образуется сферообразная область и, когда вещество начинает падать на центр, образуется протозвезда.



Рис. 71.2. Глобулы Тэкеря в туманности λ Центавра

Гравитационная энергия сжимающейся протозвезды нагревает ее внутренние слои. При повышении температуры пыль превращается в газ, газ ионизируется, молекулы диссоциируют. Температура центра протозвезды достигает 16—20 млн Кельвина, когда начинается термоядерная реакция синтеза водорода в гелий, давление становится большим и сжатие прекращается. Протозвезда становится звездой.

Этот процесс занимает примерно 50 миллионов лет для звезды, подобной Солнцу. Чем больше область сжатия, тем больше результирующая масса звезды. Дальнейшую судьбу звезды определяют ее масса

и состав, так как в звездной среде могут быть другие элементы, кроме водорода и гелия, а они могут ускорять ход термоядерной реакции и влияют на эволюцию звезды.

Давление, возникающее из-за распределенной энергии в ядре звезды, достигает поверхности, звезда увеличивается, от увеличения снижается температура и давление, под влиянием гравитационной силы звезда вновь сжимается: продолжительность периода вновь возникшей переменной звезды может длиться миллионы лет. Наконец, колебания затухают, звезда переходит в равновесное состояние и превращается в нормальную звезду.

Структура звезды в нормальной стадии жизни (период горения водорода) состоит из трех зон: территория термоядерной реакции (ядро); зона передачи энергии через излучение (радиационная зона) и конвективная зона. Массы этих звезд примерно равны массе Солнца (рис. 71.3).

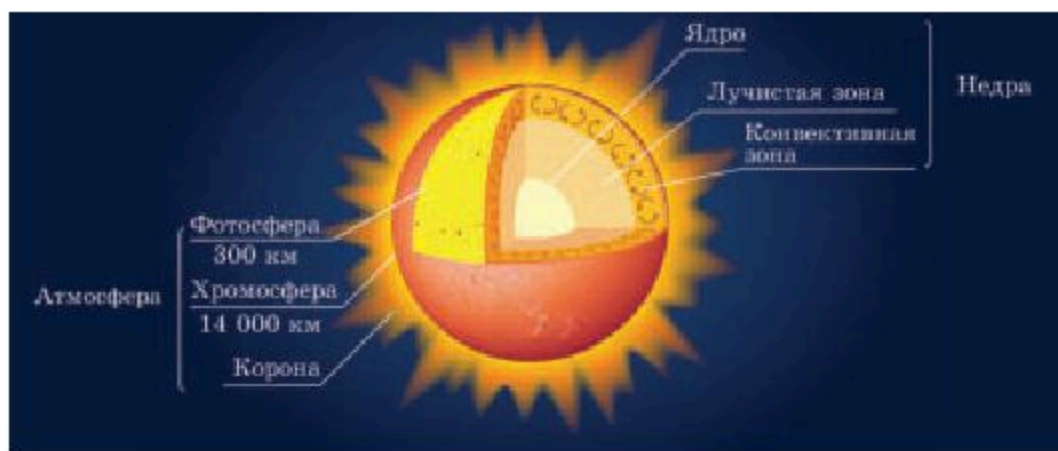


Рис. 71.3. Строение Солнца

Чем больше масса звезды, тем больше ее светимость. При более высокой температуре ее поверхности конвективная зона будет меньше (рис. 71.4).



Рис. 71.4. Расположение зон конвекционной и радиационной передачи энергии звезды в зависимости от цвета и массы.

Спектральные классы звезд. После получения спектров звезд была разработана их спектральная классификация. В начале XX века Герцшпрунг и Рассел создали диаграмму, классифицируя звезду по шкале “абсолютная звездная величина” — “спектральный класс”. В астрономии принято спектральные классы обозначать буквами: O — голубой, B — белый, A, F, G — зеленовато-желтый, K, M — оранжевый). Яркость звезд выражается абсолютными звездными величинами.

На этой диаграмме (рис. 71.5) звезды располагаются вдоль определенных линий. Большинство из них (70%) лежат вдоль линии, называемой главной последовательностью. В этих звездах происходит горение водорода. Со временем эти звезды превращаются в красные гиганты и переходят к другим линиям. Общая диаграмма Герцшпрунга-Рассела описывает эволюцию звезд.

Глядя на диаграмму, можно наблюдать другую закономерность, связанную с эволюцией звезд. Три региона представляют три стадии жизни звезд: главная последовательность — нормальная стадия жизни звезд, зона гигантов и сверхгигантов — “стареющая пора” звезд и зона белых карликов — “могила звезд” (потухшие звезды). Эта диаграмма

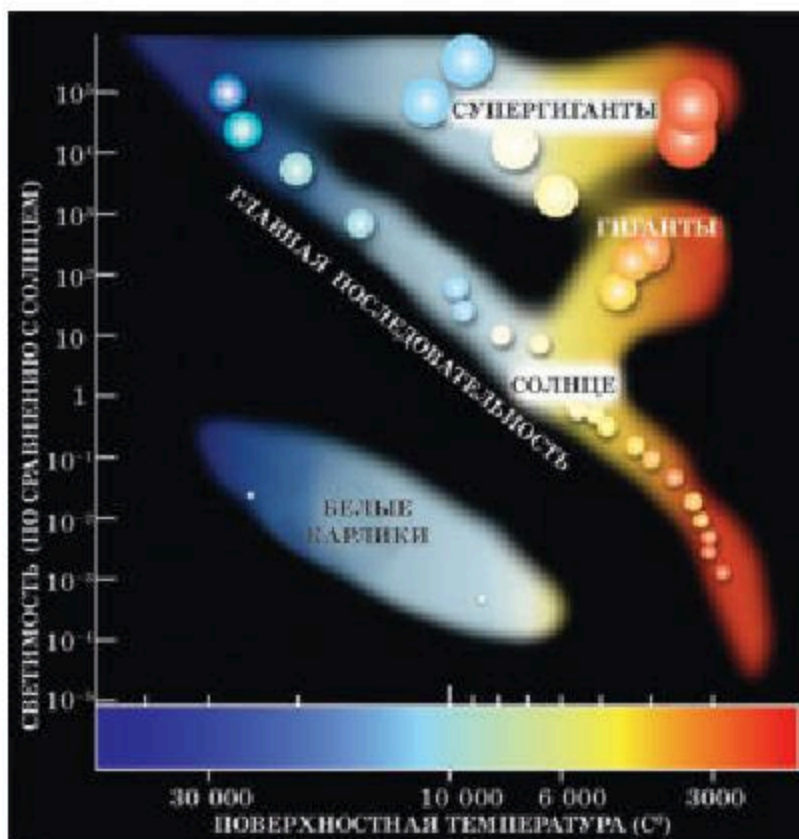


Рис. 71.5. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

еще раз показывает закономерность: чем крупнее звезда, тем больше она располагается в верхней части главной цепи.

Нормальный период звезд зависит от их массы. Жизнь звезд может длиться от миллионов до миллиардов лет. Чем больше масса звезды, тем меньше ее продолжительность жизни. Звезды, масса которых в десять раз превышает Солнце, выпускают в миллионы раз больше света, чем Солнце. В результате запасов водорода в них хватает всего на несколько десятков миллионов лет. А звезды, массы которых приблизительно равны массе Солнца, тратят свое водородное топливо гораздо медленнее, и на протяжении миллиардов лет производят постоянный свет.

Финальная стадия. Звезды, как и во время образования, дестабилизируются, когда гаснут.

В ядре звезды водород сгорает и превращается в гелий. Когда зона горения приближается к поверхности звезды, давление преобладает над гравитацией, заставляя вещество звезды двигаться наружу, размер звезды увеличивается, а температура поверхности уменьшается. Она меняет цвет и становится **красным гигантом**. *Красный гигант* — это гигантская звезда, ядро которой окружено тонкими слоями, выделяющими энергию, а остальная часть является конвективной зоной размером от 100 до 800 Солнечных радиусов.

Гелий начинает гореть, когда внутренняя температура ядра растет, и массы звезды достаточно, чтобы температура ядра поднялась до 100 миллионов градусов (вспышка гелия встречается в звездах с массой $\sim 2,25 M_{\odot}$).

Конечная стадия эволюции звезды определяется его массой (табл. 71.2).

Таблица 71.2

Эволюция звезд в зависимости от их массы

Масса, M_{\odot}	Прохождение ядерных реакций	Процессы эволюции	Конец эволюции
1	2	3	4
0,1—0,5	Источник энергии, водородный слой	Образуется (вырожденное) He-ядро, с течением времени внешняя оболочка исчезает	Гелиевые белые карлики до $0,5 M_{\odot}$
0,5—8	Водородный слой, затем двухслойный источник энергии	Образуется вырожденное CO-ядро, и спустя время в результате взрыва внешняя оболочка образует планетарную туманность (рассеивается за время порядка $\sim 10^4$ лет)	Углеродно-кислородный белый карлик за время порядка $0,5—1,2 M_{\odot}$ и планетарная туманность
8—12	Водородный слой, затем двухслойный источник энергии, а затем горение углерода	2. Образуется вырожденное O-Ne-Mg-ядро, в результате взрыва наружная оболочка рассеивается	1. Кислородно-неоново-магниево-белый карлик с массой $\sim 1,38-1,44 M_{\odot}$
		1. Детонация углеродного ядра — наблюдается сверхновая звезда II типа	1. Во время взрыва звезда полностью рассеивается

1	2	3	4
12—30	Термоядерная реакция в ядре происходит до тех пор, пока не появятся элементы группы железа (Fe, Co, Ni).	Ядро с массой $1,5-2 M_{\odot}$ превращается в нейтронную звезду, наблюдается коллапс II типа или сверхновая звезда Ib/c. Наружная оболочка наблюдается в течение $\sim 10^4$ лет в качестве сверхнового звездного остатка	Нейтронная звезда
> 30	Неизвестно	Неизвестно	Черная дыра

Белый карлик — это небесное тело, образованное из вещества, состоящего в равновесии с вырожденным электронным давлением газа (свойства соответствуют металлам), размеры которого равны Земле, массой $0,1-1,44 M_{\odot}$. Белые карлики из-за отсутствия источника энергии при начальной температуре $\sim 10^4$ К на протяжении десятков миллиардов лет охлаждаются и переходят из горячего белого карлика в фазу коричневого состояния, а затем переходят в невидимый темный карлик. Плотность белого карлика составляет около 10^5-10^9 г/см³, то есть от 100 кг на один сантиметр куб (если состоит из гелия) до миллиона тонн (железа). Может иметь магнитное поле до 10^5 Тл.

Нейтронная звезда — небесное тело, состоящее в основном из нейтронов, размером около 10 км, с массой (в теории $0,1-2,8$) в пределах $1,3-1,6 M_{\odot}$, плотность которого равна плотности атомного ядра ($2,8 \cdot 10^{17}$ кг/м³) (рис. 71.6). Масса его вещества на один кубический сантиметр составляет около 10 млрд. т. Магнитное поле до 10^{11} Тл.

Ядро гигантских звезд массой более $30 M_{\odot}$ превращается в Черную дыру в конце его жизни.



Рис. 71.6. Строение нейтронной звезды, ρ_0 — плотность атомного ядра

Это вы знаете

В центре Галактики находится сверхмассивная черная дыра.

Радиус черной дыры определяется следующим выражением:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где r_g — “гравитационный радиус”, а сфера с радиусом r_g называется “Сферой Шварцшильда”. M — масса звезды, G — гравитационная постоянная, а c — скорость света. Радиусы нейтронных звезд в несколько раз больше их гравитационных радиусов.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Радиус черной дыры прямо пропорционален его массе. То есть если его масса увеличится вдвое, то ее радиус тоже удваивается. А радиусы белых карликов обратно пропорциональны массе. То есть, когда их масса растёт, радиус уменьшается.

Любое вещество, вошедшее в сферу Шварцшильда (даже световой луч), не может возвратиться обратно, поэтому его назвали “Черной дырой”.



1. Из-за чего происходит изменение блеска самых новых звезд?
2. Можно ли через Цефеиды определить массу звезды?
3. К какому типу переменных звезд относятся пульсары?

Пример решения задач

Рассчитайте расстояние до астрономической единицы, если годовой параллакс звезды равен $1''$.

Решение. Используем формулу $r = 206265'' \text{ а/р}$, где $p = 1''$, $a = 150\,000\,000 \text{ км} = 1 \text{ а.е.}$ Поставив эти данные в формулу, получим

$$r = 206265'' * 1 \text{ а.е.} / 1'' = 206\,265 \text{ а.е.}$$

**Упражнение 36**

1. Годовой параллакс Веги равен $0,12''$. Каково расстояние, если мы измерим его парсеком, световым годом, астрономической единицей, километром?

Ответ: 8,3 лет; 27,17 св.год; 1718 875 а.е.; $2,58 \cdot 10 \text{ км}$.

2. Абсолютная звездная величина Солнца $M = +4,8$. Найдите его видимую звездную величину. Расстояние до Солнца 150 млн. км. Если абсолютная звездная величина звезды — 5, то какова ее масса в сравнении с солнечной массой?

3. Посчитайте “гравитационный радиус” Солнца и Земли.



4. Если максимум излучения звезды соответствует длине волны 400 нм, какова ее температура?
5. Звезда движется со скоростью 30 км/ч. Определите, какое расстояние будет проходить в течение 300 000 лет при подсчете в парсеках.
Ответ: 9,2 пс.
6. Определите расстояние до Цефея звездной величины 15, период колебаний блеска — 5 дней.
Ответ: 41 687 пс.
7. Если период колебаний Цефея 20 дней, то какова его плотность?
Ответ: 0,0029 кг/см³.
8. Когда появляется новая звезда, ее сияние увеличивается в 10 000 раз. Насколько изменяется ее видимая звездная величина?
9. Оцените абсолютную звездную величину самой новой звезды, загоревшей в Большом Магеллане в 1987 году, и сравните ее с абсолютной величиной типичной новой звезды. Видимая звездная величина при максимальном блеске равна 3.
Ответ: -18.
10. На расстоянии 10 пк от Солнца появилась новая звезда, рассеянная со скоростью 10000 км/ч. Что будет наблюдаться через 50 лет?
Ответ: В небе будет светлая туманность размером 20°.
11. Блеск новых звезд, как правило, увеличивается при постоянной температуре вследствие расширения фотосферы. Как изменится плотность звезды, если изменение блеска новой звезды имеет 5 звездных величин?
12. Если расстояние до Солнца составляет 150 млн. км, какова абсолютная величина звезды?
Ответ: +4,8.
13. В результате воспламенения в Солнце плазма выбросилась наружу. Сброшенная солнечная плазма достигла Земли через 3 суток и вызвала сильное отклонение в магнитосфере. Определите, с какой скоростью двигалась плазма 1 а.е. = 150 млн. км.
Ответ: 578 км/с.

§ 72. Солнечно-земные связи



Ключевые понятия:

- ✓ полярное сияние
- ✓ Солнечный ветер
- ✓ магнитосфера
- ✓ ионосфера
- ✓ Солнечная активность
- ✓ Космические лучи Солнца
- ✓ магнитные бури
- ✓ космическая погода

На этом уроке вы:

- узнаете, какие связи существуют между Солнцем и Землей, о магнитных бурях, вспышках, Солнечном ветре.



На Земле происходит множество процессов, связанных с воздействием Солнца. Солнце — источник света и тепла для всей жизни на Земле. Климат на Земле практически полностью зависит от Солнца. Ветер, циркуляция воды происходят благодаря воздействию солнечной энергии. Явление суточного переноса (прилив) воздуха, воды и земной коры зависит от параллельного воздействия Луны и Солнца.

Солнечная энергия используется для электрификации и отопления домов. Для этого используются солнечные батареи (электрический ток) и солнечные коллекторы (отопление). Это перспективный, дешевый, экологически чистый источник энергии.

Кроме того, помимо света частицы, идущие от Солнца, вызывают множество явлений. Например, обычно при приближении к полюсам Земли видны сияния в ночном небе.

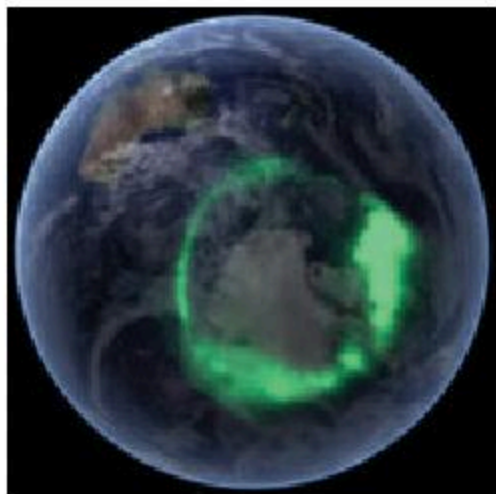


Рис. 72.1. Полярное сияние над Антарктидой, снятое из космоса

Поток заряженных частиц (Солнечный ветер), выходящий из Солнца, отклоняется от Земли магнитным полем (магнитосфера) к полюсам. Они при достижении ионизированного верхнего слоя атмосферы (ионосфера 50—1000 км) сталкиваются с молекулами кислорода и азота, которые возбуждаются и излучают свет (люминофоры). Цвет полярной люминесценции зависит от того, какие молекулы испускают свет: кислород желтый и зеленый, а азот красный и фиолетовый (рис. 72.1). Это уникальное природное явление характерно только для поясов, расположенных вблизи северного и



Рис. 72.2. Северное сияние

Южного магнитного полюса Земли (рис. 72.2). Однако, когда Солнечный ветер бывает очень сильный, полярная люминесценция может показаться и в других местах. Высота сияния составляет 80—1000 километров.

Солнечный ветер может влиять на высокотехнологичные системы Земли, линии электропередач, а также на растения, животных и погодные условия на планете.

Солнечная активность — это совокупность многих явлений на поверхности Солнца. Солнечные пятна — одно из тех явлений, которые любой наблюдатель может увидеть через черное стекло. При высокой солнечной активности солнечные вспышки наряду с усилением солнечного ветра вызывают поток мощных частиц (солнечное космическое излучение). Под их влиянием в основном ухудшается радиационная ситуация на высотах (значительно в высоких горах и самолетах в воздухе). Из-за воздействия **магнитных бурь**, вызванных солнечной активностью, возрастает интенсивность сияний (рис. 72.3). В это время нарушается радиосвязь из-за ухудшения состояния ионосферы и могут возникать геоиндукционные токи в высоковольтных электрических линиях, что приводит к их выходу из строя. При магнитной буре люди, у которых организм чувствителен к изменениям геомагнитного поля, чувствуют себя плохо. С этой точки зрения активность Солнца является важным объектом для исследования. Этим вопросом в настоящее время занимается новая отрасль — **служба космической погоды**.

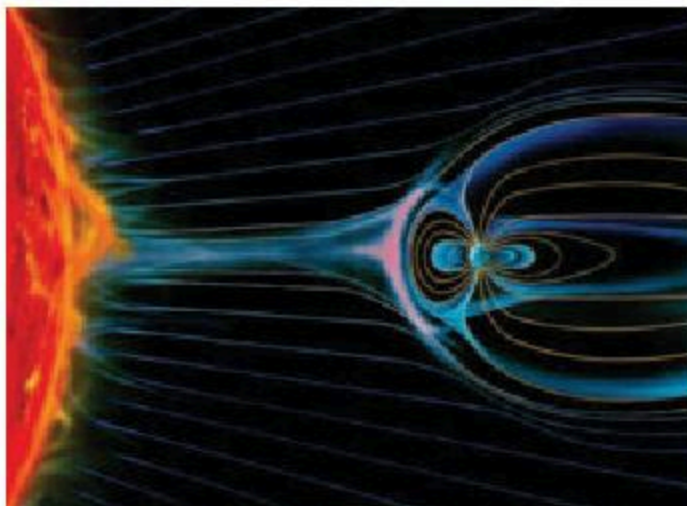


Рис. 72.3. Солнечный ветер и магнитосфера

В настоящее время “космической погодой” называются явления, происходящие в верхних слоях атмосферы, которые определяются активностью наземного космического пространства и явлений на Солнце. В то время как изучение окружающей среды является одним из самых актуальных проблем, солнечно-земная связь имеет большое научное и научно-прикладное значение.

Для того чтобы узнать как процессы, происходящие на Солнце, влияют на Землю, необходимо направить на Солнце специальные зонды. Один из этих зондов — “Улисс” (рис. 72.4).

Он был запущен с целью систематического сбора данных о полюсах и сторонах Солнца, которые непосредственно не видны с Земли.

Существует много нерешенных проблем, связанных с Солнцем. До этого времени проблема солнечного нейтрино, точнее, причина, по которой его измеренное количество меньше, чем расчетные результаты, неизвестна. Для решения таких разнообразных загадок необходимо провести множество новых экспериментов и запускать новые космические аппараты.

Сейчас Солнце достигло среднего возраста. Спустя несколько миллиардов лет Солнце погаснет. Но перед этим оно поглотит планеты Меркурий и Венеру во время стадии красного гиганта. На Земле океаны выкипят, на далеком спутнике Са-



Рис. 72.4. Космический аппарат Улисс

турна, на Титане будут таять ледники, возможно, зародится жизнь. Но само Солнце спустя время угаснет. С медленным сжатием наша звезда достигнет конца активной жизни. Останется белая карликовая звезда, размер которой будет приблизительно равен размеру Земли. Солнце, температура которого медленно будет понижаться до очень низкой, завершит свою жизнь во Вселенной в виде невидимого черного тела — черного карлика.

Человечество долгие годы трудилось, чтобы правильно понять природу Солнца и звезд, и узнать их истинное место во Вселенной. Сегодня мы узнали, что Солнце представляет собой желтую карликовую звезду, которая за последние 5 млрд. лет испускало тепло и свет. Солнце — светило, расположенное ближе к краю галактики, содержащая около 200 млрд. звезд. Оно является основной звездой только для нашей системы планет, ее источником света и жизнью. Оно обеспечивает существование всех тел Солнечной системы.

Итак, в настоящее время мы знаем о Солнце: масса Солнца в 332 940 раз больше массы Земли; линейный диаметр Солнца в 109 раз больше Земли, а объем в 1 301 019 раз; температура на поверхности 5772°C , температура в центре 15700000°C ; Солнце теряет 4 млн. т массы в секунду; ускорение свободного падения на поверхности Солнца в 27,9 раза больше Земли; постоянная Солнца $1,4 \text{ кВт/м}^2$; светимость $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$; абсолютная звездная величина $4,83''$, видимая звездная величина — $26,8''$.



1. Как возникает полярная люминесценция и в чем ее уникальность?
2. Какие исследования в настоящее время проводятся по изучению явлений на Солнце? Какие идеи возникают у вас?
3. Как закончится эволюция Солнца?



Представляют ли опасность для человека, находящегося в высоко летящем самолете, солнечные вспышки и космическая радиация?

§ 73. Планетарные системы звезд. Планеты земной группы и планеты гиганты. Малые тела Солнечной системы



Ключевые понятия:

- ✓ зона обитаемости
- ✓ звезды
- ✓ экзопланеты
- ✓ пояс Койпера
- ✓ облако Оорта
- ✓ астероиды
- ✓ метеороиды
- ✓ метеориты
- ✓ кометы
- ✓ Правило Тициуса-Бодде

На этом уроке вы:

- узнаете о строении Солнечной системы, об образовании планет, о планетах других звезд, об астероидах и кометах.



Согласно современным данным большинство звезд имеют планетарные системы. По данным, собранным космическим телескопом Кеплер (рис. 73.1), запущенным 7 марта 2009 г. и приостановившим работу 30 октября 2018 г., на более чем 3000 планетных системах были открыты более 4000 планет (экзопланеты).

Землеподобные планеты расположены в зоне обитания наиболее интересующей ученых звезд (на таком расстоянии, где из-за температурных условий вода может находиться в жидком состоянии) (рис. 73.2).



Рис. 73.1. Космический телескоп Кеплер



Рис. 73.2. Относительные размеры первых открытых землеподобных планет

Вероятность существования жизни на таких планетах высока. В результате наблюдений в таких регионах было обнаружено около 30-ти землеподобных планет (рис. 73.3).

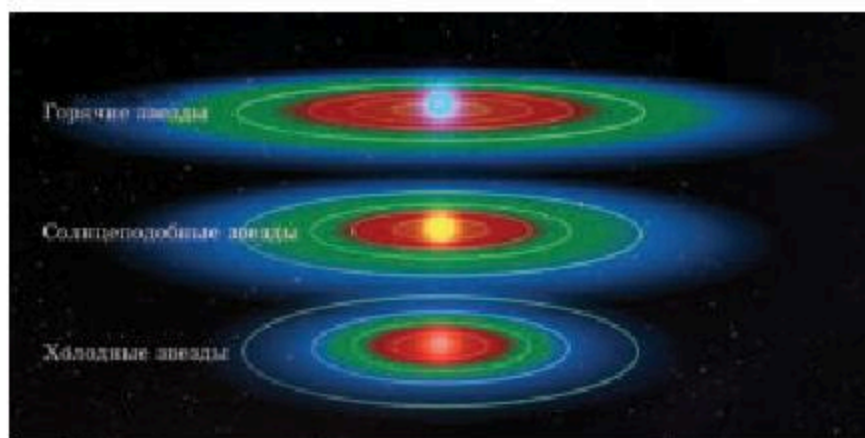


Рис. 73.3. Зона обитаемости желтой и красной карликовой звезды

В настоящее время считается, что в 23% в зоне обитания звезд солнечного типа находятся землеподобные планеты (рис. 73.4).

Солнечная система. Солнечная система, как и другие планетарные системы, образовалась из газопылевого облака. Она сформировалась путем гравитационного сжатия газопылевого облака массой $1,0014 M_{\odot}$, размером не менее $15 \cdot 10^{11}$ км, который имеет все элементы, необходимые для построения Солнца и планет Солнечной системы примерно 4,67 млрд. лет назад.

У новообразовавшегося Солнца и окружающего ее газо-пылевого шарообразного круглого облака были одинаковые химические составы.

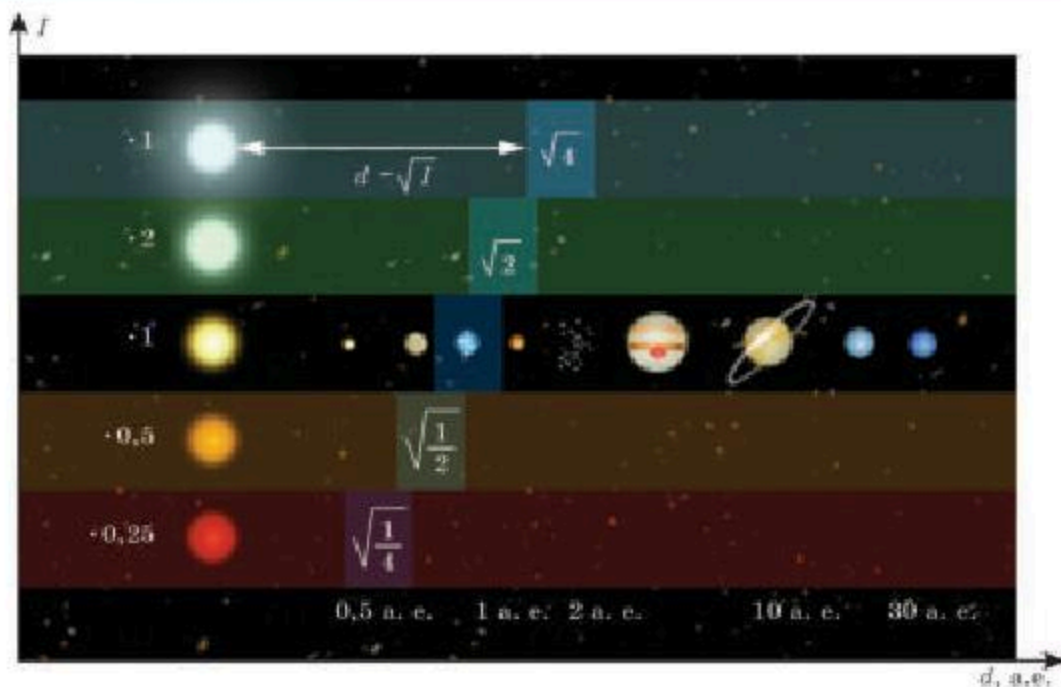


Рис. 73.4. Расстояние и размеры зоны проживания в зависимости от спектрального класса звезды

Общая масса водорода и гелия в них составляли 98%, а остальные тяжелые элементы только 2%. Газопылевые облака содержали сверхлегкие пылевые соединения: углерод, азот и кислород, метан, аммиак, вода, углекислый газ. Этот состав соответствует составу межзвездных туманностей, полученных из наблюдений, состоящими из 99% газа и 1% пылевидных частиц. Со временем в плоскости вращения облака образовался тонкий слой пыли. Разделение облака на концентрированные слои сопровождался увеличением размера частиц до нескольких сантиметров. На следующем этапе эволюции образовались многочисленные мелкие частицы в виде сгустков. В результате вращательного движения диска частицы в сгустках уплотнялись и увеличивались при столкновении друг с другом. Образование протопланеты, размер которой достиг одного километра, ускорило слияние частиц и пыли, встречающихся в облаках до размера планет, в результате чего образовалась планета. После начала солнечного излучения частицы вытесняют газопылевое вещество вокруг Солнца. Поэтому вокруг Солнца появились 4 плотные кремниевые планеты, а дальше орбиты Марса — 4 гигантские планеты, в основном состоящие из водорода и гелия. Часть веществ, не входя в состав планет, превратились в спутники планет, в астероиды, в кометы (в хвостатые звезды). Общая Солнечная система состоит из Солнца и планет, пояса Койпера и облака Оорта (рис. 73.5).

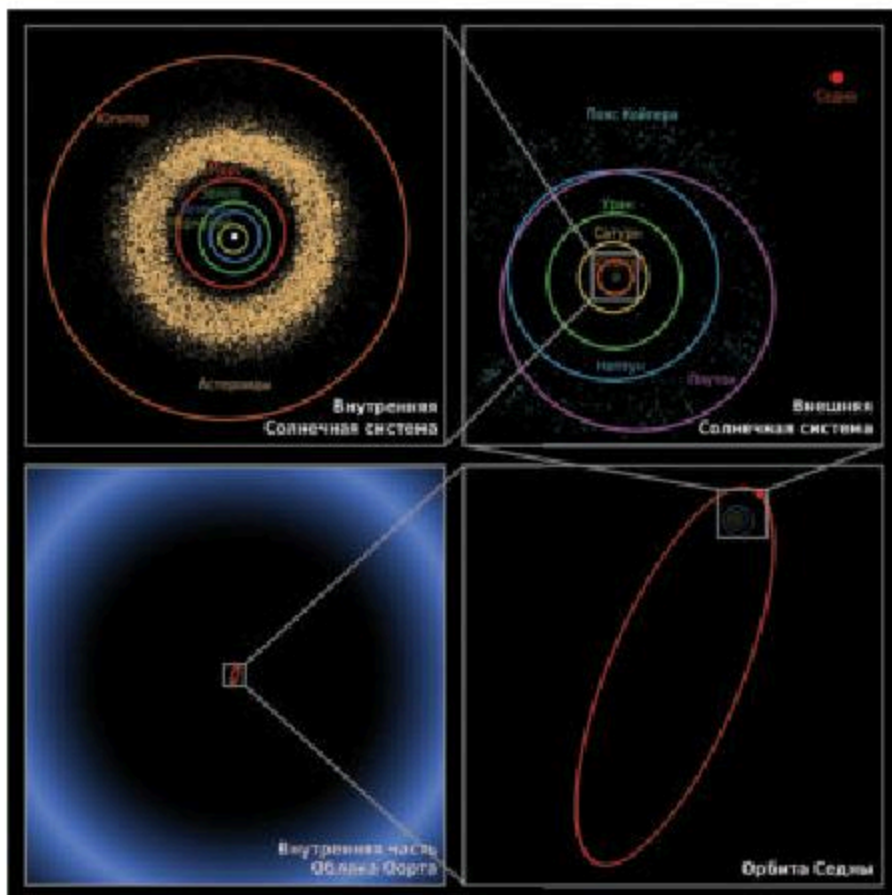


Рис. 73.5. Солнечная система

Размеры 4 планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) с большим количеством силикатов и металлов небольшие и почти без спутников (рис. 73.6). А гигантские планеты (Юпитер, Сатурн, Уран,



Рис. 73.6. Планеты Земной группы

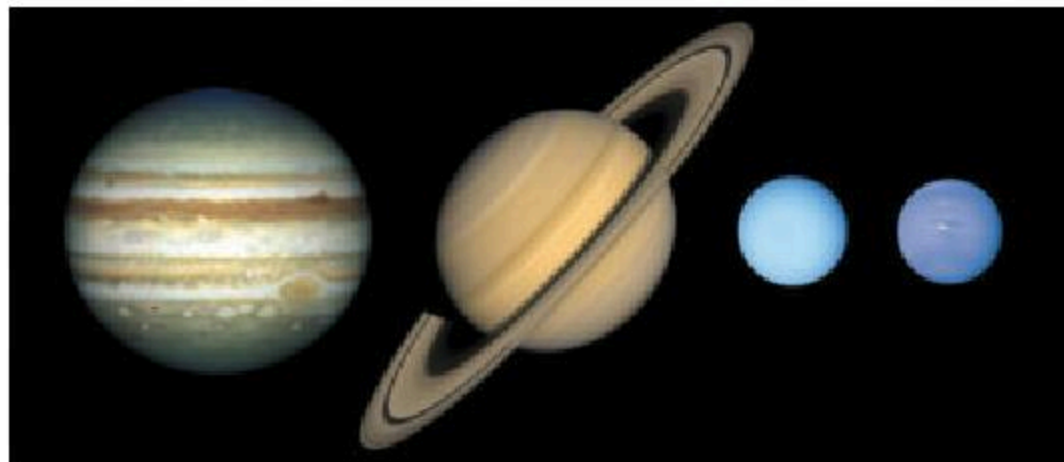


Рис. 73.7. Газовые гиганты

Нептун), состоящие из водорода и гелия, имеют большое количество спутников и меньшую плотность (рис. 73.7).

Орбиты планет Солнечной системы (кроме Нептуна) характеризуются правилом Тициус-Боде:

$$R_i = 0,4 + 0,3 \cdot 2^i.$$

Таблица 73.1

Соответствие планет Солнечной системы с правилом Тициус-Боде

Планета	i	Радиус орбиты (а.е.)	
		По формуле	По наблюдению
Меркурий		0,4	0,39
Венера	0	0,7	0,72
Жер	1	1,0	1,00
Марс	2	1,6	1,52
Пояс астероидов	3	2,8	2,2—3,6
Юпитер	4	5,2	5,20
Сатурн	5	10,0	9,54
Уран	6	19,6	19,22
Нептун			30,06

Зона на расстоянии 2,2—3,6 а. е. от Солнца называется поясом астероидов (рис. 73.8). *Астероид* это относительно небольшое небесное тело, размером больше 30 м. Тела меньше 30 метров называют *метеороидами*. Тело, упавшее на землю, называется *метеоритом*. Вещества, содержащиеся в метеоритах (карбонаты, силикаты и металлы), свидетельствуют о том, что астероиды образовались примерно 4,6 млрд. лет назад, то есть параллельно с планетами. Астероиды также сосре-

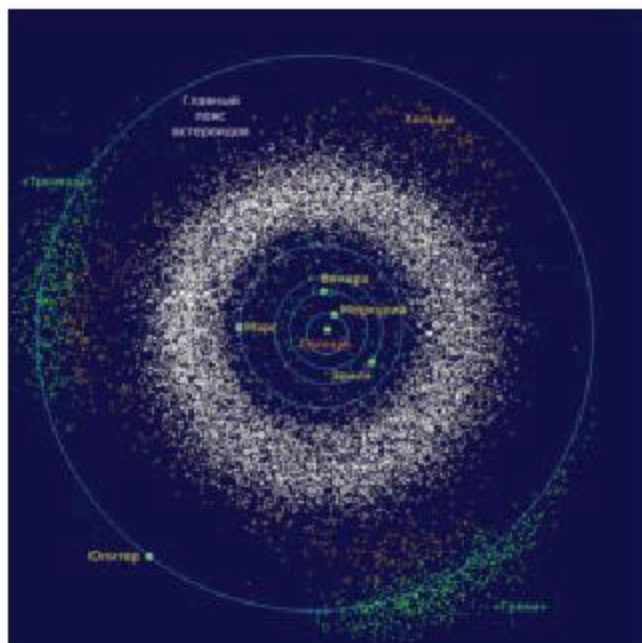


Рис. 73.8. Пояс астероидов, Хильды, Греки и Троянцы

доточены в треугольных точках Лагранжа орбиты Юпитера. Крупные астероиды относятся к малым планетам Солнечной системы (рис. 73.9).

К небесным телам Солнечной системы относятся кометы (хвостатые звезды) размерами не более 10 км, состоящие из пылевых и твердых мелких тел, в основном связанных водой и двуокисью углерода (углекислым газом в твердом состоянии) (рис. 73.10). Считается, что они сосредоточены в облаках Оорта в дальних пределах Солнечной системы. При приближении кометы к Солнцу, двигаясь по вытянутой эллиптической орбите, начинает таять лед и в комете образуются два



Рис. 73.9. Сравнительные размеры астероидов



Рис. 73.10. Фотография кометы 67P/Чурюмова-Герасименко из космического корабля Розетта

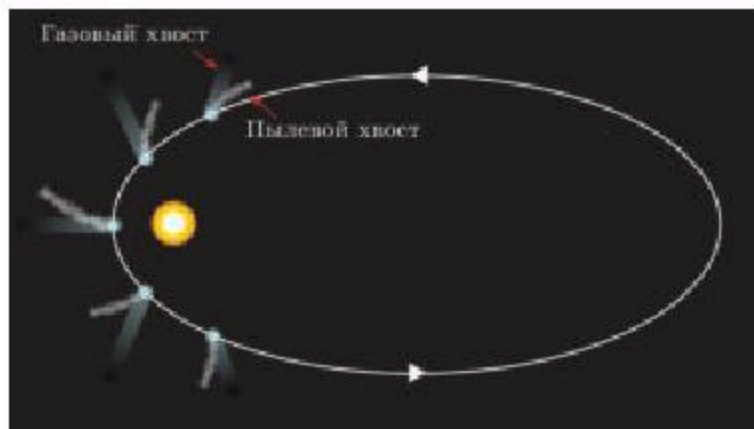


Рис. 73.11. Направление хвостов на траектории движения кометы зависит от Солнца и направления движения

хвоста, состоящие из газа и пыли (рис. 73.11). Общее количество зарегистрированных комет — 6339. Межпланетное пространство состоит из газа и пыли в меньшей концентрации.

Закономерности, характерные для Солнечной системы (табл. 73.2):

- орбиты всех планет лежат на плоскости солнечного экватора;
- орбиты планет, движущихся вокруг Солнца, близки к кругу;
- среднее расстояние планет до Солнца подчиняется закону Тициуса-Боде;

Боде;

- планеты в Солнечной системе вращаются по орбитам вокруг Солнца в том же направлении, в каком вращается и Солнце, шесть планет также вращаются вокруг своей оси в этом же направлении, кроме Венеры и Урана;

- 99% массы солнечной системы принадлежит Солнцу;
- 98% момента движения приходится на долю планет.

Таблица 73.2

Характеристики планет Солнечной системы

Планета (карликовая планета)	Диаметр, (ра- диусом Земли)	Масса, (с зем- ной массой)	Радиус орби- ты, а.е.	Пери- од, год	Суточ- ная продол- жительность	Плот- ность, кг/Мі	Количе- ство спут- ников
1	2	3	4	5	6	7	8
Меркурий	0,382	0,055	0,38	0,241	58,6	5427	0
Венера	0,949	0,815	0,72	0,615	243	5243	0
Жер	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5515	1
Марс	0,53	0,107	1,52	1,88	1,03	3933	2
Церера	0,074	0,00015	2,76	4,6	0,378	2161	0
Юпитер	11,2	318	5,20	11,86	0,414	1326	79

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
Сатурн	9,41	95	9,54	29,46	0,426	687	62
Уран	3,98	14,6	19,22	84,01	0,718	1270	27
Нептун	3,81	17,2	30,06	164,79	0,671	1638	14
Плутон	0,186	0,0022	39,2	248,09	6,387	1860	5
Хаумеа	-0,11	0,00066	43	281,1	0,163	-2600	2
Макемаке	0,116	-0,0005	45,4	306,28	0,324	-1700	1
Эрида	0,182	0,0028	67,8	558,04	1,1	2520	1



1. Из чего образуются планетные системы звезд?
2. Почему для правильного понимания эволюции Солнечной системы так важно изучение астероидов и комет?
3. Почему кометы имеют два хвоста?

§74. Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары



Ключевые понятия:

- ✓ Звездное скопление
- ✓ квазары
- ✓ красное смещение спектра

На этом уроке вы:

- узнаете строение и состав галактики, виды, формы и размеры Галактик, что такое квазары.



Солнечная система входит в состав галактики “Млечный Путь” (рис. 74.1). В центре шарообразного ядра (балдж) Млечного пути находится гигантская черная дыра, остальная часть дискообразна, состоит из около 200 млрд. звезд, газопылевых туманностей и темной материи. Диаметр галактики составляет около 100 тысяч световых лет. Двигаясь вокруг центра Галактики, Солнечная система примерно за 200 млн. лет совершает один оборот. С момента образования Земли солнечная система сделала уже 23 оборота вокруг центра галактики.

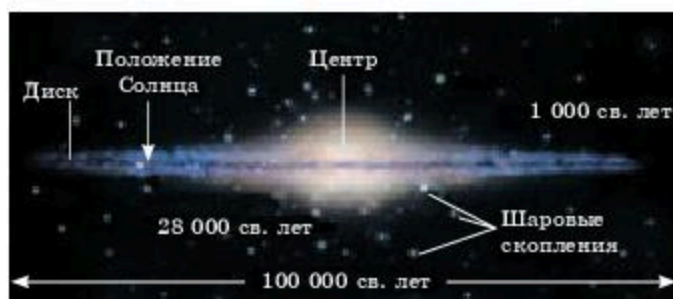


Рис. 74.1. Место Солнечной системы в галактике

Формы и размеры галактик разные (табл. 74.1). Диаметр самой маленькой наблюдаемой галактики — 5 кпк, а самой большой — около 600 кпк.

Таблица 74.1

Характеристики галактики

Описание	Интервал	Млечный Путь
Диаметр D25	5—250 кпк	30 кпк
Толщина диска	0,3—1 кпк	0,7 кпк
Мерцание	10^7 — 10^{11} L _☉	$5 \cdot 10^{10}$ L _☉
Масса	10^7 — 10^{12} M _☉	$2 \cdot 10^{11}$ M _☉
Доля газовой массы	0,1—30 %	2 %
v, скорость вращения	50—300 км/ч	220 км/ч (вокруг Солнца)
Период	10^8 — 10^9 лет	$2 \cdot 10^8$ лет (вокруг Солнца)
Масса центральной черной дыры	$3 \cdot 10^6$ — $3 \cdot 10^9$ M _☉	$4 \cdot 10^6$ M _☉

Существует четыре основных вида галактик (рис. 74.2):

1. Эллиптические галактики (E) — галактики без диска.
2. Спиральные галактики (S) — дисковые галактики со спиральными рукавами.
3. Линзовидные галактики (S0) — дисковые галактики без спиральных рукавов.
4. Неправильные галактики (Irr) — галактики, состоящие из 50% межзвездного газа, с неправильными конструкциями, имеют хаотичную форму без ярко выраженного ядра и спиральных ветвей.

Есть только четыре видимых галактик: Андромеда M31; Галактика Треугольника M33 (очень трудно увидеть); большое Магелланово облако и малое Магелланово облако.

Газы в галактике, в основном, сосредоточены близко к его плоскости. Они распределены неравномерно. Кроме гигантских облаков, имеющих неоднородную структуру длиной несколько тысяч световых лет, в этот состав также входят небольшие облака, величина которых не превышает одного парсека.

Химический состав нашей галактики состоит в основном из водорода и гелия. По сравнению с этими двумя элементами остальные элементы встречаются в небольших количествах.

В нашей Галактике встречаются лишь 30% одиночных звезд, таких как Солнце. В основном звезды являются частью двух или нескольких звездных систем. В галактике рассеянные звезды (состоящие из десятков звезд) и шаровидных (состоящие из ста тысяч звезд) звездных скоплений.

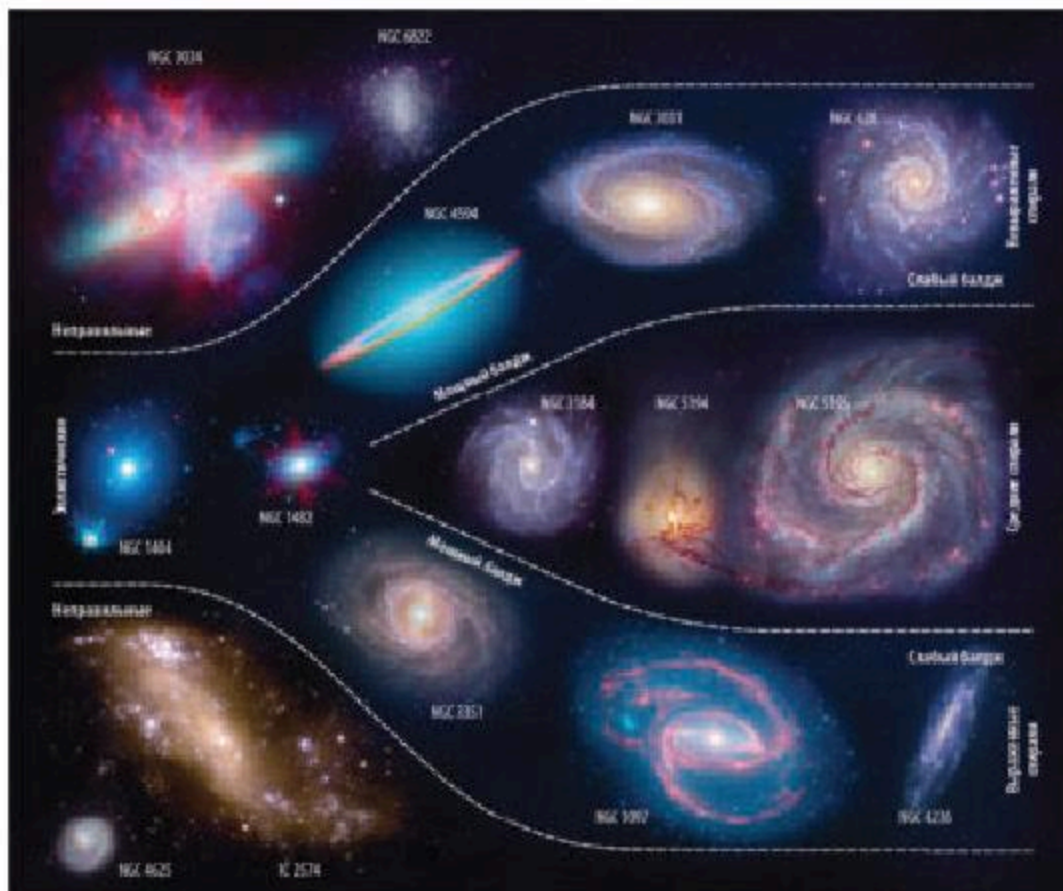


Рис. 74.2. Виды галактик

Шаровые звездные скопления расположены недалеко от центра галактики. В регионах, наиболее близких к центру галактики, количество звезд в каждом кубе парсека достигает нескольких тысяч. Если бы мы жили на планете, близкой к ядру галактики, то в небе было бы несколько тысяч звезд ярче даже самой яркой звезды нашего современного неба.

Количество рассеянных звездных скоплений значительно больше, чем шаровых скоплений звезд, они в основном расположены на ветке спирали галактики (речь идет о спиральной галактике).

Ядро галактики находится в направлении созвездия Стрельца. Скорость вращения галактики в центре начинается с нуля и увеличивается до 200-240 км/ч на расстоянии более 2 тысяч световых лет и остается стабильной. Возраст галактики превышает 12 млрд лет.

Открытие других галактик. Примерно сто лет назад считалось, что все видимые туманности относятся к нашей Галактике. Это было связано с трудностями определения расстояний до них. Благодаря

новым методам измерения выяснилось, что видимая Вселенная полна галактик. В настоящее время в наблюдаемом мире существует около 2 трлн. галактик. Они расположены в группе. Галактики распределяются между собой и удаляются друг от друга на расстоянии, определяемом с помощью наиболее чувствительных средств. В местном скоплении галактик наряду с вышеуказанными галактиками есть еще более 60 членов. С ночного неба южного полушария мы можем наблюдать за ближайшими к нам галактиками — “Магеллановы Облаками”. “Магеллановы облака” намного меньше Млечного пути. Они являются спутниками нашей Галактики.

На расстоянии 2,62 млн световых лет от нас находится Андромеда. Это самая крупная галактика в нашей группе — ее размер в два раза больше нашей галактики (около 1 трлн звезд). Размер галактики Треугольника в 2 раза меньше нашей галактики. Она находится на расстоянии 2,8 млн световых лет от нас.

К крупнейшим в мире галактикам относятся эллиптические галактики. Некоторые из них являются шарообразными, а некоторые — растянутыми. Согласно каталогу, состоящему из 800 тысяч галактик, около 80% от общего числа галактик спиральные, 17% эллипсные и 3% неправильные галактики. Расстояние до галактик определяют различными методами: методом цефеид, также с помощью новых и сверхновых звезд.

Квезары. Квезар (от англ. *quasar, quasistellar radiosourse* — квазизвездный источник радиоизлучения) — самый мощный источник излучения в мире. Эти небесные тела производят в минуту огромную энергию, больше чем энергия, выработанная за 10 млн. лет Солнцем. Их яркость может быть в сто раз больше, чем яркость целой галактики. Многие квазары — мощные источники рентгеновского излучения. Квезары являются самыми дальними телами в космосе (расстояние до них составляет миллиарды световых лет), их спектр красного смещения достигает до величины $Z = 7,5$. Квезары считаются юными, активными ядрами очень далеких галактик.



1. В каком месте нашей планеты расположены шарообразные скопления звезд?
2. Чем отличаются квазары от обычных галактик?
3. Можно ли контролировать галактику Магелланового Облака в открытую ночь в Алматы?
4. Можно ли определить расстояние до квазара путем изменения периода мерцания?



Упражнение 37

1. Звезда расположена на расстоянии 5,5 кпк от центра галактики и движется со скоростью 200 км/ч. Найдите время, когда звезда совершит полный круг во время кругового движения центра галактики.

Ответ: 10⁷л.

2. В ночь с 23 по 24 февраля 1987 года астрономы зафиксировали вспышку новейшей звезды на большом Магеллановом облаке на расстоянии 55 кпк. Определите год истинного появления этого явления.

Ответ: 179 300 лет назад

§75. Теория Большого взрыва. Красное смещение. Определение расстояния до галактик



Ключевые понятия:

- ✓ общая теория относительности
- ✓ гравитационные волны
- ✓ Большой взрыв
- ✓ темная энергия, темная материя

На этом уроке вы:

- познакомитесь с теорией Большого взрыва, понятиями темной энергии и темной материи, узнаете о законе Хаббла и о модели Вселенной.

Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) — современная теория гравитации. Общая теория относительности важна только в больших масштабах. Данная теория утверждает, что пространство-время и материя влияют друг на друга. Материя влияет на размеры, кривизну пространства и на ход времени, а пространство-время задает закономерности движения тел. Пространство вокруг предмета растягивается, а время замедляется. Например, истинный объем в районе нейтронной звезды больше видимого объема. А время замедляется ближе к поверхности звезды. Теория относительности также предполагает гравитационные волны (рис. 75.1). В 2017 году Нобелевская премия по физике была присуждена за открытие гравитационных волн.

Гравитационная волна является распространением пространственно-временных искривлений. Возможность их регистрации поможет получить новые данные о Вселенной.

В рамках этой теории (ОТО) работает космология, изучающая Вселенную в целом. По существующим понятиям, Вселенная возникла после Большого взрыва и прошла очень быстрый этап расширения, называемый *инфляцией*. Лишь спустя 13,7 млрд. лет быстрое рас-

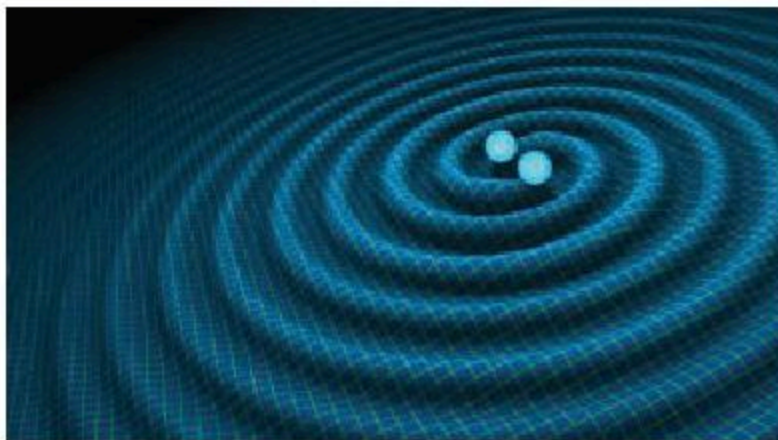


Рис. 75.1. Гравитационное волновое излучение двойных звезд

ширение сочетается с нынешним периодом медленного расширения. Поскольку мир плоский, он не имеет пределов, то расстояние, которое мы можем контролировать, связано с возрастом мира, так как наличие предельной скорости света ограничивает нашу зону наблюдения.

Здесь следует также отметить понятия темной энергии и темной материи. *Темная энергия* — поле, равномерно заполняющее пространство Вселенной. Именно она способствует ускоренному расширению Вселенной, но ее природа пока неизвестна. *Темная материя* — неизвестный вид материи, сосредоточенный в окрестностях галактик, который не участвует в электромагнитном и сильном взаимодействии. На сегодняшний день установлено, что 68,3% вещества во всем мире состоит из темной энергии; 26,8% — из темной материи; лишь 4,9% — из известного нам вещества. Сейчас большое внимание уделяется исследованиям именно в этом направлении, потому что действительно удивительно, что известное нам вещество меньше незначительных пяти процентов!

После большого взрыва Вселенная начала расширяться и остывать (рис. 75.2). Когда возраст Вселенной составлял 400 тысяч лет, за исключением темной энергии и темной материи, вещество состояло из электронов, протонов, нейтронов и электромагнитного излучения. Далее в процессе расширения Вселенной температура упала до 4000 К, материя перешла в прозрачное для света состояние и появилось свободное электромагнитное излучение, называемое *реликтовым микроволновым фоновым излучением*. Спустя миллионы лет с начала расширения Вселенной сформировались устойчивые атомы. Далее атомы объединились в молекулы. Гравитация на протяжении сотен миллионов лет, собрав материю в огромный сгусток вещества, в большие облака водорода и гелия, образовала современные галактики.



Рис. 75.2. Эволюция Вселенной

Наша галактика и другие галактики объединились и образовали большие группы галактик, размеры которых составляют сотни миллионов световых лет. Они последовательно соединены через все Метагалактическое пространство. Метагалактика — это часть Вселенной, доступная современным астрономическим методам исследования. Объем Метагалактики имеет пористую структуру, в больших масштабах она объединяется в филаменты (волокна длиной 60—80 Мпк) (рис. 75.3). Такова структура однородной и изотропной Метагалактики, которая образовалась в огромном масштабе.

Гравитационные поля внутри галактик превращают эту материю в горячие звезды. Здесь появляются и гаснут звезды. На последней стадии своей жизни гигантские звезды образуют взрыв сверхновых

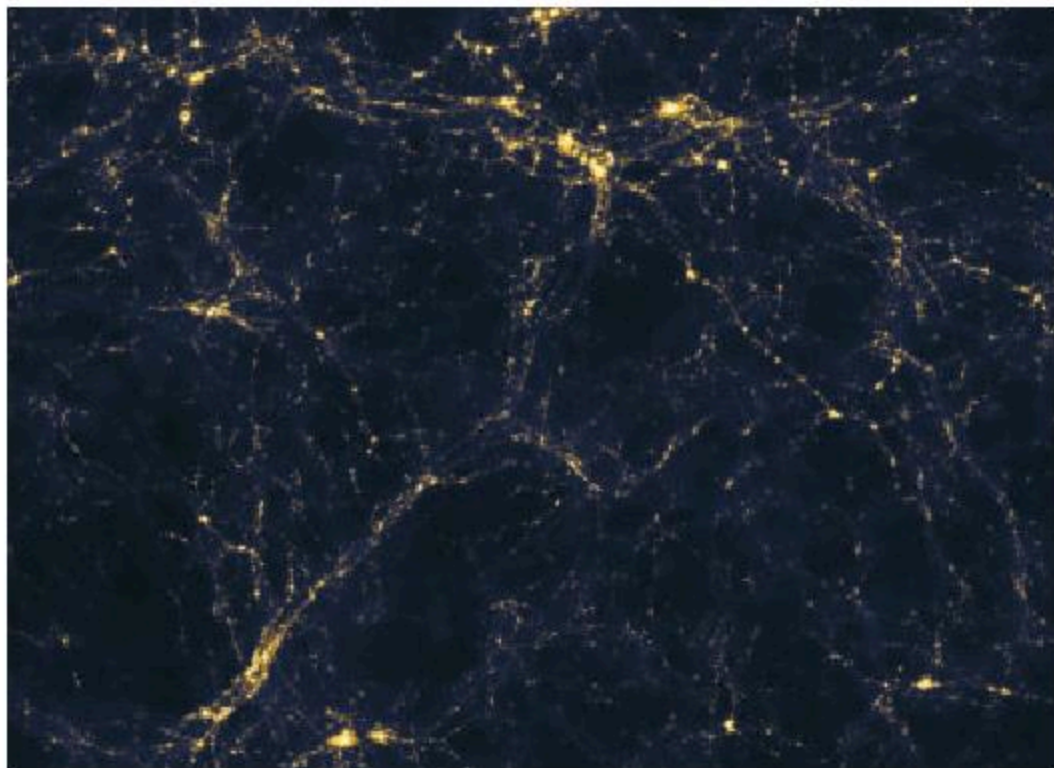


Рис. 75.3. Самая крупномасштабная структура Вселенной — филаменты

звезд и отправляют в космическое пространство элементы, являющиеся основой жизни, в частности, кислород для дыхания, необходимый для организма углерод, железо для крови и т. д. При появлении облаков, содержащих газ и пыль, после взрыва, эти элементы были собраны под влиянием гравитационной силы и появилась новая звезда, то есть Солнце. Рядом с ним стали образовываться планеты. Это событие произошло около 4,6 млрд. лет назад. На одной из этих планет развивались живые существа и теперь их сознательный разум пытается понять, как появилась жизнь. С момента Большого Взрыва прошло около 13,7 млрд. лет. Появился современный вид мира (табл. 75.1).

Данные, свидетельствующие о взрывном характере возникновения мира, ученые находят и в настоящее время. Это:

- наличие в космосе реликтового микроволнового фонового излучения с момента возникновения мира;
- красное смещение в спектрах галактики, вызванное расширением мира;
- из-за начальной нуклеосинтеза на один атом гелия приходится 12 атомов водорода.

Этапы развития мира

Время	Температура	Состояние Вселенной
$10^{-45} - 10^{-37}$ с	выше 10^{26} К	Инфляция (сверхбыстрое расширение Вселенной)
10^{-6} с	выше 10^{13} К	Появление кварков и электронов
10^{-5} с	10^{12} К	Появление протонов и нейтронов
10^{-4} с—3 мин	10^{11} — 10^9 К	Образование дейтерия, гелия, ядер лития
400 тыс. лет	4000 К	Появление атомов
15 млн. лет	300 К	Продолжение расширения газового облака
1 млрд. лет	20 К	Появление первых звезд и галактик
3 млрд. лет	10 К	Появление тяжелых ядер в момент взрыва звезды
10-13 млрд. лет	3 К	Возникновение планеты и жизни

Тогда как мы знаем, что на сегодняшний день возраст Вселенной 13,7 млрд. лет, 10^{18} с, размеры обозримого пространства 93 миллиарда световых лет, 10^{27} м (рис. 75.4). Согласно гипотезам ученых, помимо этой Вселенной могут быть другие параллельные миры (гипотеза мульти-миров). В этих Вселенных фундаментальные стабильные константы могут быть совсем другими и даже внешние виды Вселенных могут отличаться. На самом деле, при незначительном изменении констант мир не был бы таким, каким мы его знаем и вряд ли человек мог бы жить там. Это обстоятельство объясняется антропным принципом. При данных мировых константах формирование жизни такое, каким мы его наблюдаем сейчас. Мы надеемся, что будущие исследования прояснят эту ситуацию.



Рис. 75.4. Масштаб обозримой Вселенной (в логарифмическом масштабе)

Закон Хаббла. В 1929 году американский астроном Эдвин Хаббл обнаружил, что чем дальше галактика, тем она быстрее удаляется, и тем больше ее спектр смещается в красную область:

$$v = HR,$$

где v — скорость удаления галактики, R — расстояние до нее, H — постоянная Хаббла ($67,80 \pm 0,77$ (км/с)/Мпк). Закон Хаббла применяется только для дальних

галактик. Закон Хаббла подтверждает увеличение Вселенной, то есть ее появление в результате Большого взрыва.

Величина красного смещения:

$$Z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda},$$

где λ_0 — измеренная длина волны, λ — начальная длина в спектре. В настоящее время наибольшая величина красного смещения составляет 11,09, что является характерной для галактики GN-z11 на расстоянии 13,39 млрд. светового года.

Модель Вселенной. Современная модель нашей Вселенной называется Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter). Модель Λ CDM стала стандартной моделью после открытия в 1998 году ускоренного расширения Вселенной, так как противоречия бывших моделей решались здесь простым и естественным образом. Эта модель предполагает, что Вселенная, помимо барионной материи, состоит из лямбда члена — темной энергии и холодной темной материи. Расширение Вселенной по некоторым альтернативным моделям, обобщающим Λ CDM, сменится ее сжатием, и мир исчезнет. По прогнозам другой модели сжатие Метамира приводит к повторному увеличению. По третьей гипотезе увеличение мира будет продолжаться всегда. Свет всех звезд с течением времени рассеется, а галактики растворятся в темноте.



1. Каковы размеры Метагалактики?
2. Какие доказательства существуют в настоящее время в теории Большого взрыва?
3. Сколько лет нашему Солнцу?
4. Сколько лет нашей Галактике?
5. Какова структура метагалактики?
6. Что показывает красное смещение в спектре Вселенной?
7. Почему фон излучения с температурой 3000К называется реликтивным?
8. Если скорость удаленности галактики составляет 1000 км/ч, найдите расстояние от этой галактики до мира?
9. Что подтверждает закон Хаббла?

§76. Мысли о жизни и Вселенной. Космическое будущее человечества и освоение космоса



Ключевые понятия:

- ✓ жизнь в космосе
- ✓ космические исследования

На этом уроке вы:

- узнаете о жизни и сознании в мире, о масштабах и современных областях науки, о космическом будущем человечества.



Достижения и трудности современного общества неразрывно связаны с развитием науки и техники. Благодаря развитию науки за последние сто лет средняя продолжительность жизни человека выросла вдвое и население превысило семь миллиардов человек. Человек достиг дна океана, и даже смог выйти в космос и долететь до Луны, стал способным обрабатывать огромную информацию и быстро связывать друг с другом любого человека на любом расстоянии. Более того, без науки не было бы ядерного, химического и биологического оружия и многих экологических катастроф, угрожающих массовым уничтожением человечества. Эти и многие другие примеры могут служить выражением мощи, разнообразия и сложности науки.

С одной стороны, удивительные загадки окружающего мира привлекательны, а с другой стороны, это могущество, которое может уничтожить человечество и все живые существа на Земле. Такая опасная сила требует особого подхода к себе. Однако, выгода, полученная от науки, гораздо больше, чем нанесенный ею вред, поэтому современное общество прилагает большие усилия для развития науки.

Каждое государство, которое возлагает большие надежды на будущее, уделяет особое внимание науке, и поощряет к ней талантливую молодежь. Мы тоже не должны остаться в стороне, нам нужно продвигать в нашей стране науку. Ведь светлое будущее страны тесно связано с умением в совершенстве освоить науку во всех отраслях хозяйства. То есть, уровень науки в государстве должен быть таким, чтобы, по крайней мере, ученые могли понимать и осваивать новые открытия, происходящие в мире.

Жизнь и сознание во Вселенной. Зная, что наши знания по всей Вселенной ограничены, известный астроном Шепли Харлоу сказал, что есть три основных вопроса, на которые человечество должно ответить в будущем. Это: Что такое Вселенная? Какова ее природа? Почему она существует?

Если вопросы касаются этой жизни, мы не можем полностью ответить ни на один из них. Что такое жизнь? Как она зародилась? В целом, проблемы жизни привлекли и будут привлекать к себе самых известных мыслителей мира.

Хотя в теории возникновения и развития небесных тел астрономия достигла больших успехов, есть еще много неизвестных проблем по поводу появления и развития жизни и сознания. Мнение о том, что разумное существование распространено не только на нашей планете, но и во многих других мирах было за много лет назад, даже тогда, когда астрономия еще не сформировалась.

Для того, чтобы ответить на вопрос о наличии небесных тел с сознательной жизнью вне Земли и о том, много ли их или мало, необходимо усовершенствовать средства наблюдения или сначала ответить на следующие вопросы: Часто ли встречаются в мире благоприятные условия для возникновения видов жизнедеятельности и может ли жизнь существовать во всех этих условиях?

Сколько на это нужно времени? Возможно ли существование, кроме жизни на Земле? Может ли существование эволюции жизни привести к осознанному существованию в разное время? И какова продолжительность времени, необходимого для появления сознательной жизни?

Что такое сознание? По прогнозам некоторых ученых, сознание человека является синонимом человеческого языка. По мнению других, сознание является одним из познавательных качеств людей, развитие сознания может достигать разных высот и имеет недостатки и достижения. А по третьему мнению, сознание является замкнутой ветвью развития человечества.

Если бы в одном месте Вселенной обнаружили обитатели, то все изложенные предположения были бы подтверждены или опровергнуты. Таким образом, после приведенных выше дискуссий можно сделать следующее заключение.

В результате обнаружения сложных молекул были найдены звезды со спутником, такие как наша планета, благоприятные для жизни сознательного существования. Поэтому вполне возможно совершить космическое путешествие к этим планетам.

Эффективный способ поиска сознательной жизни — исследование радиосигналов. Не удивительно, что их будут отправлять сознательные существа, живущие на других планетах. Однажды радиотелескопы, установленные на Земле или на Луне, смогут безошибочно зарегистрировать прибывшие радиосигналы, открыть космическую радиосвязь. В этот момент мы узнаем, что есть внеземные существа, наделенные сознанием, но которых мы не сможем встретить в ближайшее время.

Но ничто не сравнится с тем, что человек сам увидит и сделает собственными руками. В течение ближайших десятилетий человек может самостоятельно посещать и изучать и даже осваивать поверхность других планет или ее спутников. Эпоха полета человечества в космос началась в XX веке, в частности, первая женщина-космонавт полетела в космос и облетела Землю. Первые люди побывали на Луне.

12 апреля 1961 года Юрий Гагарин, стартовавший с казахских степей, с космодрома Байконур, облетел Земной шар. Его первое слово после возвращения на Землю было: “Я — житель этой планеты”. В этом году Джон Гленн 3 раза облетел Землю. В 1963 году женщина-космонавт Валентина Терешкова полетела в космос, а 18 марта 1965 года Алексей Леонов впервые вышел в открытый космос. 20 июля 1969 года впервые на Луне побывал американский космонавт Нил Армстронг. 16 июля 1976 года космонавты Америки и Советского Союза впервые приветствовали друг друга в открытом космосе. В настоящее время на орбите Земли летает огромная орбитальная станция “Альфа”. На ней работают международные экипажи, изучающие космос.

Для устранения пробелов в исследовании Солнечной системы в космос были запущены станции “Вояджер”, “Кассини”, “Улисс” и были запущены другие автоматические зонды. Автоматическое судно “Вояджер-2” было запущено с Земли 20 августа 1977 года с космодрома на мысе Канаверал. Оно достигло планеты Нептун через 12 лет.

После встречи с Нептуном траектория станции “Вояджер-2” отклонилась на южное полушарие. Теперь она пролетела эклиптику в Южном полушарии под углом 48° и со скоростью 16,9 км/ч. Ожидается, что в будущем “Вояджером” предстоит пересечь гелиопаузу.

Скорость солнечного ветра (ионизированных частиц рассеянного атома Солнца) составляет около 400 км/с. Пока неизвестно, где его динамическое давление будет соответствовать межзвездному магнитному полю. Тем не менее, полагают, что “Вояджер” вошел в гелиопаузу в 2012 году. Энергия радиоизотопных термоэлектрических батарей хватает до 2026 года при минимальном функционировании аппаратов. При этом мощность батареи падает до 240 Вт. Через миллионы лет “Вояджеры” удалятся от Земли на расстояние, равное 60 световым годам.

“Вояджер-2” внес большой вклад в развитие науки, направив на Землю фотографии и ценные сведения о гигантских планетах и их спутниках.

В XX—XXI вв. были открыты малые тела Солнечной системы, в том числе карликовые планеты, плутино, некоторые из них их спутники и спутники гигантских планет.

Все планеты изучались в общем виде, а поверхности Луны, Венеры, Марса непосредственно. В других звездах открыты планетарные системы.

В звездной астрономии были созданы теории, основанные на эволюции и внутренней структуре звезд. Открыты белые карлики и нейтронные звезды.

В галактической и вне галактической астрономии была разработана и определена модель Вселенной, также выявлено ускоренное расширение. Были найдены методы определения расстояния до самого удален-

ного объекта Вселенной. Изучены строение и особенности ядра нашей Галактики, их плотности. Предложена крупномасштабная структура Вселенной.

Ежегодно с Земли летают десятки автоматизированных межпланетных спутников (АПС). Они исследуют ближний и дальний космос.

Первые люди Земли могут попасть на поверхность другой планеты, и даже будет не удивительно, что в космосе они могут провести свой отдых.

Впервые в истории людей Земли есть доказательство того, что существует планетарная система других звезд. По мнению ученых, только в нашей Галактике могут существовать миллионы планет, похожих на Землю. И в то же время на них может быть жизнь. Радиотелескопы, размещенные на поверхности Земли, уже много лет ищут радиосигналы, которые могут прислушиваться к радиоэфиру и передавать сигналы другим планетам. Телескопы гигантских обсерваторий, как машина времени, следят за светом, путешествующим в космическом пространстве миллионы лет. Чем глубже астрономы углубляются во Вселенную, тем они глубже погружаются во времени.

Человечество своим могущественным умом не только распознает вселенную, но и овладевает ею. Доказательством этого являются космические корабли, научные орбитальные корабли, изучающие Солнечную систему.

Астрофизический институт им. Фесенкова является основным научным учреждением в Казахстане, проводящим фундаментальные исследования в области астрономии и астрофизики. К научной работе АФИ относятся астрономические наблюдения, теоретические исследования и компьютерное моделирование. Основными областями теоретических исследований являются изучение активных ядер галактик на основе динамики звезд и астрофизических вычислений, небесной механики, численного моделирования, развитие космологической модели мира в молодом возрасте, изучение эволюции и возникновения структур во Вселенной, изучение природы черных материй и черной энергии.

Среди астрономических обсерваторий в Мире известны две наблюдательные обсерватории, расположенные в высокогорных горах вблизи Алматы (рис. 76.1, 76.2). Исследования в этих обсерваториях проводятся на телескопах, оснащенных новейшим оборудованием, называемым ПЗС-камерой с матрицей, состоящей из нескольких десятков тысяч светочувствительных элементов, являющейся панорамным приемником изображений.

Главная работа направлена на изучение процессов, происходящих в атмосфере Солнца и гигантских планет, комет и межзвездных сред и туманностей, спектрофотометрии активных галактик.

Современные знания настолько полны и точны, что человеческий разум не может ничего ограничить, поэтому путь поиска все еще неясен и



Рис. 76.1



Рис. 76.2

безусловно приведет к нераскрытым краям. Сознание молодых людей готово покорять вершины, но для этого нужны основные, фундаментальные знания. На пути открытия, создания изобретений необходимо освоить имеющиеся у нас знания, а для этого нужны высокое стремление, трудолюбие и квалифицированный учитель. Сегодня у молодежи есть все условия для того, чтобы достичь больших успехов на пути к науке. Нужно только набраться смелости и двигаться вперед. На этом пути сегодняшние ученые с удовольствием соглашаются стать наставниками для молодежи. Для молодых людей, желающих раскрыть удивительные краски мира, возможности безграничны.



1. Возможно ли появление жизни во всех случаях при благоприятной обстановке на планете?
2. Что такое сознание?
3. Может ли быть форма жизни без белка?
4. Возможно ли путешествие к далеким звездам на современных космических кораблях? Обсудите варианты таких путешествий.
5. Как вы думаете, если существует жизнь вне Земли, с кем из обладателей сознания, развитого выше или ниже нашего, следует связаться?
6. Как может развиваться цивилизация на Земле в ближайшие 100 лет?
7. Кто был первым на Луне?
8. Кто первый вышел в космическое пространство?
9. Кто первая женщина-космонавт?
10. В каком спутнике Юпитера обнаружена вода?
11. Подготовьте презентацию о казахстанских космонавтах.

Лабораторная работа № 6.

Наблюдение сплошного и линейчатого спектров излучения

Цель работы: с помощью спектроскопа экспериментально наблюдать сплошные спектры и линейчатые спектры водорода, гелия и неона.

Оборудование: 1) лампа накаливания; 2) ртутная лампа; 3) газоразрядные трубки с водородом, гелием, неоном; 4) спектроскоп;

5) цветные карандаши.

Теория работы. Спектром излучения называется набор длин волн или частот излучения, которое испускается данным телом.

Виды спектров. Спектры бывают *сплошные*, *линейчатые* и *полосатые*.

Сплошные спектры дают все вещества, находящиеся в твердом или жидком состоянии. Сплошной спектр содержит волны всех частот видимого света и поэтому выглядит как цветная полоса с плавным переходом от одного цвета к другому в таком порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. Изолированные атомы всех веществ излучают свои собственные только им наборы волн вполне определенных частот. Как у каждого человека свои личные отпечатки пальцев, так и у атома данного вещества свой, характерный только для него спектр. Линейчатые спектры излучения выглядят как цветные линии, разделенные промежутками.

Полосатые спектры создаются молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом. Выглядят полосатые спектры подобно линейчатым, только вместо отдельных линий наблюдаются отдельные серии линий, воспринимаемые как отдельные полосы, разделенные темными промежутками.

Ход работы

Наблюдение закономерностей спектров испускания

Задание 1

Наблюдение сплошного спектра испускания.

1. Окуляр спектроскопа (рис. 1) надо приблизить к глазу. Рассмотрите спектр дневного света и зарисуйте его.

2. Установите на оптической скамье против щели спектрометра лампу накаливания, включите ее.

3. Направьте щель спектроскопа на лампу и получите яркий, четкий спектр. Рассмотрите и зарисуйте его.

Задание 2

Наблюдение линейчатых спектров испускания.

1. Установите на оптической скамье против щели спектрометра ртутную лампу, включите ее и рассмотрите весь спектр.



Рис. 1

2. Установите вместо ртутной лампы поочередно имеющиеся газоразрядные трубки (водородный, гелиевый и неоновый) и рассмотрите линейчатый спектр каждого из них. Зарисуйте спектр водорода.

Сделайте выводы.

Лабораторная работа №7.

Изучение треков заряженных частиц

Оборудование: 1) фотография с треками заряженных частиц (рис. 2); 2) фотография треков, образованных в камере Вильсона потоками α -частиц (рис. 4); 3) линейка, прозрачная бумага (калька), циркуль.

Задание 1

Цель работы. Проанализировать фотографии треков заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, идентифицировать заряженную частицу по результатам сравнения ее трека с треком протона.

Теория работы. На фотографии (рис. 2), сделанной в камере Вильсона и помещенной в магнитное поле, изображены траектории двух заряженных частиц.

Трек I — принадлежит протону, трек II — частице, которую надо идентифицировать.

Линии индукции магнитного поля перпендикулярны плоскости фотографии. Начальные скорости частиц одинаковы и перпендикулярны краю фотографии. Идентификация неизвестной частицы с зарядом q и массой m осуществляется путем сравнения ее удельного заряда $\frac{q}{m}$ с удельным зарядом протона $\frac{e}{m}$. Это можно сделать, измерив и сравнив радиусы треков частицы на начальном участке треков. Под действием силы Лоренца, заряженная частица движется по окружности под радиусом R_2 . Согласно второму закону Ньютона $qBv = \frac{mv^2}{R}$, откуда:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR_2}. \quad (1)$$

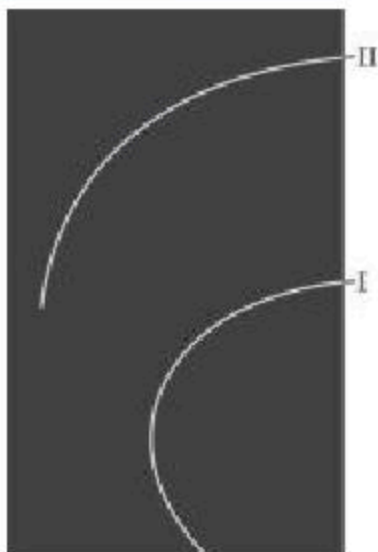


Рис. 2

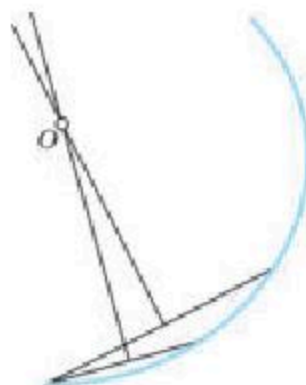


Рис. 3

Для протона аналогично:

$$\frac{e}{m_p} = \frac{v}{BR_1} \quad (2)$$

Отношение удельных зарядов обратно пропорционально отношению радиусов их траекторий:

$$\frac{q/m}{e/m_p} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

Радиус кривизны трека частиц определяется следующим образом. Накладывают на фотографию (рис. 4) лист прозрачной бумаги и переводят на нее трек. Вычерчивают две хорды и восстанавливают к этим хордам в их серединах перпендикуляры (рис. 3). На пересечении перпендикуляров лежит центр окружности; ее радиус измеряют линейкой.

Ход работы:

1. Перенесите на кальку треки частиц с фотографии.
2. Измерьте радиус R_2 трека неизвестной частицы на фотографии.
3. Измерьте радиус R_1 трека протона на фотографии.
4. Сравните удельные заряды неизвестной частицы и протона:

$$\frac{q/m}{e/m_p} = \frac{R_1}{R_2} \cdot$$

5. Определите знак электрического заряда неизвестной частицы.
6. Идентифицируйте заряженную частицу, имеющую трек II.
7. Определите направление вектора магнитной индукции B .
8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

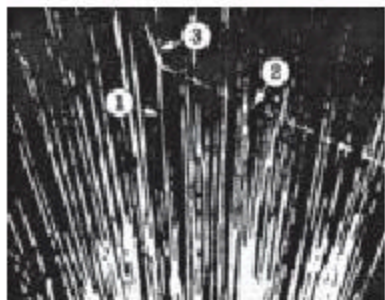
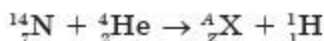


Рис. 4

Задание 2

Цель работы. Изучить по фотографии ядерную реакцию взаимодействия α -частицы с атомом азота и определить продукт реакции.

Теория работы. На фотографии, сделанной в камере Вильсона (рис. 4) запечатлен процесс взаимодействия α -частицы с ядром атома азота, впервые осуществленный Резерфордом:



В результате ядерной реакции образуются две частицы, одна из которых — протон ${}_{1}^{1}\text{H}$, другая — ядро атома неизвестного элемента ${}_{Z}^{A}\text{X}$. Массовое число A и зарядовое число Z этой частицы можно найти из законов сохранения электрического заряда и массового числа. На фотографии взаимодействия α -частице принадлежит трек 1, протону — тонкий длинный трек 2, ядру неизвестного элемента — толстый короткий трек 3.

Ход работы:

1. Руководствуясь теоретическим материалом, идентифицируйте на фотографии заряженные частицы.
2. На основе законов сохранения электрического заряда и массового числа определите значения индексов A и Z .
3. Укажите, ядро какого элемента образовалось при реакции. Запишите окончательное уравнение ядерной реакции.
4. Длина и толщина треков образовавшихся частиц не одинаковы. Объясните, почему.
5. По результатам анализа фотографии ответьте на вопрос: как часто происходит взаимодействие α -частиц с ядрами атомов азота?

Задания для проектной деятельности

Учебный проект — вид самостоятельной творческой деятельности, направленный на решение конкретной учебно-познавательной проблемы. Работу над ним можно условно разбить на следующие этапы.

Подготовительный этап

- Постановка учебно-познавательной проблемы.
- Определение темы проекта, ее обсуждение в классе.
- Формулировка цели и задач проекта.
- Определение типа проекта (индивидуальный, парный, групповой).
- Составление планов и графиков работы.
- Поиск и отбор информации.
- Систематизация и анализ собранного материала.

Основной этап

- Разработка проекта.
- Обсуждение полученных результатов.
- Оформление проекта.
- Подготовка его к презентации на различных школьных мероприятиях.

- Презентация проекта.

Заключительный этап

- Обсуждение и оценка выступлений.
- Подведение итогов.
- Составление отчетов о проделанной работе.
- Определение перспектив дальнейшего изучения темы.
- Проект может быть оформлен в виде доклада, реферата, компьютерной презентации. Примерный объем работы составляет 10—15 страниц (5—10 слайдов).

Учебные проекты по физике можно распределить по трем группам: “История развития физики”, “Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы”, “Практические приложения физических знаний”.

Ниже приведены примерные темы учебных проектов к курсу физики 11 класса.

История развития физики

- История открытия законов постоянного тока.
- История обнаружения электромагнитных волн.
- Из истории измерения скорости света.
- Из истории зарождения и развития радиосвязи.
- Фундаментальные опыты в волновой оптике.
- Из истории открытия и исследования внешнего фотоэффекта.

- Фундаментальные опыты Резерфорда по исследованию внутренней структуры атомов.
- История открытия теории относительности.
- Элементарные частицы.

Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы

- Конструирование и испытание электрических цепей постоянного тока с помощью компьютера.
- Исследование движения заряженной частицы в магнитном поле с помощью компьютера.
- Изучение опытов Фарадея по электромагнитной индукции с помощью компьютера.
- Наблюдение и исследование свойств электромагнитных свойств.
- Построение изображений в тонких линзах с помощью компьютера.
- Наблюдение и изучение интерференции световых волн, дифракции лазерного излучения на компакт-диске.
- Исследование закономерностей внешнего фотоэффекта с помощью компьютера.
- Исследование линейчатых спектров излучения с помощью компьютера.
- Исследование ядерных превращений с помощью компьютера.
- Наблюдение за фазами Луны.

Практические приложения физических знаний

- Виды самостоятельного разряда и их применение в технике.
- Различные виды электромагнитных излучений и их применение в науке и технике.
- Оптические явления в природе.
- Области применения лазерных технологий.
- Экологические проблемы работы атомных электростанций.
- Методы регистрации ионизирующих излучений.
- Семипалатинский полигон и движения Семей-Невада.
- Большой адронный коллайдер.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютно черное тело — идеализированное тело, поглощающее падающее на его поверхность электромагнитное излучение во всех диапазонах.

Активность радиоактивного вещества — величина, определяемая числом ядер распавшихся за единицу времени.

Астрономия — наука, изучающая физическое строение, возникновение, движение и развитие небесных тел, их систем и всего Мира.

Голография — способ получения объемных изображений предметов на фотопластинке (голограмме) при помощи когерентного излучения лазера, основанный на явлении интерференции световых волн.

Дефект масс — разность масс между нуклонами, связанными в ядре, и теми же нуклонами в свободном состоянии.

Закон Кирхгофа — отношение лучеиспускательной способности тела к его поглощательной не зависит от материала тела и является универсальной функцией частоты и температуры для всех тел.

Закон смещения Вина — частота, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Закон Стефана-Больцмана — энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Закон Хаббла — чем дальше галактика, тем она быстрее удаляется, и тем больше ее спектр смещается в красную область: $V = HR$, где V — скорость удаления галактики, R — расстояние до нее, H — постоянная Хаббла ($67,80 \pm 0,77$).

Изобары — ядра с одинаковыми массовыми числами A , но с различными зарядами Z (протонами).

Изотопы — разновидности атомов данного химического элемента, обладающие одинаковым зарядом, но различающиеся массой.

Испускательная способность тела — мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины.

Космология — раздел астрономии, который изучает Вселенную в целом, ее возникновение и развитие, геометрическую структуру, как возникло в ней вещество, природу темной энергии и темной материи и их место в развитии Вселенной.

Коэффициент размножения нейтронов — отношение числа нейтронов в любом поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении.

Критическая масса — минимальная масса делимого вещества (урана), обеспечивающая постоянное равномерное протекание цепной ядерной реакции.

Лазеры (от первых букв англ. фразы *Light amplification by stimulated emission of radiation*) — квантовые генераторы света, принцип действия которых основан на явлении вынужденного (стимулированного) излучения.

Наноматериал — это макроскопическое вещество, состоящее из наночастиц или изготовленное на основе нанотехнологий. появилось много новых отраслей промышленности.

Нанороботы — машины наноразмера со способностями двигаться, делать операции, программировать, обмениваться информацией и обрабатывать ее.

Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов разработки материалов (веществ) на атомном, молекулярном и супрамолекулярном (на уровне нескольких молекул) уровнях с целью получения особых или новых свойств.

Нуклоны — частицы внутри ядра — протоны и нейтроны.

Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) — современная теория гравитации.

Опыт Резерфорда — опыт по рассеянию альфа-частиц тонкой золотой фольгой (1911), позволивший подтвердить ядерную модель атома.

Период полураспада — промежуток времени, необходимый для распада половины радиоактивных ядер.

Постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с) — одна из фундаментальных физических констант, введенная М.Планком в 1900 году для объяснения законов теплового излучения.

Постоянная распада — вероятность распада ядра в единицу времени.

Преломление света — явление изменения направления распространения световых лучей на границе двух сред, когда лучи проходят из одной среды в другую.

Сканирующий туннельный микроскоп — устройство, позволяющее не только изображать атомы, но и производить с ними действия для получения наноструктур.

Радиоактивность — способность атомного ядра самопроизвольно распадаться с испусканием частиц.

Радиоактивный распад — спонтанное изменение состава (заряда Z , массового числа A) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов или ядерных фрагментов.

Рентгеновское излучение — электромагнитное излучение очень высокой частоты (или очень короткой длины волны, $\lambda = 10^{-8} - 10^{-12}$ м. Открыто немецким физиком В.Рентгеном.

Темная материя — неизвестная материя, сосредоточенная в окрестностях галактик, которая не попадает в электромагнитное и сильное взаимодействие.

Темная энергия — поле, равномерно заполняющее пространство Вселенной. Именно она способствует поступательному увеличению мира, но ее природа пока неизвестна.

Тепловое излучение — электромагнитное излучение нагретых тел.

Термоядерные реакции — образование более тяжелого ядра при слиянии легких ядер при очень высоких температурах.

Удельная энергия связи — отношение энергии связи ядра к массовому числу A , т. е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

Фотон — частица, введенная для того, чтобы объяснить корпускулярные свойства электромагнитного излучения. Фотоны — кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие осуществляется путем обмена фотонами.

Фотоэлектроны — это электроны, вырванные светом из металла при внешнем фотоэффекте.

Фотоэффект — явление взаимодействия света или любого другого электромагнитного излучения с веществом, при котором энергия фотонов передается электронам вещества.

Энергия связи ядра — минимальная энергия, необходимая для разложения атомного ядра на составляющие его нуклоны.

Ядерные реакции — превращения, возникающие при взаимодействии атомного ядра с другими ядрами, элементарными частицами и γ -квантами.

Ядерные силы — силы, которые не дают разлететься нуклонам и обеспечивают их особо сильную связь.

Ядерный реактор — устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция.

α -распад — самопроизвольный распад сопровождается испусканием α -частиц.

β -распад — ядерная реакция, сопровождающаяся испусканием атомным ядром электрона и антинейтрино, позитрона и нейтрино, поглощение ядром атомного электрона с испусканием нейтрино, при котором заряд ядра меняется на единицу заряда электрона.

γ -распад — испускание атомным ядром γ -квантов.

Термины, используемые в курсе Физика 11 класса

На русском языке	На казахском языке	На английском языке
Абсолютно черное тело	Абсолют қара дене	Black body
Активность радиоактивного вещества	Радиоактивті заттың активтігі	Activity of a radioactive substance
Астрономия	Астрономия	Astronomy
Голография	Голография	Holography
Дефект масс	Масса ақауы	Mass defect
Закон Кирхгофа	Кирхгоф заңы	Kirchhoff's law
Закон смещения Вина	Виннің ығысу заңы	Wien's displacement law
Закон Стефана—Больцмана	Стефан-Больцман заңы	Stefan-Boltzmann law
Закон Хаббла	Хаббл заңы	Hubble's law
Изобары	Изобарлар	Isobar
Изотопы	Изотоптар	Isotop
Испускательная способность тела	Дененің жарық шығару қабілеті	Emissivity of the body
Космология	Космология	Cosmology
Коэффициент размножения нейтронов	Нейтрондардың көбею коэффициенті	Neutron multiplication coefficient
Критическая масса	Сындық масса	Critical mass
Лазеры	Лазерлер	Laser
Наноматериал	Наноматериал	Nanomaterial
Нанороботы	Нанороботтар	Nanorobots
Нанотехнология	Нанотехнология	Nanotechnology
Нуклоны	Нуклондар	Nucleons
Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО)	Эйнштейннің жалпы салыстырмалылық теориясы	Einstein's General Relativity (GR)
Опыт Резерфорда	Резерфорд тәжірибесі	Rutherford's experiment
Период полураспада	Жартылай ыдырау периоды	Half-life
Постоянная Планка	Планк тұрақтысы	Planck constant
Постоянная распада	Ыдырау тұрақтысы	Decay constant
Радиоактивность	Радиоактивтілік	Radioactivity
Радиоактивный распад	Радиоактивті ыдырау	Radioactive decay
Рентгеновское излучение	Рентген сәулесі	Light ray
Сканирующий туннельный микроскоп	Сканерлеуші туннельдік микроскоп	
Темная материя	Қараңғы материя	Dark matter
Темная энергия	Қараңғы энергия	Dark energy
Тепловое излучение	Жылудық сәуле шығару	Thermal radiation

Продолжение

Термоядерные реакции	Термоядролық реакциялар	Thermonuclear reactions
Удельная энергия связи	Меншікті байланыс энергиясы	Binding energy per nucleon
Фотон	Фотон	Photon
Фотоэлектроны	Фотоэлектрондар	Photoelectrons
Фотоэффект	Фотоэффект	Photoelectric effect
Цепная ядерная реакция	Тізбекті ядролық реакция	Nuclear chain reaction
Энергия связи ядра	Ядроның байланыс энергиясы	Binding energy of a nucleus
Явление преломления света	Жарықтың сынуы	Refraction of light
Ядерные реакции	Ядролық реакциялар	Nuclear reactions
Ядерные силы	Ядролық күштер	Nuclear forces
Ядерный реактор	Ядролық реактор	Nuclear reactor
α -распад	α -ыдырау	α -decay
β -распад	β -ыдырау	β -decay
γ -распад	γ -ыдырау	γ -decay

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

период	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	H водород							He гелий		
2	Li литий	Be бериллий		B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон	
3	Na натрий	Mg магний		Si кремний	P фосфор	S сера	Cl хлор	Ar аргон		
4	K калий	Ca кальций	Sc скандий	Ti титан	V ванадий	Cr хром	Mn марганец	Fe железо	Co кобальт	Ni никель
5	Rb рубидий	Sr стронций	Y иттрий	Zr цирконий	Nb ниобий	Mo молибден	Tc технеций	Ru рутений	Rh родий	Pd палладий
6	Cs цезий	Ba барий	La лантан	Hf hafний	Ta тантал	W вольфрам	Re рений	Os осмий	Ir иридий	Pt платина
7	Fr франций	Ra радий	Ac актиний	Rf рифмий	Bi висмут	Po полоний	At астат	Hs хасий	Mt митаганий	Ds дубний
	Rg рогений	Cn кнутсий	Nh нигемий	Fl флеретий	Mc мачетий	Lv лувергий	Ts теннессиум	Og оганесон		
	R ₂ O		RO	R ₂ O ₃	RO ₂	RO ₃	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄
	RH ₂		RH ₃	RH ₄						
	<p>5^я ПЕРИОДИКА</p> <p>6^я ПЕРИОДИКА</p> <p>7^я ПЕРИОДИКА</p> <p>8^я ПЕРИОДИКА</p> <p>9^я ПЕРИОДИКА</p> <p>10^я ПЕРИОДИКА</p> <p>11^я ПЕРИОДИКА</p> <p>12^я ПЕРИОДИКА</p> <p>13^я ПЕРИОДИКА</p> <p>14^я ПЕРИОДИКА</p> <p>15^я ПЕРИОДИКА</p> <p>16^я ПЕРИОДИКА</p> <p>17^я ПЕРИОДИКА</p> <p>18^я ПЕРИОДИКА</p>									



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касьянов В. А.* Физика: 11 класс. М.: Дрофа, 2018.
2. *Кокс Ф. Г., Парсондейдж М.* Энциклопедия окружающего мира. Атомы и молекулы. М.: Росмэн, 1997.
3. *Мухаметов М., Есжанов А.* и др. Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных школ. Алматы, 2008.
4. *Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б.* Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2002.
5. *Мякишев Г. Я., Синяков А. З.* Физика: Колебания и волны. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2001.
6. *Мякишев Г. Я., Синяков А. З.* Физика: Оптика и квантовая физика. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2002.
7. *Павленко Ю.Г.* Начало физики. Учебник. М.: Экзамен, 2005 г.
8. *Тарасов Л. В.* Физика в природе: Книга для учащихся. М.: Просвещение, 1988.
9. *Турчина Н.В.* Физика в задачах для поступающих в вузы. 2500 задач. М.: Оникс. Мир и образование, 2009 г.
10. Универсальный справочник школьника / Сост. Г. П. Шалаева. М.: Филологическое общество "Слово". Олма-Пресс образование, 2005.
11. Факты. Люди. Даты. События. Малый энциклопедический справочник. М.: Астрель, 2002.
12. Физика. Учебник для 11 классов с углубленным изучением физики. Профильный уровень. / Подред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2007.
13. *Туякбаев С. Т., Насохова Ш. Б.,* и др. Физика: Учебник для 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Алматы, 2015.
14. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики под редакцией Ю.И. Дика, О.Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2002 г.
15. *Шутов В.И., Сухов В.Г., Подлесный Д.В.* Эксперимент в физике. Физический практикум.
16. Энциклопедический словарь юного физика / Сост. В. А. Чуянов. М.: Педагогика, 1991.
17. Элементарный учебник физики. Том I, II, III. Под редакцией академика Г.С. Ландсберга. М.: АОЗТ "Шрайк", 1995 г.
18. <https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics>

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел IV. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 8. Элементы теории относительности

§42. Постулаты теории относительности	5
§43. Энергия, импульс и масса в релятивистской динамике. Закон взаимосвязи массы и энергии для материальных тел.....	14

Раздел V. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 9. Атомная и квантовая физика

§44. Виды излучений.....	23
§45. Спектры. Спектральный анализ, спектральные аппараты	27
§46. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Рентгеновские лучи. Шкала электромагнитных излучений	32
§47. Тепловое излучение	37
§48. Фотоэффект	45
§49. Применение фотоэффекта. Фотон	50
§50. Давление света	55
§51. Химическое действие света.....	58
§52. Рентгеновское излучение.....	62
§53. Единство корпускулярно-волновой природы света	67
§54. Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Постулаты Бора. Опыты Франка и Герца	70
§55. Лазеры. Понятия о нелинейной оптике.....	77
§56. Трудности теории Бора. Волновые свойства частиц. Волны де Бройля	85

Глава 10. Физика атомного ядра

§57. Естественная радиоактивность	90
§58. Закон радиоактивного распада.....	98
§59. Атомное ядро.....	104
§60. Нуклонная модель ядра	108
§61. Энергия связи нуклонов в ядре	112
§62. Методы регистрации ионизирующих излучений	117
§63. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность.....	121
§64. Деление тяжелых ядер.....	126
§65. Цепные ядерные реакции.....	129
§66. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации	132
§67. Ядерный реактор. Ядерная энергетика	134
§68. Термоядерные реакции	139

Раздел VI. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Глава 11. Нанотехнология и наноматериалы

§69. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы разработки наноматериалов	145
--	-----

Раздел VII. КОСМОЛОГИЯ

Глава 12. Космология

§ 70. Астрономия, астрофизика и космология	151
§ 71. Звездное небо. Мир звезд. Расстояние до звезд. Переменные звезды.	154
§ 72. Солнечно-земные связи	165
§ 73. Планетарные системы звезд. Планеты земной группы и планеты гиганты. Малые тела Солнечной системы	169
§ 74. Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары	176
§ 75. Теория Большого взрыва. Красное смещение. Определение расстояния до галактик	180
§ 76. Мысли о жизни и Вселенной. Космическое будущее человечества и освоение космоса	186
Лабораторная работа № 6. Наблюдение сплошного и линейчатого спектров излучения	191
Лабораторная работа №7. Изучение треков заряженных частиц Задания для проектной деятельности	195
Глоссарий	197
Термины, используемые в курсе Физика 11 класса	199
Список литературы	200