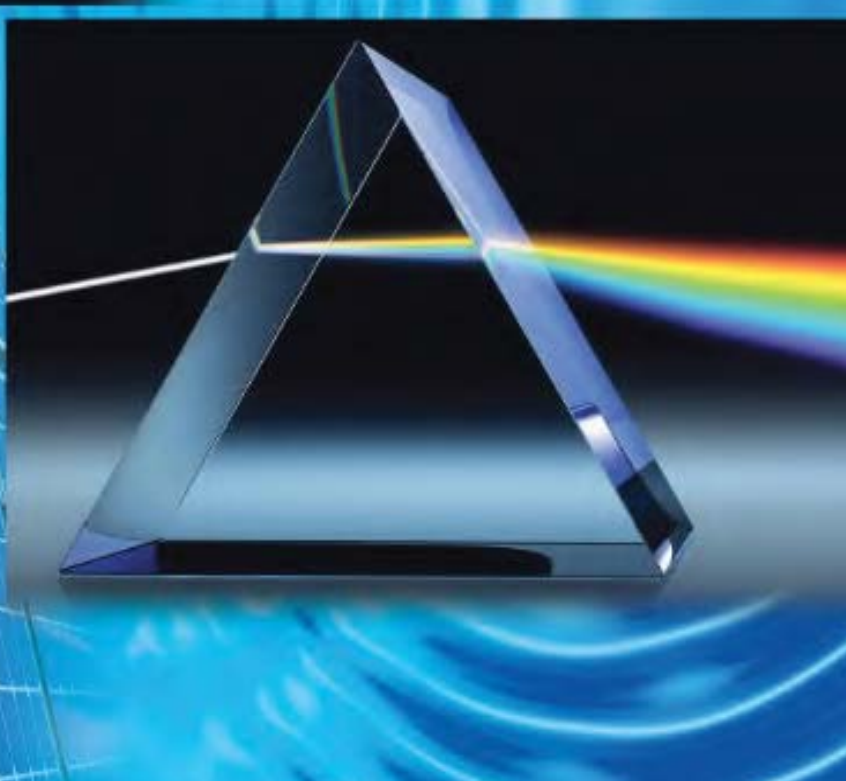
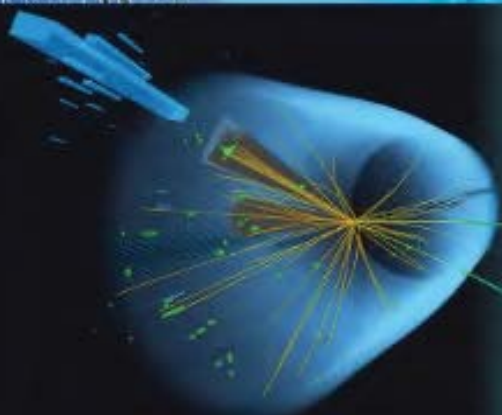


В. В. Жилко  
Л. Г. Маркович  
А. А. Сокольский



# ФИЗИКА

11



## ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

| ПРИСТАВКА | ОБОЗНАЧЕНИЕ | МНОЖИТЕЛЬ | ПРИСТАВКА | ОБОЗНАЧЕНИЕ | МНОЖИТЕЛЬ  |
|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|------------|
| ЗЕТА      | З           | $10^{21}$ | ДЕЦИ      | д           | $10^{-1}$  |
| ЭКСА      | Э           | $10^{18}$ | САНТИ     | с           | $10^{-2}$  |
| ПЕТА      | П           | $10^{15}$ | МИЛЛИ     | м           | $10^{-3}$  |
| ТЕРА      | Т           | $10^{12}$ | МИКРО     | мк          | $10^{-6}$  |
| ГИГА      | Г           | $10^9$    | НАНО      | н           | $10^{-9}$  |
| МЕГА      | М           | $10^6$    | ПИКО      | п           | $10^{-12}$ |
| КИЛО      | к           | $10^3$    | ФЕМТО     | ф           | $10^{-15}$ |
| ГЕКТО     | г           | $10^2$    | АТТО      | а           | $10^{-18}$ |
| ДЕКА      | да          | $10^1$    | ЗЕРТО     | з           | $10^{-21}$ |

## ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

| НАЧЕРТАНИЕ | НАЗВАНИЕ | НАЧЕРТАНИЕ | НАЗВАНИЕ |
|------------|----------|------------|----------|
| Α α        | АЛЬФА    | Ν ν        | НЮ       |
| Β β        | БЕТА     | Ξ ξ        | КСИ      |
| Γ γ        | ГАММА    | Ο ο        | ОМИКРОН  |
| Δ δ        | ДЕЛЬТА   | Π π        | ПИ       |
| Ε ε        | ЭПСИЛОН  | Ρ ρ        | РО       |
| Ζ ζ        | ДЗЕТА    | Σ σ        | СИГМА    |
| Η η        | ЭТА      | Τ τ        | ТАУ      |
| Θ θ        | ТЕТА     | Υ υ        | ИПСИЛОН  |
| Ι ι        | ЙОТА     | Φ φ        | ФИ       |
| Κ κ        | КАППА    | Χ χ        | ХИ       |
| Λ λ        | ЛАМБДА   | Ψ ψ        | ПСИ      |
| Μ μ        | МЮ       | Ω ω        | ОМЕГА    |

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

| ВЕЛИЧИНА                     | ОБОЗНАЧЕНИЕ  | ПРИБЛИЖЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ   |
|------------------------------|--------------|---|
| УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ | $g$          | $9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$                                  |
| СКОРОСТЬ СВЕТА В ВАКУУМЕ     | $c$          | $3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$                         |
| ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ    | $G$          | $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{М}^2}{\text{кг}^2}$ |
| ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЗАРЯД           | $e$          | $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                                    |
| ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ     | $\epsilon_0$ | $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{М}^2}$ |
| МАГНИТНАЯ ПОСТОЯННАЯ         | $\mu_0$      | $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}}$                     |
| МАССА ЭЛЕКТРОНА              | $m_e$        | $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                                    |
| МАССА ПРОТОНА                | $m_p$        | $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                                   |
| МАССА НЕЙТРОНА               | $m_n$        | $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                                   |

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА


| ПЕРИОДЫ | ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ                  |                                   |                                   |                                       |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      |                                       |                                    |                                  |                                   |                                |                                 |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|         | 1                                 | 2                                 | 3                                 | 4                                     | 5                                      | 6                                   | 7                                   | 8                                   | 9                                   | 10                                    | 11                                  | 12                                    | 13                                      | 14                                  | 15                                     | 16                                   | 17                                    | 18                                 |                                  |                                   |                                |                                 |
| 1       | 1 <b>H</b><br>водород<br>1,00794  |                                   |                                   |                                       |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      |                                       | 2 <b>He</b><br>гелий<br>4,0026     |                                  |                                   |                                |                                 |
| 2       | 3 <b>Li</b><br>литий<br>6,941     | 4 <b>Be</b><br>бериллий<br>9,0122 |                                   |                                       |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      | 5 <b>B</b><br>бор<br>10,811           | 6 <b>C</b><br>углерод<br>12,011    | 7 <b>N</b><br>азот<br>14,007     | 8 <b>O</b><br>кислород<br>15,9994 | 9 <b>F</b><br>фтор<br>18,9984  | 10 <b>Ne</b><br>неон<br>20,1797 |
| 3       | 11 <b>Na</b><br>натрий<br>22,9898 | 12 <b>Mg</b><br>магний<br>24,305  |                                   |                                       |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      | 13 <b>Al</b><br>алюминий<br>26,9815   | 14 <b>Si</b><br>кремний<br>28,086  | 15 <b>P</b><br>фосфор<br>30,9738 | 16 <b>S</b><br>сера<br>32,066     | 17 <b>Cl</b><br>хлор<br>35,452 | 18 <b>Ar</b><br>аргон<br>39,948 |
| 4       | 19 <b>K</b><br>калий<br>39,0983   | 20 <b>Ca</b><br>кальций<br>40,078 | 21 <b>Sc</b><br>скандий<br>44,956 | 22 <b>Ti</b><br>титан<br>47,87        | 23 <b>V</b><br>ванадий<br>50,942       | 24 <b>Cr</b><br>хром<br>51,996      | 25 <b>Mn</b><br>марганец<br>54,938  | 26 <b>Fe</b><br>железо<br>55,845    | 27 <b>Co</b><br>кобальт<br>58,933   | 28 <b>Ni</b><br>никель<br>58,693      | 29 <b>Cu</b><br>медь<br>63,546      | 30 <b>Zn</b><br>цинк<br>65,39         | 31 <b>Ga</b><br>галлий<br>69,723        | 32 <b>Ge</b><br>германий<br>72,61   | 33 <b>As</b><br>мышьяк<br>74,922       | 34 <b>Se</b><br>селен<br>78,96       | 35 <b>Br</b><br>бром<br>79,904        | 36 <b>Kr</b><br>криптон<br>83,80   |                                  |                                   |                                |                                 |
| 5       | 37 <b>Rb</b><br>рубидий<br>85,468 | 38 <b>Sr</b><br>стронций<br>87,62 | 39 <b>Y</b><br>иттрий<br>88,906   | 40 <b>Zr</b><br>цирконий<br>91,224    | 41 <b>Nb</b><br>ниобий<br>92,906       | 42 <b>Mo</b><br>молибден<br>95,94   | 43 <b>Tc</b><br>технеций<br>[98]    | 44 <b>Ru</b><br>рутений<br>101,07   | 45 <b>Rh</b><br>родий<br>102,905    | 46 <b>Pd</b><br>палладий<br>106,42    | 47 <b>Ag</b><br>серебро<br>107,868  | 48 <b>Cd</b><br>кадмий<br>112,411     | 49 <b>In</b><br>индий<br>114,82         | 50 <b>Sn</b><br>олово<br>118,71     | 51 <b>Sb</b><br>сурьма<br>121,76       | 52 <b>Te</b><br>теллур<br>127,60     | 53 <b>I</b><br>йод<br>126,904         | 54 <b>Xe</b><br>ксенон<br>131,29   |                                  |                                   |                                |                                 |
| 6       | 55 <b>Cs</b><br>цезий<br>132,905  | 56 <b>Ba</b><br>барий<br>137,327  | 57 <b>La</b><br>лантан<br>138,906 | 72 <b>Hf</b><br>гафний<br>178,49      | 73 <b>Ta</b><br>тантал<br>180,948      | 74 <b>W</b><br>вольфрам<br>183,84   | 75 <b>Re</b><br>рений<br>186,207    | 76 <b>Os</b><br>осмий<br>190,23     | 77 <b>Ir</b><br>иридий<br>192,22    | 78 <b>Pt</b><br>платина<br>195,08     | 79 <b>Au</b><br>золото<br>196,967   | 80 <b>Hg</b><br>ртуть<br>200,59       | 81 <b>Tl</b><br>таллий<br>204,383       | 82 <b>Pb</b><br>свинец<br>207,2     | 83 <b>Bi</b><br>висмут<br>208,980      | 84 <b>Po</b><br>полоний<br>[209]     | 85 <b>At</b><br>астат<br>[210]        | 86 <b>Rn</b><br>радон<br>[222]     |                                  |                                   |                                |                                 |
| 7       | 87 <b>Fr</b><br>франций<br>[223]  | 88 <b>Ra</b><br>радий<br>[226]    | 89 <b>Ac</b><br>актиний<br>[227]  | 104 <b>Rf</b><br>резерфордий<br>[261] | 105 <b>Db</b><br>дубний<br>[262]       | 106 <b>Sg</b><br>сигборгий<br>[266] | 107 <b>Bh</b><br>борий<br>[264]     | 108 <b>Hs</b><br>хассий<br>[269]    | 109 <b>Mt</b><br>мейтнерий<br>[268] | 110 <b>Ds</b><br>дармштадтий<br>[271] | 111 <b>Rg</b><br>рентгений<br>[272] | 112 <b>Cn</b><br>коперниций<br>[277]  | 113 <b>Nh</b><br>нихоний<br>[284]       | 114 <b>Fl</b><br>флеровий<br>[285]  | 115 <b>Mc</b><br>московский<br>[288]   | 116 <b>Lv</b><br>ливенормий<br>[289] | 117 <b>Ts</b><br>теннессиум<br>[292]  | 118 <b>Og</b><br>оганесон<br>[294] |                                  |                                   |                                |                                 |
|         |                                   |                                   |                                   | <b>ЛАНТАНИДЫ</b>                      |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      |                                       |                                    |                                  |                                   |                                |                                 |
|         |                                   |                                   |                                   | 58 <b>Ce</b><br>церий<br>140,115      | 59 <b>Pr</b><br>празеодим<br>140,907   | 60 <b>Nd</b><br>неодим<br>144,24    | 61 <b>Pm</b><br>прометий<br>144,913 | 62 <b>Sm</b><br>самарий<br>150,36   | 63 <b>Eu</b><br>европий<br>151,965  | 64 <b>Gd</b><br>гадолиний<br>157,25   | 65 <b>Tb</b><br>тербий<br>158,925   | 66 <b>Dy</b><br>диспрозий<br>162,5    | 67 <b>Ho</b><br>гольмий<br>164,93       | 68 <b>Er</b><br>эрбий<br>167,26     | 69 <b>Tm</b><br>тулий<br>168,934       | 70 <b>Yb</b><br>иттербий<br>173,04   | 71 <b>Lu</b><br>лютеций<br>174,967    |                                    |                                  |                                   |                                |                                 |
|         |                                   |                                   |                                   | <b>АКТИНИДЫ</b>                       |  |                                     |                                     |                                     |                                     |                                       |                                     |                                       |   |                                     |  |                                      |                                       |                                    |                                  |                                   |                                |                                 |
|         |                                   |                                   |                                   | 90 <b>Th</b><br>торий<br>232,038      | 91 <b>Pa</b><br>протактиний<br>231,035 | 92 <b>U</b><br>уран<br>238,028      | 93 <b>Np</b><br>нептуний<br>237,048 | 94 <b>Pu</b><br>плутоний<br>244,064 | 95 <b>Am</b><br>амерций<br>243,061  | 96 <b>Cm</b><br>куриум<br>247,07      | 97 <b>Bk</b><br>берклий<br>247,07   | 98 <b>Cf</b><br>калифорний<br>251,079 | 99 <b>Es</b><br>эйзенштейний<br>252,083 | 100 <b>Fm</b><br>фермиум<br>257,095 | 101 <b>Md</b><br>менделевий<br>258,099 | 102 <b>No</b><br>нобелий<br>259,1    | 103 <b>Lr</b><br>лоуренсий<br>260,105 |                                    |                                  |                                   |                                |                                 |

Атомный номер → 37

Символ элемента → **Rb**

Название элемента → **РУБИДИЙ**

Относительная атомная масса → 85,468



Д. И. Менделеев (1834–1907)

s-элементы

p-элементы

d-элементы

f-элементы

В. В. Жилко Л. Г. Маркович А. А. Сокольский

# ФИЗИКА

Учебное пособие для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения  
(с электронным приложением для повышенного уровня)

*Допущено  
Министерством образования  
Республики Беларусь*

Минск «Народная асвета» 2021

Правообладатель Народная асвета

УДК 53(075.3=161.1)  
ББК 22.3я721  
Ж72

Рецензенты:

кафедра физики и методики преподавания физики учреждения образования  
«Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»  
(кандидат физико-математических наук, доцент *О. Н. Белая*);  
учитель высшей квалификационной категории государственного учреждения  
образования «Ордена Трудового Красного Знамени гимназия № 50 г. Минска»  
*Т. А. Шиманская*

Электронное приложение для повышенного уровня  
размещено на ресурсе [profil.adu.by](http://profil.adu.by)

ISBN 978-985-03-3623-1

© Жилко В. В., Маркович Л. Г.,  
Сокольский А. А., 2021  
© Оформление. УП «Народная  
асвета», 2021

Правообладатель Народная асвета

## ОТ АВТОРОВ

Дорогие старшекласники! Настал последний, выпускной год обучения в школе, который подведет итог многолетней работы. Нет необходимости объяснять, как важно в этом классе напряженно работать, чтобы сделать все возможное для успешного завершения обучения в средней школе.



Как писал Н. П. Третьяков в учебнике «Курс физики»: «В старших классах школы ученикам пора не только наблюдать и констатировать наблюдаемое, но и учиться применять общие положения к решению частных вопросов, пользуясь доступными им средствами математики. Только так можно дать представление об экспериментальном методе исследования и устранить тот разрыв, который существует между школой и ВУЗом.

Вряд ли в учебнике нужны описания многочисленных, часто дублирующих друг друга опытов чисто иллюстративного характера. Подбор и оформление опытов — дело вкуса и возможностей учителя. Что же касается основных, имеющих принципиальное значение, то... без их описания невозможно дать понятие об экспериментальном методе в физике».


В 11-м классе вы будете изучать физику колебаний и волновых процессов, а также оптику. Вам предстоит познакомиться с интересными явлениями и законами квантовой физики, физики микромира (атома, ядра, элементарных частиц), основами специальной теории относительности, которая в свое время перевернула представления об окружающем нас мире.

Ознакомление с современной физической картиной мира позволит вам собрать воедино весь изученный материал и взглянуть по-новому на окружающий мир и его дальнейшую эволюцию в обозримом будущем.

Материал данного пособия представлен восемью главами, разделенными на параграфы.

В учебном пособии под знаком  дана актуализация материала, изучаемого ниже, а также имеется рубрика «Повторение», отмеченная знаком , позволяющая перед началом изучения новой темы кратко повторить ранее изученный вами материал.

В каждом из параграфов для концентрации вашего внимания определения и формулировки законов выделены жирным шрифтом, а формулы


для запоминания помещены в рамки. Контрольные вопросы к параграфу отмечены знаком , ниже следуют примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения. Для усвоения материала вам следует не только выучить теорию, но и самостоятельно выполнить задания, приведенные в упражнениях.

Переход к материалу повышенного уровня отмечен знаком .

В конце каждой главы приведен наиболее важный материал для усвоения теоретических знаний и формирования практических умений, а также даны задания для самостоятельных исследований.

В Приложении к учебному пособию приведены инструкции к лабораторным работам. В конце книги имеются ответы к упражнениям.

В рубрике «Это интересно», размещенной на желтой плашке, подобраны необычные физические факты и явления, связанные с излагаемым материалом, которые могут быть полезны при подготовке докладов на школьную конференцию, написании рефератов и т. д.

Знаком  отмечены ученые, получившие Нобелевскую премию за свои исследования.

Тщательно выполняйте задания и рекомендации учителя, настойчиво занимайтесь самостоятельно. Чудес не бывает — только упорный труд в классе и дома приведет вас к успеху при изучении физики.

Желаем успехов!

*Авторы*





# Глава 1

## Механические колебания и волны

Часы не свершили урока,  
А маятник точно уснул,  
Тогда распахнул я широко  
Футляр их — и лиру качнул!

*И. Анненский. Лира часов*

### § 1. Колебательное движение. Гармонические колебания

- В мире разнообразных механических движений достаточно часто встречаются периодические (повторяющиеся) движения: колебания маятника часов, движение поршня в двигателе автомобиля, биение сердца человека. В чем особенности таких движений? Какими параметрами они описываются? В чем их отличия от поступательного и вращательного движений?



Движение абсолютно твердого тела, при котором прямая, проходящая через любые две его точки, остается параллельной самой себе, называется поступательным движением.

Вращательным называется движение тела, при котором каждая точка тела движется по своей окружности, и центры этих окружностей лежат на одной неподвижной прямой. Эта прямая называется осью вращения. Равномерное вращение характеризуется периодом  $T$  или частотой  $\nu$ . Период обращения  $T$  равен времени, за которое тело совершает один оборот по окружности. Частота  $\nu$  равна числу оборотов в единицу времени.

Тело находится в равновесии, если векторная сумма всех сил, приложенных к нему, и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно любой оси равны нулю. Равновесие называется устойчивым, если при малом отклонении тела от положения равновесия оно возвращается в исходное положение.

Разные виды механического движения характеризуются различной степенью повторяемости. Так при поступательном движении тело может

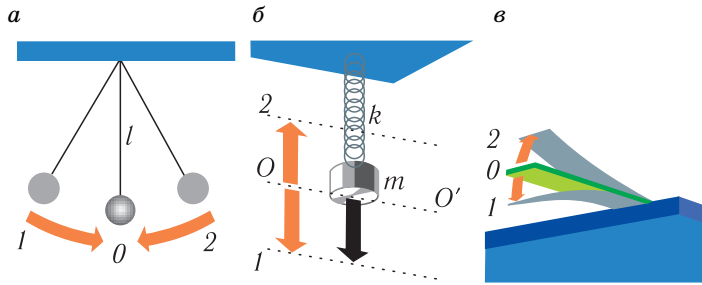


Рис. 1. Колебательные движения: *a* — тело, подвешенное на нити; *б* — груз на пружине; *в* — металлическая пластинка, закрепленная на конце

вообще не вернуться в исходное положение, тогда как при вращательном движении это произойдет через промежуток времени, равный периоду обращения  $T$ .

В окружающем нас мире очень широко распространен и такой вид движения тела, при котором оно сначала движется в прямом направлении, а затем — в обратном. Такое движение повторяется неоднократно по одной и той же траектории. Подобные примеры приведены на рисунке 1. При этом через любую точку траектории, за исключением крайних точек 1 и 2 (см. рис. 1), тело проходит как в прямом, так и в обратном направлениях.

Такой вид движения называется **колебательным**. Колебательное движение совершают такие механические системы, как маятник, качели, листья деревьев под воздействием ветра, струны при игре на гитаре или пианино. Движение атомов в кристаллической решетке также носит колебательный характер.

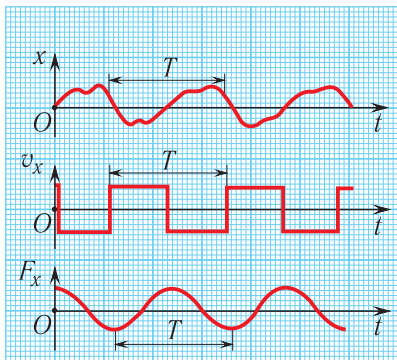


Рис. 2. Периодические движения

Таким образом, для колебательного движения характерно свойство повторяемости (см. рис. 1). Когда физические величины, характеризующие движение (например, координата  $x$ , проекции скорости  $v_x$  и действующей силы  $F_x$ ), принимают одни и те же значения через равные промежутки времени (рис. 2), то такие колебания (движения) называются **периодическими**.

Минимальный промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характе-

ризирующих колебание, называется **периодом колебаний** и обозначается буквой  $T$ :

$$T = \frac{\Delta t}{N}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени, за который произошло  $N$  колебаний.

Колебания по своей природе могут быть не только механическими, но и электромагнитными (периодические изменения напряжения и силы тока в электрической цепи), термодинамическими (колебания температуры с течением времени) и т. д. Таким образом, колебания — это особая форма движения в том смысле, что различные по своей природе физические процессы (механические, электромагнитные и т. д.) описываются одинаковыми математическими зависимостями физических величин от времени.

Для описания колебаний, как и для вращательного движения, наряду с **периодом колебаний**  $T$  используют величину, которая называется **частотой колебаний**. Она обозначается буквой  $\nu$ . Частота  $\nu$  равна отношению числа колебаний  $N$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за которые они произошли:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}. \quad (2)$$

Следовательно, частота колебаний показывает, какое число колебаний тело совершает в единицу времени (за секунду):

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Кроме частоты  $\nu$  часто используют **циклическую частоту**  $\omega$ , которая показывает число колебаний, совершаемых за промежуток времени  $\Delta t$ , равный  $2\pi$  секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Для наглядного описания колебательного движения удобно представить зависимость координаты  $x$  колеблющегося тела от времени  $t$  в виде графика, т. е. построить график функции  $x(t)$ .

Для механической «записи» колебаний можно использовать установку, изображенную на рисунке 3. В этой установке к грузу, подвешенному на двух нитях, прикреплен фломастер (рис. 4). Он может свободно перемещаться в трубочке для того, чтобы постоянно касаться листа бумаги при колебаниях груза. Если отклонить груз поперек листа бумаги

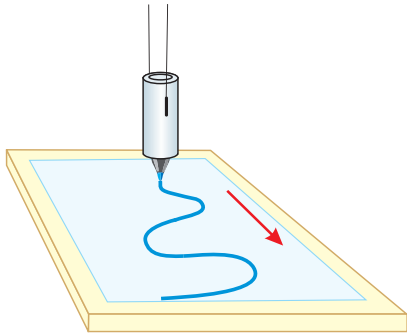


Рис. 3. Запись колебаний (осциллограмма)

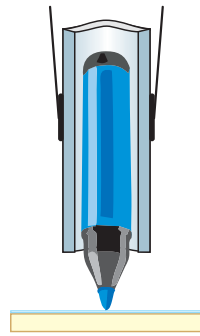


Рис. 4. Крепление фломастера на листе бумаги

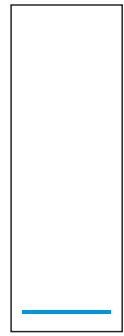


Рис. 5. Траектория движения маятника

и отпустить, то кончик фломастера будет описывать на листе прямую линию, которая является траекторией движения груза (рис. 5).

Если же при этом лист бумаги будет двигаться с постоянной скоростью, то будет происходить сложение двух движений во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате на бумаге появится кривая (см. рис. 3), каждая точка которой соответствует положению колеблющегося фломастера в различные моменты времени. Получилась развертка колебательного движения, т. е. график движения колеблющегося тела.

Такая кривая называется *осциллограммой* (от лат. *oscillum* — колебание и греч. γραμμα (грамма) — запись).

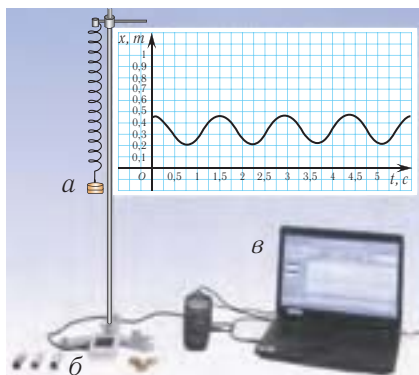


Рис. 6. Установка для записи осциллограммы колебаний маятника: *a* — груз на пружине; *b* — ультразвуковой датчик движения; *v* — ноутбук

Для развертки колебаний можно использовать и современную установку с компьютером, приведенную на рисунке 6. Подвесим на цилиндрической пружине груз. Отведем его вниз, отпустим и будем регистрировать колебания с помощью ультразвукового датчика движения. Он будет определять расстояние до подвешенного груза. При соответствующем программном обеспечении зависимость расстояния от груза до датчика от времени будет изображаться на экране компьютера (см. рис. 6).

Какие выводы можно сделать исходя из представленных осциллограмм?

Во-первых, координата тела изменяется периодически (см. рис. 6). Обычно систему координат выбирают так, что ось времени проходит через точку, значение координаты  $x = 0$  которого соответствует положению устойчивого равновесия (рис. 7). В таком случае координата груза будет изменяться от максимального значения  $x = x_{\max} = A$  до минимального значения  $x = x_{\min} = -A$ . Максимальное отклонение маятника от значения  $x = 0$  (положения равновесия) называется **амплитудой колебаний** и обозначается буквой  $A$ . В данном случае ее величина равна  $A = 0,12$  м.

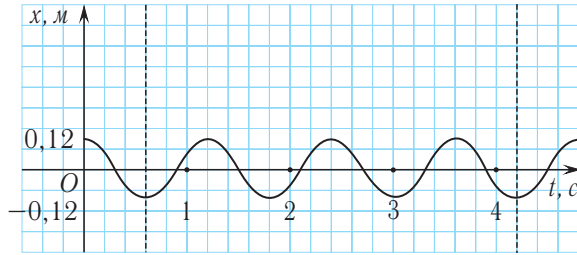


Рис. 7. Осциллограмма колебаний груза на пружине

Следовательно, колебания, кроме периода (частоты), характеризуются *амплитудой колебаний*.

Во-вторых, скорость и ускорение при движении колеблющегося тела *непостоянны во времени*. Они также периодически меняются во времени. Так, скорость маятника максимальна ( $v = v_{\max}$ ) при прохождении положения равновесия ( $x = 0$ ) и равна нулю  $v = 0$  при  $x = A$  или  $x = -A$ .

Форму кривой, выражающей зависимость изменения колеблющейся величины (например, координаты, проекции скорости, проекции ускорения) от времени, называют *формой колебаний* (см. рис. 2).

Осциллограммы различных колебаний широко используются в медицине, науке и технике. Колебания, которые совершают грузы на пружине или подвешенные на нити, являются наиболее простыми по форме (синусоидальными или косинусоидальными) (см. рис. 2). На рисунке 8 приведена электрокардиограмма (от греч. *кардиа* (кардио) — сердце) — запись биений сердца человека, позволяющая определить состояние сердца и, если необходимо, назначить своевременное лечение. В отличие от осциллограммы колеблющегося груза (см. рис. 7) форма электрокардиограммы (см. рис. 8) существенно более сложная.

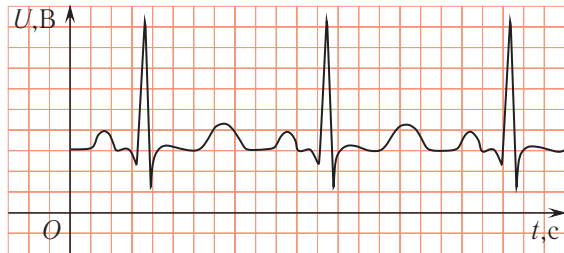


Рис. 8. Электрокардиограмма

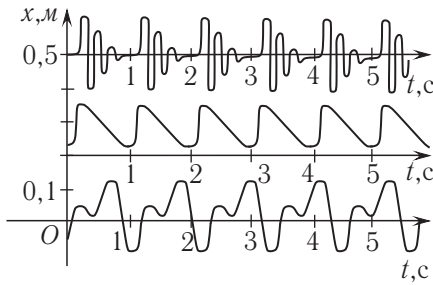


Рис. 9. Колебания одинаковой амплитуды и периода, но разной формы

Заметим, что амплитуда и период колебаний не дают полного представления о характере периодического процесса, так как процессы могут иметь одинаковую амплитуду и период, но совершенно разную форму (рис. 9).

Как же математически описываются гармонические колебания?

Они описываются уравнениями, в которых координата (смещение) тела изменяется во времени по **закону косинуса**.

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

или **синуса**:

$$x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (6)$$

Величина  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  называется **фазой колебаний**. Она определяет состояние колебательной системы (координаты, скорости, ускорения) в любой момент времени при заданной частоте и амплитуде. Значение в начальный момент времени  $\varphi(t = 0) = \varphi_0$  называется **начальной фазой**  $\varphi_0$ .

Зависимость координаты от времени  $x(t)$  (соотношения (5) и (6)) называется **кинематическим законом движения**, поскольку позволяет определить положение колеблющегося тела. Исходя из него можно найти его скорость, ускорение в любой момент времени.

**Координата тела** (смещение тела из положения равновесия)  $x(t)$  в момент времени  $t$  при периодическом движении подчиняется равенству:

$$x = f(t), f(t) = f(t + T),$$

где  $f(t)$  — заданная периодическая функция от времени  $t$ ,  $T$  — период этой функции.

Движение, при котором координата тела изменяется во времени по закону синуса (или косинуса), называется **гармоническим колебанием**.

Таким образом, основными кинематическими величинами, характеризующими периодические колебания, являются: *период* ( $T$ ), *частота* ( $\nu$ ), *циклическая частота* ( $\omega$ ) и *амплитуда* ( $A$ ).

В СИ основными единицами этих величин являются: периода колебаний — **секунда** (1 с), частоты колебаний — **герц** (1 Гц), циклической частоты —  $1 \text{ с}^{-1}$ . 1 Гц равен частоте колебаний тела, при которой за 1 с тело совершает одно полное колебание ( $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

Название единицы частоты **герц** дано в честь немецкого физика Генриха Герца, который экспериментально открыл электромагнитные волны.

Обратим внимание на то, что величины  $T$ ,  $\nu$ ,  $\omega$ ,  $A$ , которые характеризуют гармонические колебания тела, аналогичны соответствующим величинам, описывающим движение тела по окружности (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление физических величин, характеризующих вращательное и колебательное движения

| Физические величины  | Вид движения            |                           |
|--|-------------------------|---------------------------|
|  | Движение по окружности  | Гармонические колебания   |
| $R, A$   | $R$ — радиус окружности | $A$ — амплитуда колебаний |
| $\varphi$  | Угол поворота           | Фаза колебаний            |
| $T$  | Период обращения        | Период колебаний          |
| $N$  | Число оборотов          | Число колебаний           |
| $\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T}$                   | Частота обращения       | Частота колебаний         |
| $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$ | Угловая скорость        | Циклическая частота       |

Частота  $\nu$  (период  $T$ ) гармонических колебаний зависит только от свойств системы, в которой происходят колебания. Амплитуда колебаний  $A$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются не свойствами самой системы, а тем способом, каким в системе вызваны колебания. Так, колебания можно возбудить отклонением от положения равновесия, а можно — толчком из положения равновесия.

Все величины, рассмотренные выше, а именно период  $T$  (1), частота  $\nu$  (3), циклическая частота  $\omega$  (4) и амплитуда  $A$ , определяют колебательный процесс в целом, независимо от его природы.



1. Какое движение называют периодическим? Колебательным?
2. Что называют амплитудой колебаний? Периодом? Частотой?
3. Каким соотношением связаны между собой частота колебаний  $\nu$  и циклическая частота колебаний  $\omega$ ?
4. Что такое кинематический закон движения? Запишите закон движения при гармонических колебаниях.
5. Какой путь проходит гармонически колеблющееся тело за два периода колебаний, если амплитуда колебаний равна  $A$ ?
6. Приведите примеры колебательных систем в природе и технике.

### Примеры решения задач

1. Исходя из осциллограммы колебательного процесса, представленного на рисунке 10, определите амплитуду  $A$ , период  $T$  и частоту  $\nu$  данных колебаний.

Решение

Максимальное отклонение колеблющейся точки (см. рис. 10) составляет

$$x_{\max} = A = 4,0 \text{ см.}$$

Период колебаний — это время, за которое тело совершает одно колебание, т. е. точка опять окажется в положении с координатой  $x_{\max} = A = 4,0$  см. Следовательно,  $T = 4,0$  с.

Частота колебаний

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad \nu = \frac{1}{4,0 \text{ с}} = 0,25 \text{ с}^{-1} = 0,25 \text{ Гц.}$$

Ответ:  $A = 4,0$  см,  $T = 4,0$  с,  $\nu = 0,25$  Гц.

2. Материальная точка совершает гармонические колебания по закону:  $x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$  (м). Определите амплитуду  $A$ , частоту  $\nu$ , период  $T$  колебаний, координату  $x$  точки в момент времени  $t_1 = 5,0$  с.

Дано:

$$x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi t - \frac{\pi}{3}\right) \text{ (м)}$$

$$t_1 = 5,0 \text{ с}$$

$$A - ? \quad T - ? \quad \nu - ?$$

Решение

Координата точки, совершающей гармонические колебания, определяется соотношением:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ (м).}$$

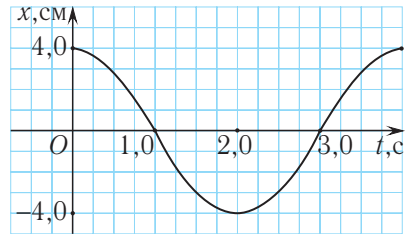


Рис. 10



Тогда из условия задачи находим, что амплитуда  $A = 0,40$  м, частота

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \nu = \frac{8\pi \text{ рад}}{2\pi \text{ рад} \cdot \text{с}} = 4,0 \text{ Гц},$$

период

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad T = \frac{1}{4,0 \text{ с}^{-1}} = 0,25 \text{ с}.$$

Координата точки  $x$  при  $t_1 = 5,0$  с равна

$$x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi \cdot 5,0 - \frac{\pi}{3}\right) (\text{м}) = 0,20 \text{ м}.$$

Ответ:  $A = 0,40$  м,  $\nu = 4,0$  Гц,  $T = 0,25$  с,  $x = 0,20$  м.

### Упражнение 1

- Исходя из осциллограммы колебательного процесса, представленного на рисунке 11, определите амплитуду  $A$ , период  $T$  и частоту  $\nu$  данных колебаний.
- В чем заключаются отличия представленных на рисунке 12 трех колебательных процессов?
- Определите путь, пройденный материальной точкой, колеблющейся с частотой  $\nu = 500$  Гц за промежуток времени  $\Delta t = 1,5$  с, если амплитуда колебаний  $A = 5,0$  мм.
- Материальная точка за промежуток времени  $\Delta t = 1,0$  мин совершила  $N = 180$  колебаний. Определите период  $T$ , частоту  $\nu$  и циклическую частоту  $\omega$  колебаний.
- Тело колеблется с амплитудой  $A = 20$  см и периодом  $T = 1,0$  с. Запишите кинематический закон его движения, если в начальный момент времени  $t = 0$  с отклонение маятника максимально. Постройте график зависимости  $x(t)$ .

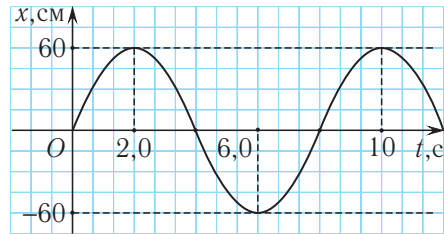


Рис. 11

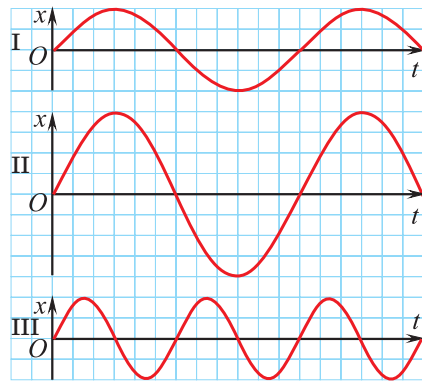


Рис. 12. Графики колебательных процессов

6. Измеряя пульс, определите частоту  $\nu$  колебаний (биений) сердца у себя, а также у родных, например у папы, мамы, брата, сестры, дедушки, бабушки. Проверьте, соответствует ли это норме (см. табл. 2).

Таблица 2. Нормы пульса по возрастам

| Возраст (годы) | Допустимые значения числа ударов в минуту |
|----------------|---|
| 4—6            | 86—126                                    |
| 6—8            | 70—118                                    |
| 8—10           | 68—108                                    |
| 10—12          | 60—100                                    |
| 12—15          | 55—95                                     |
| 15—50          | 60—80                                     |
| 50—60          | 64—84                                     |
| 60—80          | 69—89                                     |



§1-1

## § 2. Пружинный и математический маятники

- Груз, подвешенный на нити, колеблющийся в поле тяжести Земли, а также груз, прикрепленный к пружине, — примеры наиболее простых механических колебательных систем. Рассмотрим физические процессы, происходящие в таких системах.



Совокупность нескольких тел образуют механическую систему. Тела, не входящие в систему, называются внешними.

Второй закон Ньютона (основной закон динамики): ускорение, приобретаемое телом под действием приложенных к нему сил, обратно пропорционально массе тела, направлено по результирующей этих сил и прямо пропорционально ее модулю:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N}{m}.$$

Закон Гука: при упругих деформациях сжатия и растяжения модуль силы упругости прямо пропорционален модулю изменения длины тела:

$$F_{\text{упр}} = k|l - l_0| = k|\Delta l|,$$

где  $k$  — жесткость тела,  $l_0$  — длина недеформированного тела,  $l$  — длина деформированного тела. Направление силы упругости всегда противоположно направлению смещения при деформации.

Какие условия необходимы для возникновения колебаний?

Результаты опытов показывают, что для возникновения и существования механических колебаний тело изначально необходимо привести в движение. Это можно сделать, отклоняя его от положения равновесия или придавая ему начальную скорость посредством толчка. Этим отклонением или толчком определяется амплитуда колебаний. Кроме того, при выведении тела из положения равновесия в колеблющейся системе должна возникать результирующая сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия.

Простейшая колебательная система, состоящая из тела с прикрепленной к нему пружиной, связывающей тело и опору, называется **пружинным маятником**. Пружина может располагаться как горизонтально (*горизонтальный пружинный маятник*), так и вертикально (*вертикальный пружинный маятник*).

Рассмотрим колебания **горизонтального пружинного маятника**.

Пусть тело массой  $m$ , лежащее на гладкой горизонтальной поверхности, прикреплено к свободному концу невесомой пружины жесткостью  $k$  (рис. 13, а). Второй конец пружины прикреплен к неподвижной опоре.

Выведем тело из положения равновесия, сместив его, например, вправо на расстояние  $x$  (см. рис. 13, б). При этом согласно закону Гука возникнет сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$ , приложенная к телу и направленная влево.

Согласно второму закону Ньютона будет выполняться равенство:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} + \vec{N}. \quad (1)$$

С учетом закона Гука из (1) получаем уравнение для проекций величин на ось  $Ox$  (см. рис. 13, б):

$$ma_x = -kx. \quad (2)$$

Согласно (2) ускорение тела массой  $m$  пропорционально действующей силе и направлено к положению равновесия. При этом возникают колебания тела. Каждые полпериода направление движения меняется на

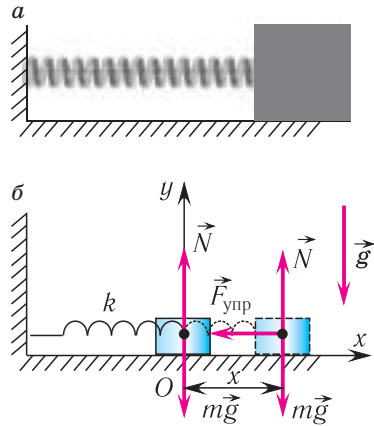


Рис. 13. а — горизонтальный пружинный маятник; б — силы, действующие на него

противоположное. Смещение груза происходит то вправо, то влево относительно положения равновесия, т. е. оно меняет знак. Следовательно, и сила согласно (2) тоже меняет знак.

Перепишем полученное соотношение (2) в виде:

$$a_x + \frac{k}{m}x = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) называется **уравнением гармонических колебаний** пружинного маятника.

Следовательно, **необходимым условием возникновения гармонических колебаний** является действие возвращающей силы, направленной к положению равновесия и прямо пропорциональной смещению тела от положения равновесия. Эта возвращающая сила всегда направлена к положению равновесия, о чем «говорит» минус в уравнении (2).

В *положении равновесия* возвращающая сила равна нулю ( $F = 0$ ), так как  $x = 0$ . Поэтому если в этом положении колеблющееся тело остановить, то колебания исчезнут.

Расчеты показывают, а результаты экспериментов подтверждают, что при описанных условиях тело будет совершать колебания с периодом:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4)$$

С учетом того, что период связан с циклической частотой соотношением  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , находим:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

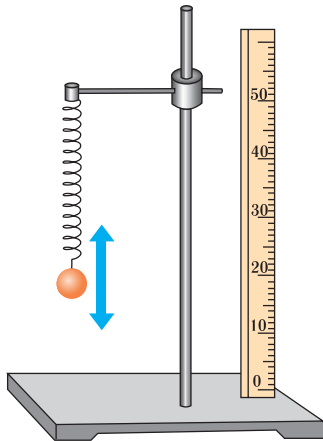


Рис. 14. Вертикальный пружинный маятник

Из формул (4) и (5) следует, что период и частота гармонических колебаний пружинного маятника определяются массой груза  $m$  и жесткостью пружины  $k$  и не зависят от амплитуды его колебаний.

Отметим, что период и циклическая частота колебаний **вертикального пружинного маятника** (рис. 14) также определяются по формулам (4) и (5).

Одной из наиболее распространенных колебательных систем является *математический маятник*. **Математическим маятником** называется небольшое тело массой  $m$ , подвешенное

на невесомой нерастяжимой нити длиной  $l$ , находящееся в поле силы тяжести (рис. 15).

Рассмотрим колебания математического маятника.

Отклонение маятника от положения равновесия будем характеризовать углом  $\alpha$  (рис. 16), который нить образует с вертикалью. После отклонения маятника от положения равновесия на него действуют две силы: направленная вертикально вниз сила тяжести  $m\vec{g}$  и направленная вдоль нити сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$ . Под действием этих сил тело движется ускоренно к положению равновесия (точка  $B$ ). Пройдя точку  $B$ , тело продолжает двигаться, но его скорость постепенно уменьшается, обращаясь в нуль в точке, симметричной точке  $A$  относительно вертикали. После этого оно начинает двигаться обратно к точке  $B$ .

Согласно второму закону Ньютона для движения маятника можем записать:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}. \quad (6)$$

В проекциях на выбранные оси координат  $Ox$  и  $Oy$  (см. рис. 16) получаем:

$$-F_{\text{упр}} \sin \alpha = ma_x, \quad (7)$$

$$-mg + F_{\text{упр}} \cos \alpha = ma_y. \quad (8)$$

Поскольку при малых углах отклонения длина дуги  $AB \approx x$ , то из  $\triangle AOD$  находим:

$$\sin \alpha = \frac{AC}{AD} = \frac{x}{l},$$

где  $x$  — отклонение маятника от положения равновесия,  $l$  — длина маятника.

Подставляя выражение для синуса в (7), получим:

$$-F_{\text{упр}} \sin \alpha \approx -F_{\text{упр}} \frac{x}{l} = ma_x. \quad (9)$$

Таким образом, силой, возвращающей маятник к устойчивому положению равновесия при колебаниях, является сила упругости его нити и силы тяжести.

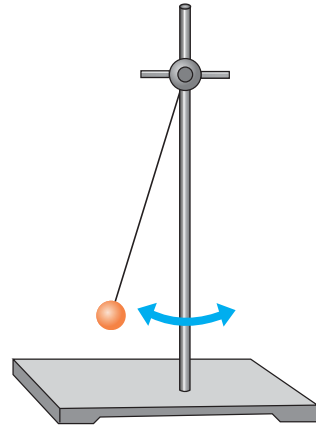


Рис. 15. Математический маятник

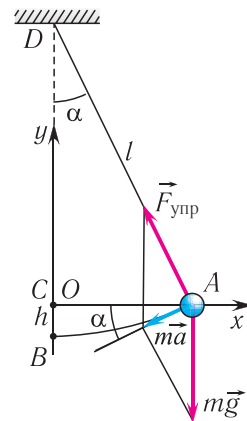


Рис. 16. Силы, действующие на математический маятник

При малых углах отклонения маятника проекция вектора ускорения  $a_y \ll g$  и ей можно пренебречь, а  $\cos \alpha \approx 1$ , тогда из уравнения (8) следует  $F_{\text{упр}} \approx mg$ . Следовательно, уравнение движения маятника вдоль оси  $Ox$  запишется в виде:

$$ma_x = -\frac{mg}{l}x.$$

где  $a_x$  — проекция ускорения, сообщаемого грузу маятника силой упругости нити.

Откуда получаем уравнение колебаний математического маятника:

$$a_x + \frac{g}{l}x = 0. \quad (10)$$

Сравнивая соотношения (10), (3) и (5), легко получить формулу для циклической частоты математического маятника в поле тяжести Земли:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (11)$$

Период малых колебаний математического маятника в поле тяжести Земли определяется по **формуле Гюйгенса**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (12)$$

Используя соотношения (5) и (11), уравнение колебаний пружинного маятника  $a_x + \frac{k}{m}x = 0$  и математического маятника  $a_x + \frac{g}{l}x = 0$  можно записать в одинаковом виде:

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0. \quad (13)$$

Таким образом, зависимости координат от времени  $x(t)$ , описываемые уравнениями (5) и (6) из § 1, удовлетворяют уравнению (13), которое называется уравнением гармонических колебаний.

Как видно из формул (11), (12), период и циклическая частота малых колебаний математического маятника не зависят от массы маятника и амплитуды его колебаний, а определяются только его длиной и ускорением свободного падения.



► Одним из важнейших достижений Х. Гюйгенса было изобретение часов с маятником. Он запатентовал свое изобретение 16 июля 1657 г. В 1673 г. вышло в свет его сочинение «Маятниковые часы», в котором были изложены теоретические основы его изобретения. Именно постоянство периода (частоты) колебаний маятника позволило использовать его для создания часов.



1. Какой маятник называют пружинным? Запишите кинематический закон движения пружинного маятника.
2. По какой формуле определяется циклическая частота колебаний пружинного маятника? Период его колебаний?
3. Изменится ли период колебаний пружинного маятника, если его «перенести» с поверхности Земли на поверхность Луны? Привести в состояние невесомости?
4. Какой маятник называют математическим? Запишите кинематический закон движения математического маятника.
5. Как направлена равнодействующая сил, приложенных к грузу маятника, в моменты, когда он находится в крайних положениях? Когда проходит через положение равновесия?
6. Маятниковые часы спешат. Как надо изменить длину подвеса, чтобы они шли точно?
7. Каким образом, используя математический маятник, можно определить ускорение свободного падения в данном месте?
8. Влияет ли изменение температуры на точность хода маятниковых часов?

### Пример решения задачи

Определите циклическую частоту  $\omega$  и период  $T$  тела массой  $m = 500$  г, прикрепленного к вертикальной пружине (рис. 17). Известно, что в состоянии покоя тело растягивает пружину на расстояние  $x_0 = 10$  мм и для возбуждения колебаний его смещают вниз на расстояние  $x = 30$  мм и отпускают.

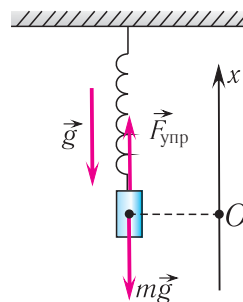


Рис. 17

Дано:

$$m = 500 \text{ г} = 0,500 \text{ кг}$$

$$x = 30 \text{ мм} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$x_0 = 10 \text{ мм} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$\omega$  — ?  $T$  — ?

Решение

Циклическая частота колебаний вертикального пружинного маятника, так же как и горизонтального, определяется по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Найдем жесткость  $k$  пружины. Из условия равновесия тела следует:

$$\vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} = \vec{0}.$$

По закону Гука в проекции на ось  $Ox$  имеем:

$$F_{\text{упр}x} = -k(-x_0).$$

Тогда в проекции на ось  $Ox$  условие равновесия запишется:

$$mg = kx_0, \quad k = \frac{mg}{x_0}.$$

Отсюда для циклической частоты  $\omega$  получаем:

$$\omega = \sqrt{\frac{mg}{x_0 m}} = \sqrt{\frac{g}{x_0}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{М}}} = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Период колебаний находим из соотношения:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{x_0}{g}}, \quad T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-2} \text{М}}{9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}} = 0,20 \text{ с}.$$

Ответ:  $\omega = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $T = 0,20 \text{ с}$ .



## Упражнение 2

1. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  колебаний груза массой  $m = 200 \text{ г}$ , подвешенного на пружине жесткостью  $k = 0,15 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .
2. Определите длину  $l$  математического маятника на поверхности Земли, если частота его колебаний  $\nu = 1,0 \text{ Гц}$ .
3. Определите жесткость  $k$  пружины маятника массой  $m = 400 \text{ г}$ , совершающего колебания, представленные на рисунке 18.
4. Груз, подвешенный к пружине, вызывает ее удлинение на величину  $\Delta l$ . Определите  $\Delta l$  пружины, если циклическая частота вертикальных колебаний такой системы  $\omega = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

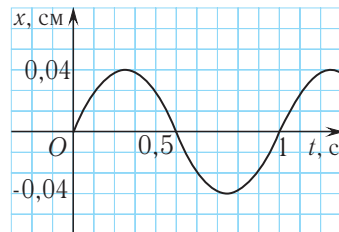


Рис. 18

5. Два тела с одинаковыми массами подвешены к двум одинаковым пружинам. Тела смещают вниз: одно на расстояние  $x_1 = 10 \text{ см}$ , другое —



на  $x_2 = 20$  см, затем одновременно отпускают. Какое из них первым пройдет положение равновесия?

6. Один математический маятник совершил за некоторое время  $N_1 = 20$  колебаний, а второй за то же время совершил  $N_2 = 16$  колебаний. Определите длину  $l_2$  второго маятника, если известно, что разность длин маятников  $\Delta l = 10$  см.
7. Период малых колебаний математического маятника на поверхности Земли равен  $T = 0,80$  с. Каким будет период  $T_1$  его колебаний на поверхности Марса, если ускорение свободного падения  $g_m = 0,37g_3$ ?
8. Определите длину  $l$  секундного маятника, установленного в Минске, где ускорение свободного падения  $g = 9,815 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Найдите относительную погрешность расчета, в котором ускорение свободного падения было бы принято равным  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .



### § 3. Превращения энергии при гармонических колебаниях

- При гармонических колебаниях полная механическая энергия системы остается неизменной, хотя скорость груза и его смещение непрерывно изменяются с течением времени. Какие превращения энергии наблюдаются в системе при этом? Как вычислить кинетическую или потенциальную энергию в любой момент времени?



Механическая энергия системы равна сумме ее кинетической и потенциальной энергий. Кинетической энергией тело обладает вследствие своего движения, а потенциальная энергия определяется взаимодействием тела с другими телами или силовыми полями. Механическая энергия замкнутой системы, в которой не действуют силы трения (сопротивления), сохраняется.

Привести в движение колебательную систему можно либо посредством отклонения ее из положения равновесия, либо сообщая телу начальную скорость (т. е. посредством толчка). В первом случае мы сообщаем системе дополнительную *потенциальную* энергию, а во втором — дополнительную *кинетическую* энергию.

Если силой трения можно пренебречь, то при колебаниях механическая энергия системы сохраняется. При этих условиях для данной системы выполняется закон сохранения механической энергии:

$$W = W_k + W_n = \text{const.}$$

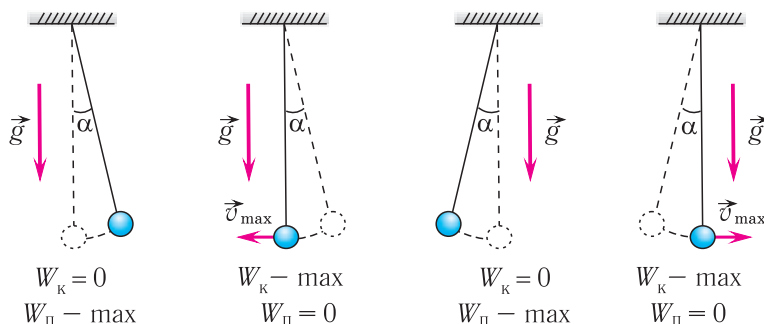
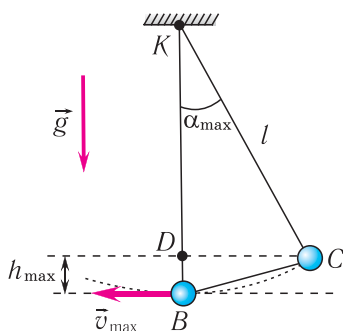


Рис. 19. Превращения энергии при колебаниях математического маятника

Рассмотрим превращения энергии при колебаниях математического маятника. Выберем систему отсчета таким образом, чтобы в положении равновесия его потенциальная энергия была равна нулю. При отклонении маятника на угол  $\alpha_{\max}$  (рис. 19, 20), соответствующий его максимальному смещению от положения равновесия (тело в точке  $C$ ), потенциальная энергия маятника максимальна, а кинетическая энергия равна нулю:

$$(W_{\text{п}})_{\max} = mgh_{\max}, \quad W_{\text{к}} = 0.$$

Рис. 20. Определение  $v_{\max}$  и  $h_{\max}$ 

Поскольку в момент прохождения положения равновесия (тело в точке  $B$ ) потенциальная энергия маятника равна нулю  $W_{\text{п}} = 0$ , то из закона сохранения механической энергии следует (см. рис. 20), что  $(W_{\text{к}})_{\text{B}} = (W_{\text{п}})_{\text{C}}$ , т. е. что кинетическая энергия маятника (а следовательно, и скорость) в этот момент будет максимальна:

$$(W_{\text{к}})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad W_{\text{п}} = 0.$$

Таким образом, в положении равновесия потенциальная энергия маятника полностью переходит в кинетическую, а в положениях максимального отклонения — кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную.

Приравнявая полные механические энергии маятника в точках  $C$  и  $B$ , получим:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh_{\max}. \quad (1)$$

Отсюда найдем модуль максимальной скорости маятника:

$$v_{\max} = \sqrt{2gh_{\max}}. \quad (2)$$

В любом промежуточном положении

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const} = (W_{\text{к}})_{\max} = (W_{\text{п}})_{\max} = W_{\text{мех}}.$$

Покажем, что аналогичные превращения энергии имеют место и для пружинного маятника (рис. 21).

В крайних точках, когда  $x = \pm A$  и скорость маятника  $v = 0$ , кинетическая энергия груза полностью переходит в потенциальную энергию деформированной пружины (см. рис 21, а, з):

$$(W_{\text{п}})_{\max} = \frac{kA^2}{2}.$$

Таким образом, механическая энергия маятника пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний.

В положении равновесия, когда  $x = 0$ , вся энергия маятника переходит в кинетическую энергию груза (см. рис. 21, б):

$$(W_{\text{к}})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где  $v_{\max}$  — модуль максимальной скорости груза при колебаниях.

В промежуточных точках полная энергия:

$$W_{\text{мех}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = (W_{\text{п}})_{\max} = (W_{\text{к}})_{\max}.$$

При отсутствии в системе потерь энергии процесс колебаний сопровождается только переходом потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Такие превращения энергии происходят с вдвое большей частотой (рис. 22, а, б),

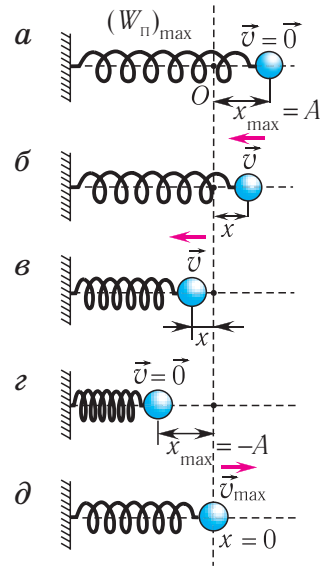


Рис. 21. Превращения энергии при колебаниях пружинного маятника

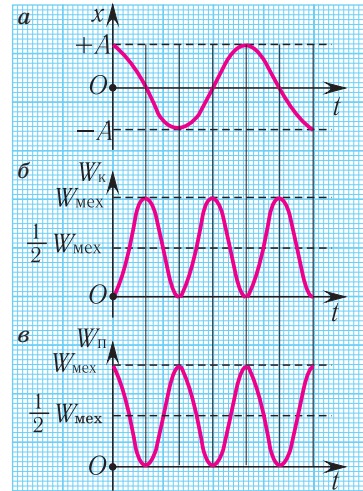


Рис. 22. Зависимости от времени: а — смещения маятника; б — его кинетической и потенциальной энергий; в — его потенциальной энергии

чем сами колебания. Действительно, дважды за период механическая энергия будет полностью превращаться в потенциальную (в двух крайних положениях) и дважды за период — в кинетическую (при прохождении через положение равновесия) (рис. 22, в).



1. Какой энергией обладает математический маятник при прохождении положения равновесия?
2. Какой энергией обладает пружинный маятник при наибольшем смещении от положения равновесия?
3. Чем отличаются потенциальные энергии математического и пружинного маятников?
4. Как изменяется энергия маятника при колебаниях?
5. Запишите формулы для определения механической энергии колеблющегося тела при прохождении им положения равновесия и при максимальном смещении из него.

### Пример решения задачи

Определите полную механическую энергию  $W$  колебаний груза массой  $m = 100$  г на пружине, если он совершает гармонические колебания с циклической частотой  $\omega = 12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  и амплитудой  $A = 4,0$  см.

Дано:

$$m = 100 \text{ г} = 0,10 \text{ кг}$$

$$\omega = 12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$A = 4,0 \text{ см} = 0,040 \text{ м}$$

$W$  — ?

Решение

Энергия колебаний груза:

$$W = \frac{kA^2}{2},$$

где  $k$  — жесткость пружины.

Так как циклическая частота колебаний груза определяется

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ то}$$

$$k = m\omega^2.$$

Окончательно,

$$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}, \quad W = \frac{0,10 \text{ кг} \cdot \left(12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)^2 \cdot (0,040 \text{ м})^2}{2} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 12 \text{ мДж}.$$



Ответ:  $W = 12$  мДж.

**Упражнение 3**

1. В каких точках траектории при колебаниях математического маятника максимальна энергия:
  - а) кинетическая  $W_k$ ;
  - б) потенциальная  $W_{\text{п}}$ ? Чему она равна?
2. Математический маятник массой  $m = 100$  г при прохождении положения равновесия имеет скорость, модуль которой  $v = 4,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите:
  - а) полную энергию  $W_{\text{мех}}$  маятника;
  - б) максимальную высоту  $h_{\text{max}}$ , на которую поднимается маятник.
3. Математический маятник массой  $m = 100$  г выводят из положения равновесия, поднимая его на высоту  $h = 10$  см над начальным уровнем. Определите:
  - а) изменение потенциальной энергии маятника  $\Delta W_{\text{п}}$  при его отклонении от положения равновесия;
  - б) его максимальную кинетическую энергию  $W_{k \text{ max}}$ .
4. Тело совершает гармонические колебания. Определите отношение кинетической энергии к ее потенциальной энергии для моментов времени, когда смещение тела от положения равновесия составляет:
  - а)  $x = \frac{A}{2}$ ;
  - б)  $x = \frac{3A}{4}$ ;
  - в)  $x = A$ .
5. Груз массой  $m = 250$  г совершает гармонические колебания на пружине жесткостью  $k = 80 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  с амплитудой  $A = 3,6$  см. Определите полную механическую энергию колебаний  $W$ , потенциальную  $W_{\text{п}}$  и кинетическую  $W_k$  энергию в момент времени, когда смещение груза от положения равновесия  $x = 2,2$  см. Потенциальную энергию в положении равновесия считать равной нулю.
6. Груз массой  $m = 100$  г, находящийся на гладкой горизонтальной поверхности, закреплен на пружине жесткостью  $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ , прикрепленной к опоре. Его смещают из положения равновесия на расстояние  $x_1 = 5,0$  см и сообщают ему в направлении от положения равновесия скорость, модуль которой  $v_1 = 1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равны потенциальная  $W_{\text{п}}$  и кинетическая  $W_k$  энергия груза в этот момент времени? Запишите кинематический закон его движения.

7. Пружинный маятник, находящийся на гладкой горизонтальной поверхности, вывели из положения равновесия и без толчка отпустили. Через какую часть  $n$  периода  $T$  кинетическая энергия прикрепленного к пружине тела будет равна потенциальной энергии  $W_{\text{п}}$  деформированной пружины?
8. Определите полную механическую энергию  $W_{\text{мех}}$  гармонических колебаний материальной точки, если известны ее масса  $m$ , частота  $\nu$  и амплитуда  $A$  колебаний.



## § 4. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс

- Колебания груза, подвешенного на нити, с течением времени затухают, поскольку в системе действуют силы трения и сопротивления воздуха. При каких условиях механические колебания не затухают? Можно ли добиться увеличения амплитуды колебаний, используя внешнее воздействие?



Силы взаимодействия тел системы называют внутренними. Тела, не входящие в систему, называются внешними телами. Силы, которые действуют на тела системы со стороны внешних тел, называют внешними силами.

Колебания, происходящие с постоянной во времени амплитудой, называются **незатухающими колебаниями** (рис. 23, *а*). Незатухающие колебания, которые совершает система около положения устойчивого равновесия под действием внутренних сил после того, как она была выведена из состояния равновесия и предоставлена самой себе, называются **свободными (собственными) колебаниями**.

Свободные колебания (в отсутствие трения) происходят со строго определенной частотой  $\omega_0$ , называемой **частотой свободных (собственных) колебаний системы**. Эта частота зависит только от параметров системы.

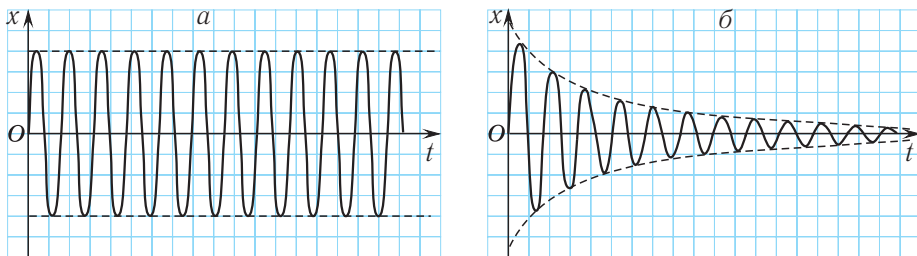


Рис. 23. Механические колебания: *а* — незатухающие; *б* — затухающие

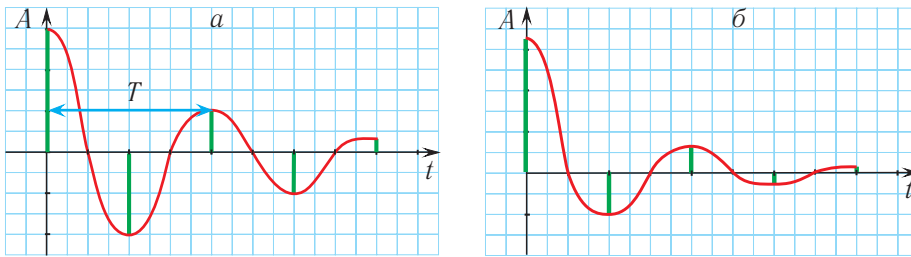


Рис. 24. Затухающие механические колебания (коэффициенты трения сопротивления  $\mu_a < \mu_b$ ): а — малая сила трения; б — большая сила трения

Примерами таких колебаний могут служить колебания математического и пружинного маятников, происходящие в отсутствие сил трения.

Амплитуда свободных колебаний определяется начальными условиями, т. е. тем начальным отклонением или толчком, который приведет в движение маятник или груз на пружине. Свободные колебания являются самым простым видом колебаний.

В любой реальной колебательной системе всегда присутствуют силы трения (сопротивления), поэтому механическая энергия системы с течением времени уменьшается, переходя во внутреннюю энергию. Убыль механической энергии приводит к уменьшению амплитуды колебаний.

Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени вследствие потери энергии колебательной системой, называются **затухающими колебаниями** (рис. 23, б).

При малых потерях энергии колебания можно считать периодическими и пользоваться такими понятиями, как период и частота колебаний, считая периодом промежуток времени между двумя последовательными максимумами смещения  $x(t)$  (рис. 24, а).

Колебания в любой реальной системе рано или поздно затухают. Чтобы колебания не затухали, необходимо воздействие внешней силы. Однако не всякая внешняя сила заставляет систему двигаться периодически. Например, невозможно раскачать качели, если действовать на них постоянной силой.

Проведем следующий эксперимент. Соединим математический маятник с метрономом тонким легким стержнем (рис. 25, а). Изменяя частоту колебаний метронома (рис. 25, б), добиваемся уве-

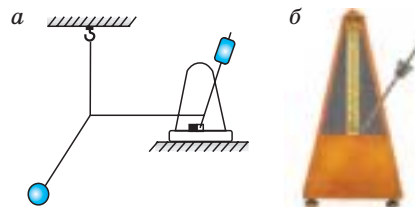


Рис. 25. а — наблюдение явления резонанса в системе математический маятник — метроном; б — внешний вид метронома

личения амплитуды колебаний математического маятника. Оказывается, что его амплитуда будет максимальной при совпадении собственной частоты колебаний маятника и метронома.

Колебания тел под действием внешней периодической силы называются **вынужденными**, а сила — **вынуждающей**. В случае действия гармонической вынуждающей силы, например  $F(t) = F_0 \sin \omega t$  или  $F(t) = F_0 \cos \omega t$ , вначале наблюдается достаточно сложное движение тела. Спустя некоторое время после начала действия вынуждающей силы колебания при наличии трения приобретают стационарный характер и не зависят от начальных условий. Частота установившихся вынужденных колебаний всегда равна частоте вынуждающей силы.

Амплитуда и энергия вынужденных колебаний зависят от того, насколько различаются частота вынуждающей силы  $\omega$  и частота собственных колебаний  $\omega_0$ , а также от величины трения (сопротивления) в системе.

При вынужденных колебаниях возможно явление, называемое *резонансом* (от лат. слова *resono* — откликаться).

**Резонанс** — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты  $\omega$  внешней силы, действующей на колебательную систему, к частоте  $\omega_0$  собственных колебаний системы ( $\omega \rightarrow \omega_0$ ) (рис. 26).

Подвесим на упругой нити (AB) четыре математических маятника с одинаковыми грузами, три из которых имеют различную длину, а длина четвертого равна длине второго (рис. 27). Сначала посмотрим, что будет с маятниками, если раскачать первый или третий маятник.

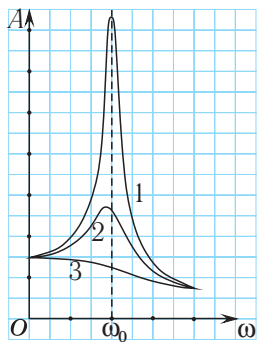


Рис. 26. Резонанс: коэффициенты трения (сопротивления)  $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$

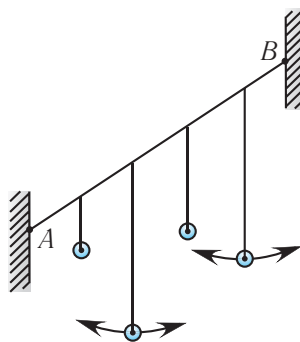


Рис. 27. Наблюдение явления резонанса в системе маятников



Наблюдения показывают, что через некоторое время начнут качаться и остальные маятники. Но амплитуда их колебаний мала и вскоре колебания затухают. А вот если раскачать второй маятник, то амплитуда колебаний четвертого будет возрастать, пока не достигнет достаточно большого значения.

Это происходит потому, что частота внешней силы, действующей на четвертый маятник, совпадает с частотой его собственных колебаний (т. к. длины второго и четвертого маятников равны). Мы наблюдаем явление резонанса.

Подчеркнем, что при резонансе создаются оптимальные условия для передачи энергии от внешнего источника к колебательной системе.

Так при возбуждении камертона *A* (рис. 28) такой же камертон *B* через некоторое время также начинает активно звучать. При этом исходной внешней силой является удар молотком по первому камертону, а внешней силой, действующей на второй камертон, — сила давления воздуха при колебаниях.

Вспомним также процесс раскачивания на качелях. Если их раскачивать с очень малой или очень большой частотой, то эффект будет крайне мал. Раскачивание будет очень эффективным, если подобрать частоту толчков, равную частоте собственных колебаний качелей.

Большинство сооружений и механизмов способно совершать свободные колебания. При внешних периодических воздействиях с частотой, близкой к резонансной, в них могут возбуждаться колебания большой амплитуды, что может привести к разрушительным последствиям. В связи с этим, например, при прохождении по мостам войсковых частей солдатам дают команду идти вольным шагом (не в ногу). По той же причине поезда движутся по мостам либо очень медленно, либо на максимальной скорости.

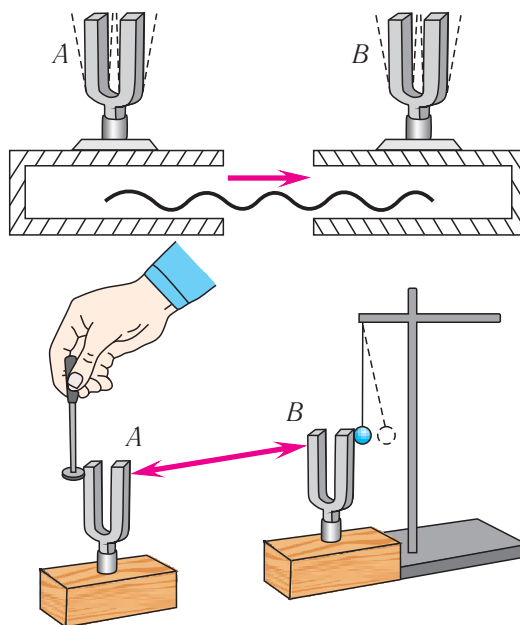


Рис. 28. Наблюдение явления резонанса в двух одинаковых камертонах *A* и *B*

► В 1850 г. цепной мост через реку Мен вблизи г. Анжер (Франция) разрушился во время прохождения по нему отряда солдат, так как частота их шага совпала с частотой свободных колебаний моста.

7 ноября 1940 г. сильный порывистый ветер вызвал резонансные колебания висячего Такомакского моста (США), что привело к его разрушению (рис. 29).

Заметим, что современные висячие мосты — это устойчивые конструкции, которые выдерживают сильные порывистые ветры и прочие нагрузки благодаря новым инженерным решениям.



Рис. 29. Разрушенный мост через реку Такома (США)



1. Какие колебания называются незатухающими?
2. Какие колебания называются свободными (собственными)?
3. Почему собственные колебания маятника затухают с течением времени?
4. От чего зависит частота собственных колебаний?
5. Какие колебания называются вынужденными? От чего зависит частота вынужденных колебаний?
6. Почему для возникновения колебаний в системе внешняя сила должна быть непостоянной?
7. Что такое резонанс? Приведите примеры полезного и вредного влияния резонанса.
8. Вода в ведре, которое несет мальчик, начала сильно расплескиваться. Почему расплескивание может прекратиться при изменении темпа ходьбы?



### Пример решения задачи

Определите модуль скорости  $v$  движения поезда, при которой математический маятник, подвешенный в вагоне, особенно сильно раскачивается. Длина маятника  $l = 11$  см, расстояние между стыками рельсов  $L = 12,5$  м.

Дано:

$$l = 11 \text{ см} = 0,11 \text{ м}$$

$$L = 12,5 \text{ м}$$

$$v = ?$$

Решение

Маятник начинает сильно раскачиваться, когда частота его собственных колебаний совпадает с частотой вынуждающей силы. Частота вынуждающей силы совпадает с частотой ударов колес вагона о стыки рельс.

Промежуток времени между двумя последовательными ударами (период):

$$T = \frac{L}{v}.$$

Частота вынуждающей силы:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{L}. \quad (1)$$

Частота собственных колебаний математического маятника:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

Приравняв формулы (1) и (2), получим:

$$\frac{v}{L} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Откуда:

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

$$v = \frac{12,5 \text{ м}}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0,11 \text{ м}}} = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $v = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

#### Упражнение 4

1. Нарисуйте график затухающих колебаний груза на пружине, если амплитуда каждого следующего колебания уменьшается в  $n = 1,5$  раза. Начальная амплитуда  $A = 30$  мм, длительность одного колебания  $T = 0,50$  с.
2. Для чего все вибрирующие устройства (электродвигатели, дизельные установки и т. д.) в высотных зданиях ставят на специальные резиновые или металлические амортизаторы?
3. При движении поезда вагоны испытывают периодические удары на стыках рельсов. Определите скорость  $v$  поезда, при которой пассажиры будут ощущать наиболее сильное вертикальное раскачивание вагона, если длина рельса  $L = 12,5$  м, а период собственных вертикальных колебаний вагона  $T = 1,5$  с.
4. Какой должна быть длина  $l$  математического маятника, подвешенного в вагоне, чтобы он раскачивался наиболее сильно при движении вагона со скоростью, модуль которой  $v = 67,5 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ ? Расстояние между стыками рельсов  $L = 12,5$  м.



## § 5. Распространение колебаний в упругой среде. Продольные и поперечные волны

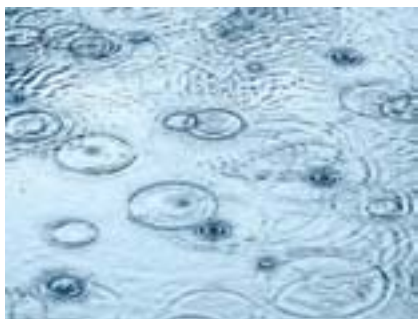


Рис. 30. Волны на воде

■ Если бросить камень в воду, то от места падения по поверхности воды начнут распространяться круговые волны (рис. 30), радиус которых будет увеличиваться с течением времени. Как происходит процесс распространения колебаний? Какие условия необходимы для этого?

Рассмотрим систему горизонтальных пружинных маятников, соединенных друг с другом (рис. 31). Что произойдет, если подействовать на один из шариков цепочки (например, первый) периодической внешней силой, направленной вдоль цепочки? Поскольку между шариками действуют силы упругости, обусловленные пружинами, то в колебательное движение той же частоты придут и все последующие шарики цепочки. Начинается процесс распространения колебаний, причем колебания каждого последующего шарика будут запаздывать по сравнению с колебаниями предыдущего. Это запаздывание обусловлено конечной скоростью распространения упругих деформаций вдоль цепочки пружин.



Рис. 31. Цепочка соединенных пружинками маятников

Рассмотренная система (цепочка шариков, связанных между собой пружинами) представляет собой простейшую (одномерную) модель *упругой среды*. Упругой называется среда, частицы которой связаны между собой силами упругости. Примерами упругих сред служат газ, жидкость, твердое тело, эластичный материал (резина).

Результаты экспериментов показывают, что колебания, возбужденные в какой-либо точке упругой среды, с течением времени передаются в ее другие точки. Так от камня, брошенного в спокойную воду озера, кругами расходятся волны. Из-за периодических сокращений сердца возникают биения пульса на запястье и т. п. Перечисленные явления — примеры процесса распространения *механических колебаний в упругой среде*.

**Механической волной** называется процесс распространения колебаний в упругой среде, который *сопровождается передачей энергии* от одной точки среды к другой.



Рис. 32. Камертон

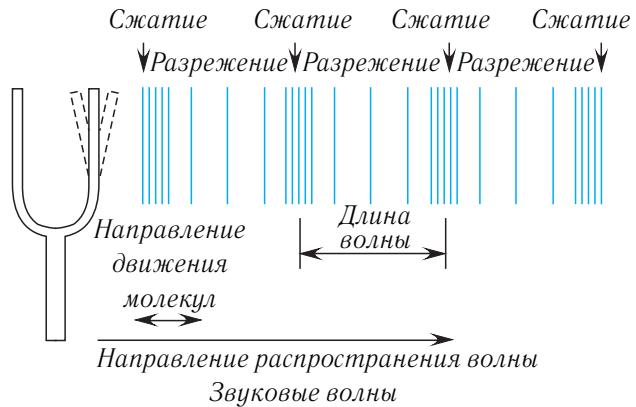


Рис. 33. Образование механических волн при колебании камертона

► Механические волны могут распространяться в газах, жидкостях, твердых телах, но не могут распространяться в вакууме.

Источником механических волн всегда является какое-либо колеблющееся тело. Механизм образования волны можно представить следующим образом. Источник колебаний, например камертон (рис. 32), воздействует на частицы упругой среды, соприкасающиеся с ним, и заставляет их совершать вынужденные колебания (рис. 33). Участки упругой среды вблизи источника деформируются, и в них возникают силы упругости, препятствующие деформации.

Если частицы среды сблизилась, то возникающие упругие силы их расталкивают, а если они удалились друг от друга, то упругие силы их сближают. Силы будут действовать на все более удаленные от источника частицы среды, постепенно приводя их в колебательное движение. В результате колебания будут распространяться в среде в виде волны (рис. 34).

Если источник колеблется гармонически, то и волна в упругой среде будет гармонической. Заметим, что колебания, вызванные в каком-либо месте упругой среды, распространяются в ней не мгновенно, а с определенной скоростью, зависящей от плотности и упругих свойств среды.

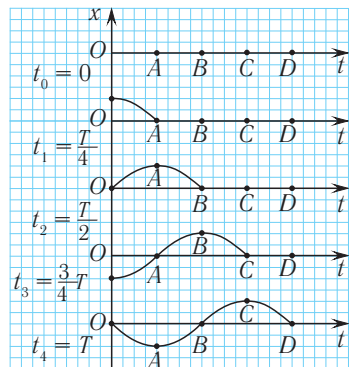


Рис. 34. Распространение колебаний в среде

Подчеркнем, что при распространении волны отсутствует *перенос вещества*, поскольку частицы среды колеблются вблизи своих фиксированных положений равновесия.

Рассмотрим основные характеристики волн (см. рис. 34):

**амплитуда ( $A$ )** — модуль максимального смещения точек среды от положений равновесия при колебаниях;

**период ( $T$ )** — время одного колебания (период колебаний точек среды равен периоду колебаний источника волны):

$$T = \frac{\tau}{N},$$

где  $\tau$  — промежуток времени, в течение которого совершаются  $N$  колебаний.

**Частота ( $\nu$ )** — число колебаний, совершаемых данной системой в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\tau},$$

частота волны равна частоте колебаний источника.

Отметим, что амплитуда, период и частота для механических волн определяются точно так же, как и для колебаний.

Новыми характеристиками волн являются (рис. 35):

**длина волны ( $\lambda$ )** — это расстояние, на которое возмущение распространяется за промежуток времени, равный периоду колебаний источника:

$$\lambda = \nu T; \quad (1)$$

**скорость распространения волны ( $\bar{v}$ )** — это скорость распространения колебаний в упругой среде, модуль этой скорости согласно (1) равен:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu. \quad (2)$$

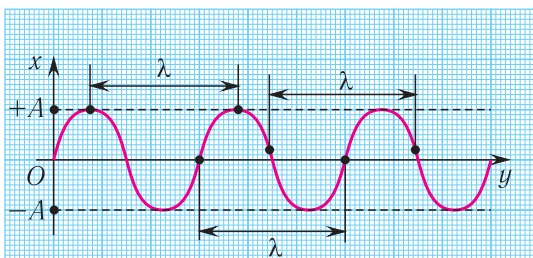


Рис. 35. Основные характеристики волны

Подчеркнем, что скорость распространения волн и скорость колебания частиц — это разные величины.

**Волновая поверхность** — это поверхность, все точки которой колеблются в одинаковых фазах, т. е. это поверхность равных фаз. Геометрическое место

точек, до которых доходят колебания к моменту времени  $t$ , называется **волновым фронтом**.

Волна называется **круговой**, если ее волновой фронт является окружностью (см. рис 30).

Распространение волны можно наблюдать, проведя следующий эксперимент: если один конец резинового шнура, лежащего на гладком горизонтальном столе, закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести его второй конец в колебательное движение в направлении, перпендикулярном шнуру, то по нему побежит волна.

В отличие от колебаний, где кинетическая и потенциальная энергии изменяются в противофазе (см. рис. 22), в бегущей волне колебания кинетической и потенциальной энергий происходят в одинаковой фазе.

Волна называется **продольной**, если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волн. Распространение волн вдоль цепочки горизонтальных пружинных маятников (см. рис. 31) является примером распространения продольных упругих волн.

При этом распространение волны сопровождается образованием сгущений и разрежений вдоль направления ее распространения.

Продольную волну легко получить с помощью длинной «мягкой» пружины (рис. 36, *a*), которая лежит на гладкой горизонтальной поверхности и один конец ее закреплен. Упругие волны в газах и жидкостях возникают только при сжатии или разрежении среды. Поэтому в таких средах возможно распространение только продольных волн.

Легким ударом по свободному концу  $B$  пружины мы вызовем появление волны (рис. 36, *б*). При этом каждый виток пружины будет колебаться вдоль направления распространения волны  $BC$ . Примерами продольных волн являются звуковые волны в воздухе и жидкости.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

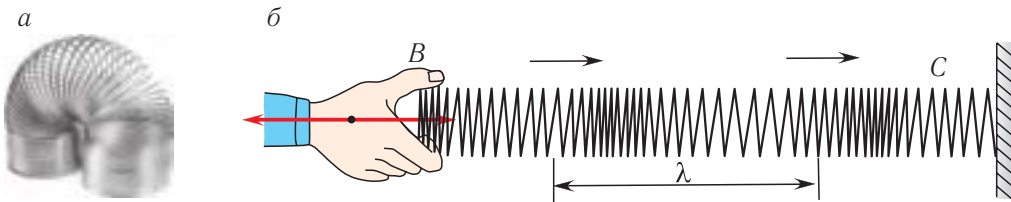


Рис. 36. *a* — «мягкая» пружина; *б* — продольная волна

Поперечная волна будет распространяться вдоль цепочки пружинных маятников, если на один из них подействовать периодической силой, направленной перпендикулярно цепочке (рис. 37).

Используя длинную пружину, можно также продемонстрировать распространение поперечных волн, если совершать колебания незакрепленного конца перпендикулярно продольной оси пружины (рис. 38).

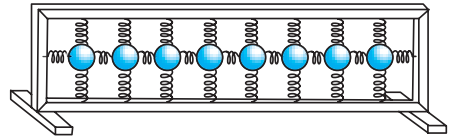


Рис. 37. Устройство для демонстрации продольных и поперечных волн

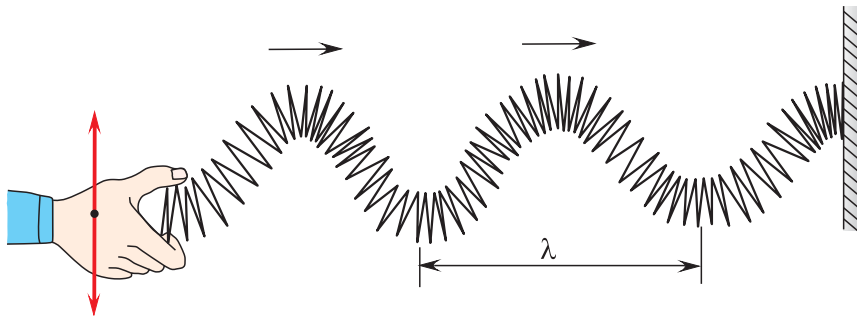


Рис. 38. Поперечная волна

В твердых телах упругие волны могут возникать также и при смещении или сдвиге одних слоев среды относительно других. Поэтому в отличие от жидкостей и газов в твердых телах возможно распространение как продольных, так и поперечных волн.

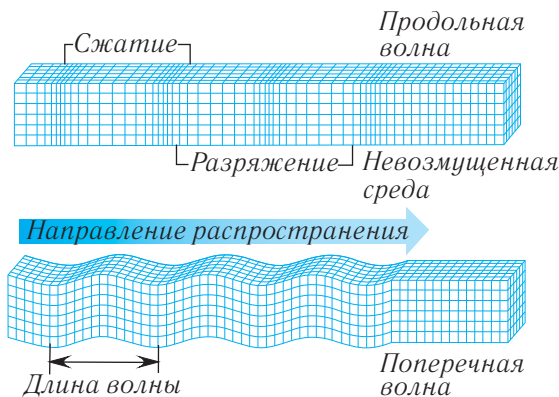


Рис. 39. Продольные и поперечные волны

Отметим, что скорость этих волн различна, так как для продольных волн их распространение связано с деформацией сжатия, а для поперечных — с деформацией сдвига (рис. 39). Упругие свойства тел в отношении этих видов деформации неодинаковы, и скорости распространения будут отличаться. Например, поперечные волны в стали распространяются со скоростью, модуль которой  $3300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а продольные —  $6100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



► Землетрясения являются источниками сейсмических волн, причем они могут быть как продольными, так и поперечными. Вследствие того что скорости продольных волн больше, чем скорости поперечных, по времени запаздывания поперечной волны можно определить расстояние до очага землетрясения.

Волны могут распространяться не только в среде, но и вдоль границы раздела двух сред. Такие волны получили название поверхностных волн. Примером данного типа волн служат хорошо знакомые всем волны на поверхности воды.



1. Что называется механической волной?
2. Какими физическими величинами характеризуются волны?
3. Какая волна называется продольной? Поперечной?
4. Что такое длина волны? Как связана длина волны и частота?
5. Какие волны могут распространяться в газах? Жидкостях? Твердых телах?



### Пример решения задачи

Определите длину  $\lambda$  волны, излучаемой источником колебаний с частотой  $\nu = 200$  Гц, если модуль скорости распространения волны  $v = 1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано:

$$\nu = 200 \text{ Гц}$$

$$v = 1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$\lambda$  — ?

Решение

Модуль скорости распространения волны можно вычислить по формуле:

$$v = \lambda \nu,$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $\nu$  — частота колебаний.

Откуда находим:

$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

$$\lambda = \frac{1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{200 \text{ с}^{-1}} = 7,25 \text{ м.}$$

Ответ:  $\lambda = 7,25$  м.

### Упражнение 5

1. Определите модуль скорости  $v$  распространения волны, если ее длина  $\lambda = 15$  м, а период колебаний  $T = 0,20$  с.
2. Из графика, приведенного на рисунке 40, определите:
  - а) период колебаний частиц;
  - б) амплитуду волны.

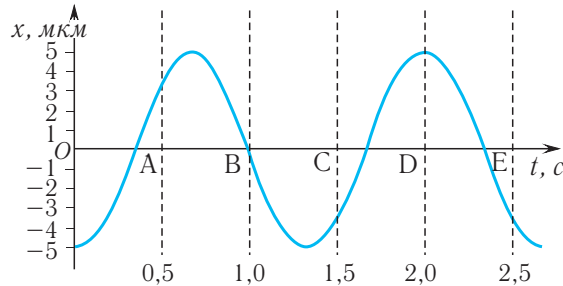


Рис. 40. График зависимости смещения частиц от времени в продольной волне

3. Неподвижный наблюдатель за промежуток времени  $\Delta t = 20$  с насчитал  $n = 8$  гребней волн, прошедших мимо него. Определите период  $T$  колебаний частиц.
4. Рыболов заметил, что за промежуток времени  $\Delta t = 20$  с поплавок совершил  $n_1 = 40$  колебаний на волнах. При этом расстояние между берегом и рыболовом  $l = 12$  м и на этом расстоянии укладывается  $n_2 = 20$  гребней волны. Определите модуль скорости  $v$  распространения волны.
5. Рыболовецкий траулер с помощью эхолота обнаружил косяк рыбы. На каком расстоянии  $l$  он находится, если промежуток времени между моментами отправления и приема звукового сигнала составляет  $\Delta t = 0,90$  с. Скорость звука в воде  $v = 1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
6. Геологи для определения глубины залегания породы производят взрыв. В результате отраженная от породы сейсмическая волна была зафиксирована через промежуток времени  $\tau = 20$  с после взрыва. Определите глубину  $h$  залегания породы, если скорость распространения сейсмической волны  $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



## § 6. Звуковые волны

Звуковые волны (звук) окружают человека с первых дней его жизни. Звуки позволяют людям общаться между собой, выражать эмоции, наслаждаться музыкальными шедеврами. Как это происходит? Каковы основные свойства звуковых волн?

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**. Человеческое ухо воспринимает в виде звуковых ощущений колебания от 16 до 20 000 Гц.

Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется **акустикой**.

Звуковые волны классифицируются по **частоте** следующим образом (рис. 41):

инфразвук ( $\nu < 16$  Гц); слышимый человеком звук ( $16 \text{ Гц} < \nu < 2,0 \cdot 10^4$  Гц); ультразвук ( $2,0 \cdot 10^4 \text{ Гц} < \nu < 1,0 \cdot 10^9$  Гц); гиперзвук ( $10^9 \text{ Гц} < \nu < 10^{12} \text{ Гц} \div 10^{13} \text{ Гц}$ ).

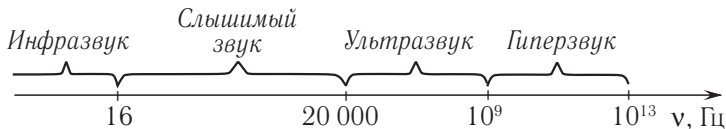


Рис. 41. Шкала звуковых волн

Звуки (звуковые волны) приносят человеку жизненно важную информацию — с их помощью мы общаемся, наслаждаемся музыкой, узнаем по голосу знакомых людей. Мир окружающих нас звуков разнообразен и сложен, однако мы достаточно легко ориентируемся в нем и можем безошибочно отличить пение птиц от шума городской улицы.

Что представляет собой звук и каким образом он возникает?

Рассмотрим в качестве источника звука барабан (рис. 42). Деформированная в результате удара мембрана барабана будет совершать колебания с некоторой частотой. В результате этого мембрана создает попеременно сжатие и разрежение в прилегающей к ней области воздуха, и образуется *продольная волна*, которая распространяется в воздухе с течением времени.

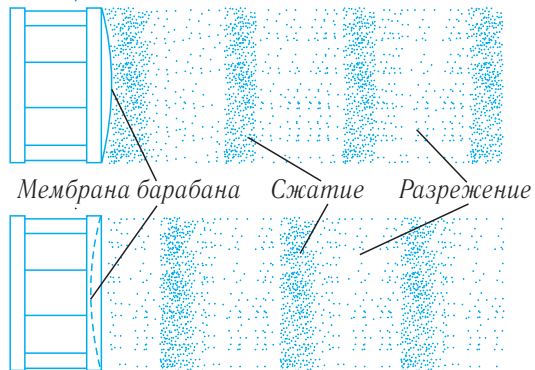


Рис. 42. Образование звуковой волны, создаваемой мембраной барабана

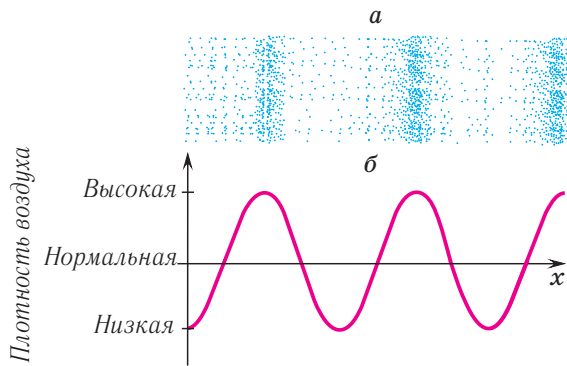


Рис. 43. Зависимость плотности воздуха от координаты в продольной волне

Наглядную информацию о звуковой волне в некоторый момент времени дает график зависимости плотности воздуха от координаты (рис. 43). Горбы на этом графике соответствуют сжатию, а впадины — разрежению воздуха. В процессе распространения звуковой волны с течением времени изменяются такие характеристики среды, как плотность и давление (см. рис. 43).

Для распространения звуковых волн необходима среда с упругими свойствами. Они хорошо распространяются в упругих средах, таких как газ, жидкость, металлы, стекло, кристаллические материалы. Однако звуковые волны быстро затухают в пористых материалах (поролон, войлок, вата). Такие материалы используют для звукоизоляции. Лучшим изолятором звука является вакуум (пустота), так как результаты экспериментов показывают, что звуковые волны в пустоте (вакууме) не распространяются.

Основными *физическими* характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*.

Понятие **интенсивность звука** характеризует энергию, переносимую звуковой волной.



Интенсивность звука, улавливаемого ухом человека, лежит в огромных пределах: от  $\sim 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (*порог слышимости*) до  $\sim 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (*порог болевого ощущения*). Человек может слышать и более интенсивные звуки, но при этом он будет испытывать боль. Звуки еще большей интенсивности могут привести к травме.

Минимальная интенсивность, при которой ухо человека перестает воспринимать звук, называется **порогом слышимости**. Наиболее чувствительно наше ухо к волнам частотой примерно 3 кГц, так как при этой частоте интенсивности порядка  $10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  уже достаточно, чтобы ухо восприняло звук. А для того чтобы услышать звук на частоте 50 Гц, его интенсивность должна быть примерно в 100 000 раз больше, т. е. быть



порядка  $10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Таким образом, для возникновения звуковых ощущений необходимо:

- наличие источника звука;
- наличие упругой среды между источником звука и ухом. При этом частота колебаний источника звука должна находиться в пределах 16—20 000 Гц;
- мощность звуковых волн должна быть достаточной для того, чтобы вызвать ощущение звука.

Еще одной основной характеристикой звука является его *спектр*. **Спектром** называется набор частот звуков различных колебаний, образующих данный звуковой сигнал. Спектр может быть *сплошным* или *дискретным*.

*Сплошной спектр* означает, что в данном наборе присутствуют волны, частоты которых заполняют весь заданный спектральный диапазон.

*Дискретный спектр* означает наличие конечного числа волн с определенными частотами и амплитудами, которые образуют рассматриваемый сигнал.

По типу спектра звуки разделяются на музыкальные тона и шумы.

**Музыкальный тон** создается периодическими колебаниями звучащего тела (камертон, струна) и представляет собой гармоническое колебание одной частоты. Спектр гармонического колебания представляет собой одну вертикальную линию (рис. 44).

**Шум** — совокупность множества разнообразных кратковременных звуков (хруст, шелест, шорох, стук и т. п.) — представляет собой наложение большого числа колебаний с близкими амплитудами, но различными частотами (имеет сплошной спектр) (рис. 45).

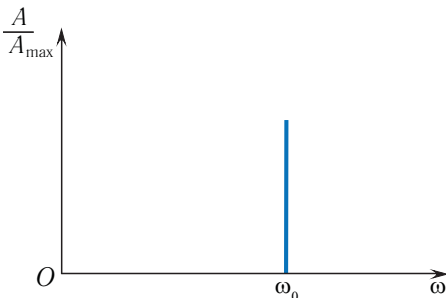


Рис. 44. Спектрограмма гармонического колебания

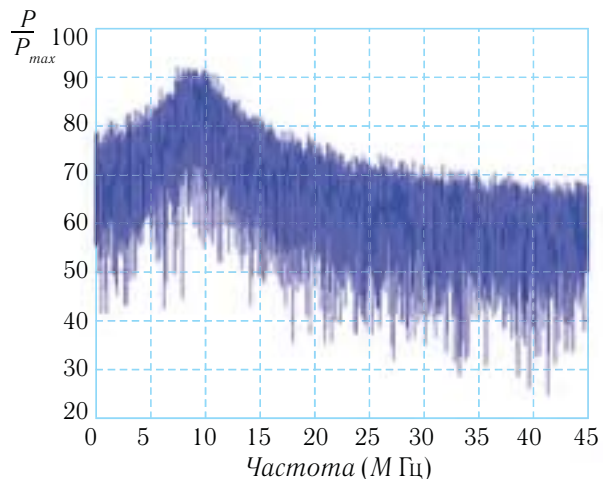


Рис. 45. Спектр шума



| Нота        | Частота, Гц |
|-------------|-------------|
| До          | 261,62      |
| До-диез     | 277,18      |
| Ре          | 293,67      |
| Ми-бемоль   | 311,13      |
| Ми          | 329,63      |
| Фа          | 349,23      |
| Фа-диез     | 369,99      |
| Си          | 392,00      |
| Си-диез     | 415,30      |
| Ля          | 440,00      |
| Соль-бемоль | 466,16      |
| Соль        | 493,88      |
| До          | 523,25      |

Рис. 46. Камертоны с частотами колебаний звуков первой октавы

Физическим характеристикам звука соответствуют его *субъективные* характеристики, связанные с его восприятием ухом человека. Это обусловлено тем, что восприятие звука — процесс не только физический, но и физиологический. Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания определенных частот и интенсивностей по-разному, в зависимости от чувствительности органов слуха.

Основными **физиологическими** характеристиками звука являются *громкость, высота и тембр*.

**Громкость** (степень слышимости звука) определяется как интенсивностью звука (амплитудой колебаний в звуковой волне), так и различной чувствительностью человеческого уха на разных частотах. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в диапазоне частот от 1000 до 5000 Гц.

**Высота звука** определяется частотой звуковых колебаний, обладающих наибольшей интенсивностью в спектре.

Для музыкального звука (созвучия) основной тон соответствует наименьшей частоте (рис. 46). Все *остальные тоны* называют *обертонами*. **Тембр** (оттенок звука) зависит от того, сколько обертонов присоединяются к *основному тону* и какова их интенсивность и частота.

По тембру мы легко отличаем звуки скрипки и рояля, органа и флейты, голоса людей (табл. 3) и т. д.

Таблица 3. Частота  $\nu$  колебаний различных источников звука

| Источник звука        | $\nu$ , Гц | Источник звука | $\nu$ , Гц |
|-----------------------|------------|----------------|------------|
| <i>Мужской голос:</i> | 80—500     | Орган          | 22—16 000  |
| бас                   | 80—350     | Флейта         | 260—15 000 |
| баритон               | 100—400    | Скрипка        | 260—15 000 |
| тенор                 | 130—500    | Арфа           | 30—15 000  |
| <i>Женский голос:</i> | 170—1400   | Барабан        | 90—14 000  |
| контральто            | 170—780    | Контрабас      | 60—8000    |
| меццо-сопрано         | 200—1000   | Виолончель     | 70—8000    |
| сопрано               | 250—1300   | Труба          | 60—6000    |
| колоратурное          | 260—1400   | Саксофон       | 80—8000    |
| сопрано               |            | Рояль          | 90—9000    |

Скорость звука зависит от упругих свойств, плотности и температуры среды. Чем больше упругие силы, тем быстрее передаются колебания частиц соседним частицам и тем быстрее распространяется волна. Поэтому скорость звука в газах меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях, как правило, меньше, чем в твердых телах (табл. 4).

Таблица 4. Скорость звука в различных средах

| Среда    | $t$ , °C | $v$ , $\frac{м}{с}$ |
|----------|----------|---------------------|
| Воздух   | 0        | 331                 |
| Воздух   | 20       | 343                 |
| Вода     | 20       | 1490                |
| Глицерин | 20       | 1920                |
| Ртуть    | 20       | 1450                |
| Лед      | 0        | 3280                |
| Сталь    | 20       | 5050                |
| Стекло   | 20       | 5300                |
| Чугун    | 20       | 3850                |

Скорость звука в идеальных газах с ростом температуры растет пропорционально  $\sqrt{T}$ , где  $T$  — абсолютная температура. В воздухе скорость

звука  $v = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  при температуре  $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$  и  $v = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ . В жидкостях и металлах скорость звука, как правило, уменьшается с ростом температуры (исключение — вода).

► На основе музыкальных тонов создана музыкальная азбука — ноты (до, ре, ми, фа, соль, ля, си), которые позволяют воспроизводить одну и ту же мелодию на различных музыкальных инструментах.

Интервал частот музыкальных звуков, на границах которого звуки по частоте отличаются в 2 раза, называют октавой (см. рис. 46).

Музыкальный звук (созвучие) — результат наложения нескольких одновременно звучащих музыкальных тонов. Основной тон называется также первой гармоникой. Обертоны называются гармоническими, если частоты обертонов кратны частоте основного тона. Таким образом, музыкальный звук имеет дискретный спектр (рис. 47).

Многие животные могут воспринимать звуки ультразвуковых частот. Например, собаки могут слышать звуки до 50 000 Гц, а летучие мыши — до 100 000 Гц. Инфразвук, распространяясь в воде на сотни километров, помогает китам и многим другим морским животным ориентироваться в толще воды.

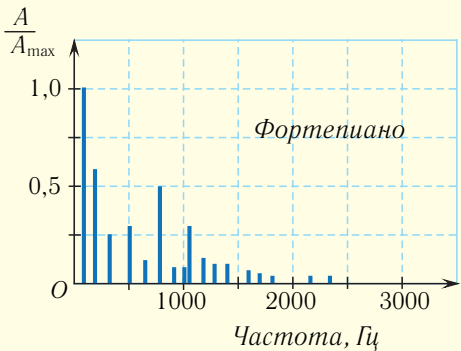
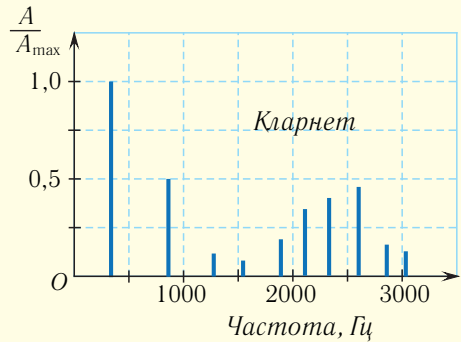


Рис. 47. Спектрограммы двух музыкальных инструментов для одинаковых мелодий



1. Какова природа звука и каковы его источники?
2. Как классифицируются звуки?
3. Какой диапазон звуковых частот воспринимает ухо человека?
4. Чему равна скорость распространения звука в воздухе?
5. Как зависит высота звука от частоты?
6. В каких пределах находятся частоты инфразвуковых и ультразвуковых волн?



7. Полет каких птиц и насекомых мы слышим, а каких нет? Используя данные таблицы 5, определите, у какого насекомого самый высокий звук.

8. Как по звукам, издаваемым мухой и комаром, определить, кто из них в полете чаще машет крыльями?

9. Почему бабочки летают бесшумно?

10. Назовите основные физические и физиологические характеристики звука.

11. Что такое порог слышимости? Болевой порог?

12. На какой частоте человеческое ухо обладает наилучшей чувствительностью?

Таблица 5. Частота колебаний крыльев насекомых и птиц в полете, Гц

|                  |         |
|------------------|---------|
| Аист             | 2       |
| Ворона           | 3—4     |
| Бабочка          | до 9    |
| Воробей          | до 13   |
| Стрекоза         | 38—100  |
| Оса              | 100—110 |
| Шмель            | 180—240 |
| Муха (комнатная) | 190—330 |
| Пчела (с ношей)  | 200—250 |
| Комар            | 300—600 |



### Пример решения задачи

Стальные детали проверяются ультразвуковым дефектоскопом (рис. 48). Определите толщину  $d$  детали и глубину  $h$  расположения дефекта, если после излучения ультразвукового сигнала получены два отраженных сигнала через промежутки времени  $\tau_1 = 0,15$  мс и  $\tau_2 = 0,10$  мс. Модуль скорости распространения ультразвука в детали  $v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

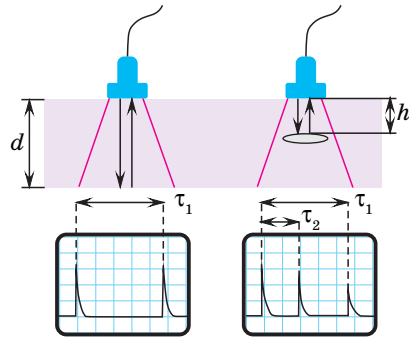


Рис. 48

Дано:

$$\tau_1 = 0,15 \text{ мс} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$\tau_2 = 0,10 \text{ мс} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$d - ?$   $h - ?$

Решение

Первый отраженный сигнал прошел путь от источника ультразвука до стенки детали и обратно, равный  $2d$ .

Следовательно, толщина детали:

$$d = \frac{v\tau_1}{2}, \quad d = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,39 \text{ м.}$$

Глубину нахождения дефекта находим аналогично:

$$h = \frac{v\tau_2}{2}, \quad h = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,26 \text{ м.}$$

Ответ:  $d = 0,39 \text{ м}$ ,  $h = 0,26 \text{ м}$ .

### Упражнение 6

1. Расстояние между двумя железнодорожными станциями  $l = 10 \text{ км}$ . Сколько времени распространяется звук от одной станции к другой по воздуху ( $\Delta t_1$ ) и по стальным рельсам ( $\Delta t_2$ )? Температура воздуха  $t = 0,0 \text{ }^\circ\text{С}$ .
2. Дельфины испускают ультразвуковые импульсы частотой  $\nu = 250 \text{ кГц}$ . Определите длину волны такого ультразвука в воде ( $\lambda_1$ ) и в воздухе ( $\lambda_2$ ) при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ .
3. Определите расстояние  $l$  до преграды, если мальчик слышит эхо через промежуток времени  $\tau = 2,0 \text{ с}$ . Скорость звука в воздухе  $v = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
4. Определите глубину моря  $H$  в данном месте, если ультразвуковой импульс возвратился на судно через промежуток времени  $\Delta t = 0,20 \text{ с}$  после послышки. Модуль скорости ультразвука в морской воде  $v = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
5. Турист подошел к горному озеру. Он крикнул и услышал звук эха, отраженного от скалы, находящейся на противоположном берегу. Определите расстояние  $l$  до противоположного берега озера, если турист услышал эхо через промежуток времени  $\tau = 1,5 \text{ с}$ .
6. Мальчик видит, как тяжелый камень упал на бетонный тротуар. Некоторое время спустя он слышит два звука от удара камня: один пришел по бетону, а другой распространялся по воздуху. Промежуток времени между ними  $\Delta t = 1,2 \text{ с}$ . На каком расстоянии  $l$  от человека упал камень, если модуль скорости звука в бетоне  $v_6 = 4500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?
7. Стальную деталь проверяют ультразвуковым дефектоскопом. Определите глубину  $h$  нахождения дефекта в детали и ее толщину  $d$ , если первый отраженный сигнал получен через промежуток времени  $\tau_1 = 8,0 \text{ мкс}$ , а второй — через  $\tau_2 = 20 \text{ мкс}$ . Определите толщину детали, если скорость звука в стали составляет  $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 1

**Периодическим** называется движение, при котором характеризующие его физические величины через равные промежутки времени принимают одинаковые значения.

Уравнение гармонических колебаний:

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0.$$

**Колебательным** называется движение (процесс), при котором любая характеризующая это движение (процесс) физическая величина поочередно изменяется то в одну, то в другую сторону от ее значения в положении устойчивого равновесия.

Колебания, при которых зависимость координаты (смещения) тела от времени определяется соотношениями

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ или } x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

называются **гармоническими**, а система, совершающая такие колебания, — **гармонической колебательной системой**. Зависимость координаты тела от времени  $x(t)$  называется **кинематическим законом движения**.

Колебания тела являются **гармоническими**, если они происходят под действием возвращающей силы, проекция которой прямо пропорциональна смещению тела из положения равновесия и направленной к положению равновесия колеблющегося тела, т. е.  $F_x = -kx$ .

**Амплитуда колебаний**  $A$  ( $A > 0$ ) — максимальное смещение  $x_{\max}$  тела или системы тел из положения равновесия.

**Период колебания**  $T$  — время одного колебания:

$$T = \frac{\Delta t}{N}.$$

**Частота колебаний**  $\nu$  — число колебаний, совершаемых в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T}.$$

**Циклическая частота**  $\omega$  — число колебаний за промежуток времени  $\Delta t = 2\pi$  секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$



Колебательная система, состоящая из тела массой  $m$  и невесомой пружины жесткостью  $k$ , соединяющей тело и опору, называется **пружинным маятником**. Его период колебаний:

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

**Математическим маятником** называется тело массой  $m$ , подвешенное на невесомой нерастяжимой нити длиной  $l$ , находящееся в поле силы тяжести. Период малых колебаний математического маятника определяется по **формуле Гюйгенса**:

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

**Собственные (свободные) колебания** — это колебания, происходящие в отсутствие внешних воздействий на систему. При отсутствии трения они происходят со строго определенной частотой, называемой **частотой собственных колебаний** системы.

**Затухающими** называются колебания, энергия которых уменьшается с течением времени.

**Вынужденными** называются колебания системы, вызываемые действием на нее периодических внешних сил.

**Резонанс** — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты  $\omega$ , действующей на колебательную систему внешней силы, к собственной частоте  $\omega_0$  системы ( $\omega \rightarrow \omega_0$ ).

**Механической волной** называется процесс распространения колебаний в упругой среде, который сопровождается передачей энергии от одной точки среды к другой.

**Длина волны** — расстояние, пройденное волной в среде за промежуток времени, равный периоду колебаний частиц:

$$\lambda = vT.$$

**Скорость распространения волны** — это скорость распространения колебаний в упругой среде. Модуль скорости распространения волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$



Волна называется **продольной**, если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волн.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**.

Основными **физическими** характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*. Основными **физиологическими** характеристиками звука являются *громкость*, *высота* и *тембр*.

#### Единицы основных величин механических колебаний и волн

| Наименование                   | Обозначение | Единица  | Выражение через основные единицы в СИ |
|--------------------------------|-------------|--|---------------------------------------|
| Частота                        | $\nu$       | Герц (Гц)  | $\text{с}^{-1}$                       |
| Период                         | $T$         | Секунда (с)  | с                                     |
| Циклическая (круговая) частота | $\omega$    | РадIAN в секунду<br>$\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$ | $\text{с}^{-1}$                       |
| Амплитуда                      | $A$         | Метр (м)   | м                                     |
| Длина волны                    | $\lambda$   | Метр (м)   | м                                     |
| Модуль скорости волны          | $v$         | $\frac{\text{м}}{\text{с}}$                                    | $\frac{\text{м}}{\text{с}}$           |

#### Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Г. Галилей, Х. Гюйгенс).

2. Подготовьте интерактивные презентации на темы: «Применение ультразвуковых волн в медицине, технике, бытовых приборах», «Шум и его воздействие на человека», «Инфразвук — применение и борьба с ним».

3. Если наблюдать за уткой, плывущей в пруду (рис. 49, а), или с высоты за катером, плывущим по поверхности озера (рис. 49, б), то



Рис. 49



Рис. 50



Рис. 51

можно заметить волны, расходящиеся под некоторым углом к направлению движения утки (катера). Объясните это явление и определите, как зависит угол расхождения волн на воде от скорости утки (катера).

4. Частично наполните водой бокал, смочите водой палец и аккуратно водите им по краю бокала (рис. 50). Через некоторое время бокал начнет звенеть. Меняя уровень воды в бокале, можно добиться изменения высоты звука. Объясните данное явление и подберите уровни воды так, чтобы звучание бокала соответствовало музыкальным нотам. Можно ли сыграть на таких бокалах простейшую мелодию?

5. Если соединить доньшки двух пластиковых стаканов (или консервных банок) натянутой нитью (рис. 51), то образуется так называемый «струнный телефон». Изучите зависимость интенсивности звука в «струнном телефоне» от длины нити и силы ее натяжения.





## Глава 2

# Электромагнитные колебания и волны

Правильно... рассматривать сходство в вещах, далеко отстоящих друг от друга.

*Аристотель*

### § 7. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Формула Томсона. Превращения энергии в колебательном контуре

- Колебательные процессы возможны не только в механических системах. При определенных условиях и в электрических цепях возникают колебания силы тока и напряжения и других электромагнитных величин. Какие это условия? Как вычислить период электромагнитных колебаний? Какие аналогии существуют между колебаниями различной природы?



Электрической емкостью  $C$  конденсатора называют физическую величину, характеризующую его способность накапливать электрические заряды и равную отношению заряда  $q$  конденсатора к напряжению  $U$  между его обкладками:  $C = \frac{q}{U}$ . Единицей электрической емкости в СИ является 1 фарад (1 Ф).

Энергия электростатического поля конденсатора:  $W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$ .

Энергия магнитного поля катушки с током:  $W_L = \frac{LI^2}{2}$ ,  $L$  — индуктивность катушки,  $I$  — сила тока в цепи. Единицей индуктивности в СИ является 1 генри (1 Гн).

Возникновение электродвижущей силы (ЭДС) в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, проходящего сквозь него, называется явлением электромагнитной индукции.

Под явлением самоиндукции понимают возникновение в замкнутом проводящем контуре ЭДС индукции, создаваемой вследствие изменения силы тока в самом контуре.

Правило Ленца: возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, стремится компенсировать изменение магнитного потока, вызвавшее данный ток.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора емкостью  $C$  и катушки индуктивностью  $L$  (рис. 52, *а*), называемую **колебательным контуром** или  **$LC$ -контуром**. Если электрическое сопротивление контура можно считать равным нулю ( $R = 0$ ), то его называют **идеальным**. Идеальный колебательный контур является упрощенной моделью реального колебательного контура.

Подключив (при помощи ключа  $K$ ) источник тока, зарядим конденсатор до напряжения  $U_0$ , сообщив ему заряд  $q_0$  (рис. 52, *б*). Следовательно, в начальный момент времени ( $t = 0$ ) конденсатор заряжен так, что на его обкладке 1 находится заряд  $+q_0$ , а на обкладке 2 — заряд  $-q_0$ , при этом  $q_0 = CU_0$ . Электрическое поле, созданное зарядами обкладок конденсатора, обладает энергией  $W_C = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}$ .

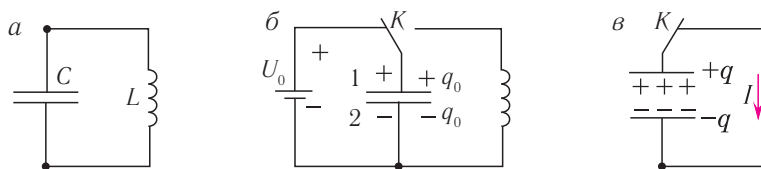


Рис. 52. *а* — колебательный контур; *б* — зарядка конденсатора от источника; *в* — прохождение тока по контуру

Рассмотрим процесс разрядки конденсатора в колебательном контуре. После соединения заряженного конденсатора с катушкой (при помощи ключа  $K$ ) (рис. 52, *в*) он начнет разряжаться, так как под действием электрического поля, создаваемого зарядами на обкладках конденсатора, свободные электроны будут перемещаться по цепи от отрицательно заряженной обкладки к положительно заряженной. На рис. 52, *в* стрелкой показано начальное направление тока в электрической цепи.

Таким образом, в контуре появится нарастающий по модулю электрический ток, сила  $I(t)$  которого будет изменяться с течением времени (рис. 53, *а*). Но мгновенная разрядка конденсатора невозможна, вследствие явления самоиндукции. Действительно, в катушке индуктивности возникнет изменяющийся во времени магнитный поток, который вызовет появление ЭДС самоиндукции. Согласно правилу Ленца ЭДС самоиндукции стремится противодействовать вызвавшей ее причине, т. е.



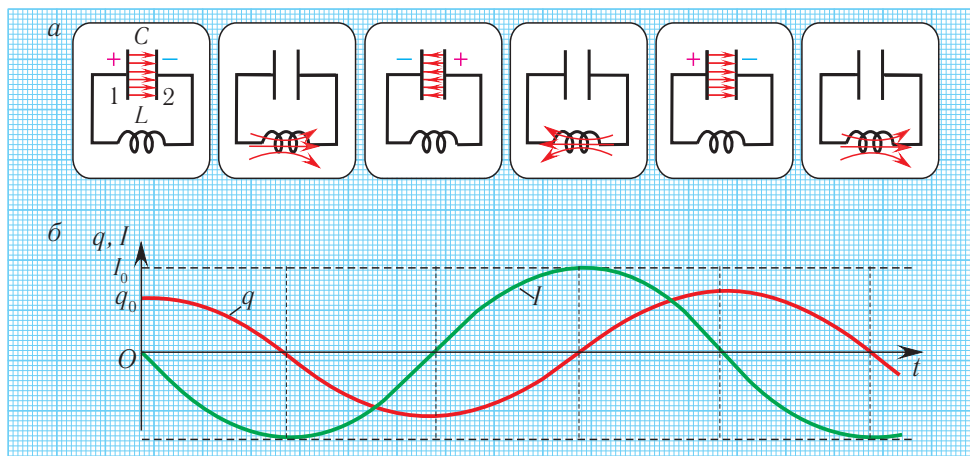


Рис. 53. *a* — электромагнитные колебания в идеальном  $LC$ -контуре;  
*б* — зависимости заряда конденсатора  $q$ , силы тока  $I$  в катушке от времени

увеличению по модулю силы тока. Вследствие этого, модуль силы тока в колебательном контуре будет в течение некоторого промежутка времени плавно возрастать от нуля до максимального значения  $I_0$ , определяемого индуктивностью катушки и электроемкостью конденсатора (рис. 53, б).

При разрядке конденсатора энергия его электрического поля превращается в энергию магнитного поля катушки с током. Согласно закону сохранения энергии суммарная энергия идеального колебательного контура остается постоянной с течением времени. Следовательно, уменьшение энергии электрического поля конденсатора равно увеличению энергии магнитного поля катушки:

$$\frac{q_0^2}{2C} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2},$$

где  $q(t)$  — мгновенное значение заряда конденсатора и  $I(t)$  — сила тока в катушке в некоторый момент времени  $t$  после начала разрядки конденсатора.

В момент полной разрядки конденсатора ( $q = 0$ ) сила тока в катушке  $I(t)$  достигнет своего максимального по модулю значения  $I_0$  (см. рис. 53, б). В соответствии с законом сохранения энергии запасенная в конденсаторе энергия электрического поля перейдет в энергию магнитного поля, запасенную в этот момент в катушке:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

После разрядки конденсатора сила тока в катушке начинает убывать по модулю. Это также происходит не мгновенно, поскольку вновь возникающая ЭДС самоиндукции согласно правилу Ленца создает индукционный ток. Он имеет такое же направление, как и уменьшающийся по модулю ток в цепи, и поэтому «поддерживает» его.

В результате, к моменту исчезновения тока заряд конденсатора достигнет максимального значения  $q_0$ . При этом его обкладка, первоначально заряженная положительно, будет заряжена отрицательно. Далее процесс повторится, отличаясь лишь тем, что электрический ток в контуре будет проходить в противоположном направлении (см. рис. 53, а).

Таким образом, в идеальном  $LC$ -контуре будут происходить периодические изменения значений силы тока и напряжения, причем полная энергия контура будет оставаться постоянной. В этом случае говорят, что в контуре возникли *свободные электромагнитные колебания*.

**Свободные электромагнитные колебания** в  $LC$ -контуре — это периодические изменения заряда на обкладках конденсатора, силы тока и напряжения в контуре, происходящие без пополнения энергии от внешних источников и без потерь энергии на тепловыделение и излучение.

Таким образом, существование свободных электромагнитных колебаний в контуре обусловлено перезарядкой конденсатора, вызванной возникновением ЭДС самоиндукции в катушке. Заметим, что заряд  $q(t)$  конденсатора и сила тока  $I(t)$  в катушке достигают своих максимальных значений  $q_0$  и  $I_0$  в различные моменты времени (см. рис. 53, а, б) (со сдвигом на  $\frac{T}{4}$ ).

Наименьший промежуток времени, в течение которого  $LC$ -контур возвращается в исходное состояние (к начальным значениям заряда на каждой из обкладок), называется **периодом** свободных (собственных) электромагнитных колебаний в контуре.

Получим формулу для периода свободных электромагнитных колебаний в контуре, используя закон сохранения энергии по аналогии с механическими колебаниями. Поскольку полная энергия идеального  $LC$ -контура, равная сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки, сохраняется, то в любой момент времени справедливо равенство:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.} \quad (1)$$

Процессы, происходящие в колебательном контуре, аналогичны колебаниям пружинного маятника. Для полной механической энергии пружинного маятника в любой момент времени:

$$W_{\text{мех}} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2}, \quad (2)$$

где  $k$  — жесткость пружины,  $m$  — масса груза,  $x$  — проекция смещения тела от положения равновесия,  $v_x$  — проекция его скорости на ось  $Ox$ .

Проанализируем соотношения (1) и (2). Видно, что энергия электрического поля конденсатора  $W_C = \frac{q^2(t)}{2C}$  является аналогом потенциальной энергии упругой деформации пружины  $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ . Соответственно, энергия магнитного поля катушки  $W_L = \frac{LI^2(t)}{2}$ , которая обусловлена упорядоченным движением зарядов, является аналогом кинетической энергии груза  $W_{\text{к}} = \frac{mv_x^2}{2}$ .

Следовательно, аналогом координаты  $x(t)$  пружинного маятника при колебаниях в электрическом контуре является заряд конденсатора  $q(t)$ . Тогда, соответственно, аналогом проекции скорости груза  $v_x(t)$  будет сила тока  $I(t)$  в колебательном контуре, поскольку сила тока характеризует скорость изменения заряда конденсатора со временем.

Следуя проведенной аналогии, заменим в формуле для периода колебаний пружинного маятника  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  жесткость  $k$  на  $\frac{1}{C}$  и массу  $m$  на индуктивность  $L$ . Тогда для периода свободных колебаний в  $LC$ -контуре получим формулу:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3)$$

которая называется **формулой Томсона**.

Исходя из сказанного, сведем рассмотренные аналогии между физическими величинами при электромагнитных и механических колебаниях в таблицу 6.

Для наблюдения и исследования электромагнитных колебаний применяют электронный осциллограф, на экране которого наблюдают осциллограмму колебаний  $U(t)$  (рис. 54).

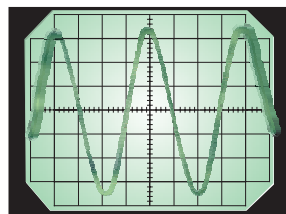


Рис. 54. Осциллограмма гармонических электромагнитных колебаний

Таблица 6. Сопоставление физических величин, характеризующих механические и электромагнитные колебания

| Механические колебания<br>пружинного маятника   | Электромагнитные колебания<br>в идеальном колебательном контуре   |
|---|---|
| $m$ (масса тела)  | $L$ (индуктивность катушки)   |
| $k$ (жесткость пружины)   | $\frac{1}{C}$ (величина, обратная емкости)  |
| $x(t)$ (координата тела)  | $q(t)$ (заряд конденсатора)   |
| $v_x(t)$ (проекция скорости тела)   | $I(t)$ (сила тока)  |
| $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ (потенциальная энергия<br>упругой деформации пружины)                               | $W_c = \frac{q^2}{2C}$ (энергия электрического<br>поля конденсатора)  |
| $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ (кинетическая энергия<br>груза)   | $W_L = \frac{LI^2}{2}$ (энергия магнитного поля<br>катушки)   |
| $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (период колебаний)<br>$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (циклическая частота<br>колебаний) | $T = 2\pi\sqrt{LC}$ (период колебаний)<br>$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (циклическая частота<br>колебаний) |

Зависимость заряда конденсатора от времени имеет такой же вид, как и зависимость координаты тела, совершающего гармонические колебания, от времени:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$



Также по гармоническому закону изменяются сила тока (но с другой начальной фазой) в цепи и напряжение на конденсаторе.

Для определения начальной фазы  $\varphi_0$  и максимального заряда  $q_0$  необходимо знать заряд конденсатора и силу тока в катушке в начальный момент времени ( $t = 0$ ).

Отметим, что колебательный контур, в котором происходит *только* обмен энергией между конденсатором и катушкой, называется *замкнутым*.

Полная энергия идеального колебательного контура ( $R = 0$ ) с течением времени сохраняется, поскольку в нем при прохождении тока теплота не выделяется. Реальный колебательный контур всегда имеет некоторое электрическое сопротивление  $R$ , которое обусловлено сопротивлением катушки и соединительных проводов. Это приводит к тому, что электромагнитные колебания в реальном контуре с течением времени затухают, тогда как в идеальном контуре они считаются происходящими сколь угодно долго.

Таким образом, механическим аналогом идеального колебательного контура является пружинный маятник без учета трения, а механическим аналогом реального колебательного контура — пружинный маятник с учетом трения.

Колебательный  $LC$ -контур широко используется в современных микросхемах для средств электроники и электротехнического оборудования.



1. Из каких элементов состоит идеальный колебательный контур?
2. Какие электромагнитные колебания в контуре называются свободными?
3. От каких физических величин зависит период свободных колебаний в идеальном колебательном контуре?
4. По какому закону изменяются зависимости заряда конденсатора и силы тока в катушке идеального колебательного контура с течением времени?
5. Почему в контуре, состоящем из конденсатора и резистора, не могут возникнуть электромагнитные колебания?
6. В колебательном контуре изменили начальное значение заряда конденсатора. Какие величины, характеризующие электромагнитные колебания в контуре, изменятся, а какие останутся прежними?
7. Как распределена запасенная в идеальном колебательном контуре энергия между электрическим полем конденсатора и магнитным полем катушки в идеальном колебательном контуре в моменты времени  $\frac{T}{4}$ ;  $\frac{T}{2}$ ;  $\frac{3T}{4}$ ;  $T$  после начала разрядки конденсатора?
8. Зависит ли период свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре от запасенной в нем энергии?

### Пример решения задачи

Идеальный колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C = 400$  пФ и катушки индуктивностью  $L = 10$  мГн. Определите максимальное значение силы тока  $I_0$  в контуре, если максимальное значение напряжения на конденсаторе  $U_0 = 500$  В.



Дано:

$$C = 400 \text{ пФ} = 4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$L = 10 \text{ мГн} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$U_0 = 500 \text{ В}$$

$$I_0 = ?$$

Решение

Максимальная энергия электрического поля конденсатора:

$$W_C = \frac{CU_0^2}{2},$$

а максимальная энергия магнитного поля катушки:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Так как контур идеальный ( $R = 0$ ), то его полная энергия сохраняется с течением времени. По закону сохранения энергии:  $W_C = W_L$ , т. е.

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Откуда

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}; \quad I_0 = 500 \text{ В} \sqrt{\frac{4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}}} = 0,10 \text{ А}.$$

Ответ:  $I_0 = 0,10 \text{ А}$ .



### Упражнение 7

1. Определите период  $T$  свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью,  $C = 15 \text{ мкФ}$  и катушки индуктивностью  $L = 2,5 \text{ мГн}$ .
2. Определите период колебаний колебательного контура, представленного на рисунке 55.
3. Конденсатор емкостью  $C = 1,2 \text{ мкФ}$  соединен с катушкой индуктивностью  $L = 16 \text{ мкГн}$ . Определите частоту  $\nu$  свободных электромагнитных колебаний в контуре.
4. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре, если индуктивность  $L$  катушки контура увеличить (уменьшить) в  $n = 16$  раз при неизменной емкости конденсатора?
5. Определите напряжение  $U$  на конденсаторе емкостью  $C$  в момент времени: а)  $t_1 = \frac{T}{8}$ ; б)  $t_2 = \frac{5T}{8}$ , если

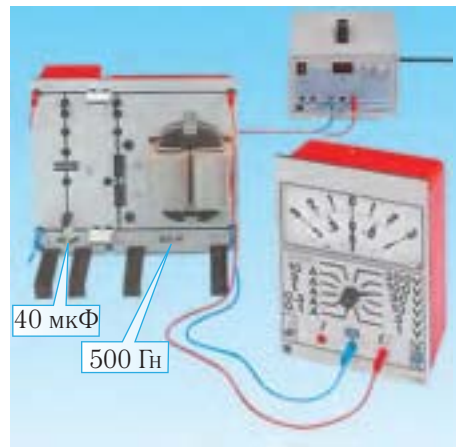


Рис. 55. Установка для определения периода колебаний идеального колебательного контура

в начальный момент времени  $t_0 = 0$  напряжение на конденсаторе равно  $U_0 = 48$  В, а сила тока в катушке  $I_0 = 0$ ,  $T$  — период колебаний в контуре.

6. Входной контур радиоприемника содержит катушку индуктивностью  $L = 0,32$  мГн. В каких пределах должна изменяться емкость  $C$  конденсатора контура, чтобы радиоприемник мог принимать сигналы радиостанции, работающей в диапазоне частот от  $\nu_1 = 8,0$  МГц до  $\nu_2 = 24$  МГц?
7. Имеются два колебательных контура. Один содержит конденсатор емкостью  $C_1 = 240$  мФ и катушку индуктивностью  $L_1 = 10,0$  мГн, второй —  $C_2 = 260$  мФ и  $L_2 = 6,00$  мГн. Настроены ли эти контуры в резонанс? Во сколько раз  $k$  необходимо изменить емкость  $C_2$  или индуктивность  $L_2$ , чтобы настроить эти контуры в резонанс?



## § 8. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный электрический ток

- Если в электрическую цепь включить источник переменной ЭДС (аналог переменной силы в механической колебательной системе), то в цепи могут возникнуть вынужденные электромагнитные колебания, не затухающие с течением времени. Как получить такие колебания? Где и каким образом они используются?



Магнитный поток  $\Phi$  однородного поля через плоскую поверхность равен произведению модуля индукции  $B$  магнитного поля на площадь поверхности  $S$  и косинус угла  $\alpha$  между индукцией  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

Закон электромагнитной индукции: ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения пронизывающего его магнитного потока, взятой с противоположным знаком  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Незатухающие электромагнитные колебания находят широкое применение в науке и технике. Для получения незатухающих колебаний необходимо компенсировать потери энергии в контуре. Для механических колебаний это достигается действием периодической внешней силы, в результате чего в системе возникают вынужденные колебания. Аналогично этому **вынужденные электромагнитные колебания** в колебательном контуре происходят под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС или внешнего изменяющегося напряжения.

Вынужденные электромагнитные колебания в электрической цепи называются *переменным электрическим током*.

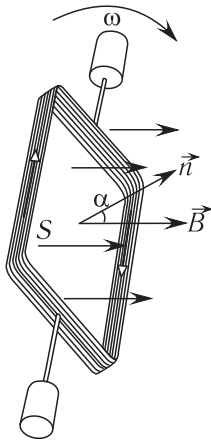


Рис. 56. Вращение проводящей рамки в магнитном поле

**Ток**, сила и направление которого периодически меняются, называется **переменным**.

Основная часть электроэнергии в мире в настоящее время вырабатывается *генераторами переменного тока*, создающими напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону. Такая же функциональная зависимость силы тока от времени позволяет, по сравнению с другими зависимостями, наиболее просто и экономично осуществлять передачу, распределение и использование электрической энергии.

Электротехническое устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в энергию переменного электрического тока, называется *генератором переменного тока*.

Принцип действия индукционного генератора переменного тока основан на **явлении электромагнитной индукции**.

Пусть проводящая рамка площадью  $S$  вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, расположенной в ее плоскости перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля индукцией  $\vec{B}$  (рис. 56).

При равномерном вращении рамки угол  $\alpha$  между направлениями индукции магнитного поля и нормали к плоскости рамки меняется с течением времени по линейному закону:  $\alpha = \omega t$ .



В этом случае ЭДС индукции изменяется по синусоидальному закону (рис. 57):

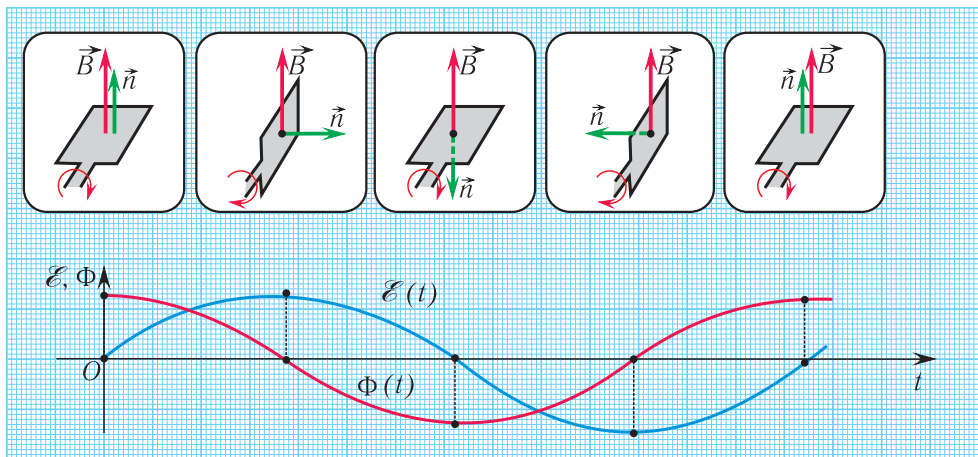


Рис. 57. Возникновение ЭДС индукции при вращении проводящей рамки в магнитном поле



$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_0 = BS\omega$  — амплитудное (максимальное) значение ЭДС.

При подключении к выводам рамки устройства, потребляющего энергию (например, нагрузки с достаточно большим сопротивлением  $R \gg r$  ( $r$  — сопротивление рамки)), по нему будет проходить переменный электрический ток (рис. 58).

По закону Ома для полной цепи мгновенная сила тока прямо пропорциональна ЭДС (см. § 26 Физика, 10):

$$I = \mathcal{E} \frac{1}{R} = \frac{BS\omega}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $I_0 = \frac{BS\omega}{R}$  — максимальное значение силы тока.

Анализируя выражения (1) и (2), можем сделать вывод, что в цепи, содержащей, кроме рамки, только сопротивление  $R$ , колебания напряжения и силы тока совпадают по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов.

В общем случае (например, при наличии в цепи конденсатора и (или) катушки индуктивности) колебания силы тока в цепи и напряжения на конденсаторе или катушке индуктивности будут происходить с одинаковой частотой  $\nu$ , но не будут совпадать по фазе:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi) = U_0 \sin(2\pi t + \Delta\varphi),$$

где  $U_0$  — амплитудное значение напряжения на конденсаторе или катушке,  $\Delta\varphi$  — разность (сдвиг) фаз колебаний силы тока и напряжения.

Подчеркнем, что ток в цепи проходит в одном направлении в течение полуоборота рамки, а затем меняет направление на противоположное, которое также остается неизменным в течение следующего полуоборота.

Основными частями индукционного генератора переменного тока являются (рис. 59):



Рис. 58. Вращение проводящей рамки в магнитном поле. Генерация переменного тока

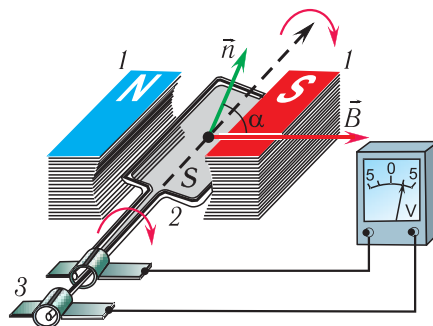


Рис. 59. Части индукционного генератора переменного тока:  
1 — индуктор, 2 — якорь,  
3 — коллектор со щетками

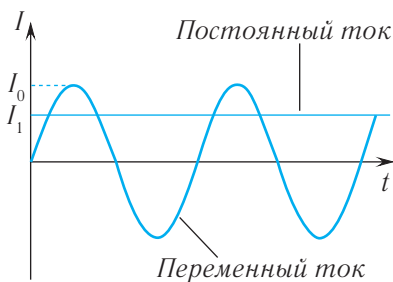


Рис. 60. График зависимости силы тока  $I$  от времени в колебательном контуре и действующее значение переменного тока



Мощные генераторы вырабатывают напряжение 15—20 кВ и обладают КПД 97—98 %.

Рассмотрим новые закономерности, возникающие при подключении электрических цепей к источнику переменного тока.

Пусть источник тока создает переменное гармонически изменяющееся напряжение:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t. \quad (3)$$

Согласно закону Ома сила тока на участке цепи, содержащем резистор сопротивлением  $R$  (рис. 60), подключенный к этому источнику, изменяется со временем также по синусоидальному закону:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

где  $I_0 = \frac{U_0}{R}$ .

Максимальные величины напряжения  $U_0$  и силы тока  $I_0$  называются, соответственно, **амплитудными значениями напряжения и силы тока**. Значения напряжения  $U(t)$  и силы тока  $I(t)$  в момент времени  $t$  называются **мгновенными**.

Зная мгновенные значения  $U(t)$  и  $I(t)$ , можно вычислить мгновенную мощность переменного тока  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ , которая, в отличие от цепей постоянного тока, изменяется с течением времени.

С учетом (3) и (4) перепишем выражение для мгновенной мощности на резисторе сопротивлением  $R$  в цепи переменного тока в виде:

$$P(t) = U(t)I(t) = I^2(t)R = I_0^2 R \sin^2(\omega t).$$

**индуктор** — постоянный магнит или электромагнит, который создает магнитное поле;

**якорь** — вращающаяся часть цепи (обмотка), в которой индуцируется переменная ЭДС;

**коллектор** — контактные кольца и скользящие по ним контактные пластинки (щетки) — устройство, посредством которого ток снимается или подводится к вращающимся частям.

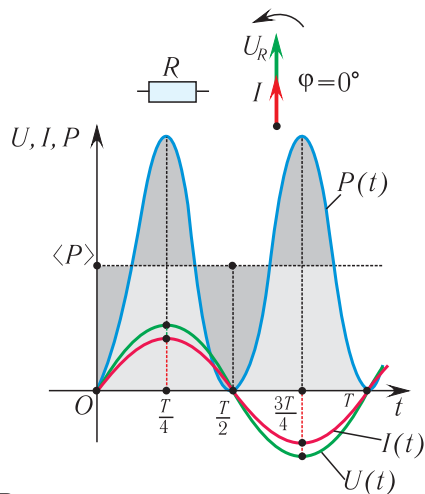
Неподвижная часть генератора называется *статором*, а подвижная — *ротором*.

Рис. 61. Зависимость  $U$ ,  $I$  и  $P$  от времени в электрической цепи с сопротивлением  $R$

Поскольку мгновенная мощность меняется со временем, то использовать эту величину на практике в качестве характеристики длительно протекающих процессов невозможно.

Поэтому среднее значение мощности переменного электрического тока за длительный (по сравнению с периодом колебаний) промежуток времени можно найти по формуле (рис. 61):

$$\langle P \rangle = \frac{U_0 I_0}{2} = \frac{I_0^2 R}{2}.$$



► В цепях переменного тока большинство электроизмерительных приборов измеряют действующие значения тока и напряжения, поскольку именно они имеют практическое значение. Действующим значением напряжения в Беларуси в бытовых сетях переменного тока является  $U_d = 220$  В, при этом амплитудное значение используемого напряжения  $U_0 = \sqrt{2}U_d = 311$  В.

Для увеличения амплитудного значения ЭДС (см. формулу (1)) электромагнитной индукции индукционного генератора переменного тока нужно (при фиксированной частоте вращения якоря) либо увеличивать индукцию магнитного поля, пронизывающего обмотки якоря, либо увеличивать число витков его обмоток. Для увеличения индукции магнитного поля  $\vec{B}$  обмотку индуктора размещают в стальном сердечнике, а зазор между сердечниками якоря и индуктора делают как можно меньшим.



1. На каком явлении основана работа индукционного генератора переменного тока?
2. Почему в рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, возбуждается ЭДС, от каких величин она зависит?
3. Какой ток называют переменным? Что такое период, частота, фаза переменного тока?
4. Из каких основных частей состоит индукционный генератор переменного тока? Объясните назначение каждой части генератора.
5. Для чего применяется генератор переменного тока?
6. Какое значение переменного тока называют мгновенным? Амплитудным?

### Пример решения задачи

В начальный момент времени напряжение на клеммах генератора переменного тока равно амплитудному  $U_0 = 310$  В. Частота промышленного переменного тока  $\nu = 50,0$  Гц. Найдите напряжение  $U_1$  на клеммах генератора через промежуток времени  $\Delta t = 10$  мс.

Дано:

$$U_0 = 310 \text{ В}$$

$$\nu = 50,0 \text{ Гц}$$

$$\Delta t = 10 \text{ мс}$$

$$U_1 = ?$$

Решение

Напряжение на клеммах генератора изменяется по закону:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t.$$

Циклическая частота колебаний связана с частотой колебаний как  $\omega = 2\pi\nu \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Таким образом, для напряжения  $U_1$  получаем.

$$U_1 = U_0 \sin 2\pi\nu t, \quad U_1 = 310 \text{ В} \sin(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ с}^{-1} \cdot 0,01 \text{ с}) = 0 \text{ В}.$$

Ответ:  $U_1 = 0$  В.



### Упражнение 8

1. В равномерно вращающейся в однородном магнитном поле рамке индуцируется электрический ток. Закон изменения силы тока определяется соотношением  $I = 10 \sin(2\pi t)$  (А). Определите: а) амплитудное  $I_0$  значение силы тока; б) период  $T$  и частоту  $\nu$  его колебаний; в) значение  $I_1$  силы тока в момент времени  $t = 20$  мс.
2. Запишите закон изменения силы тока  $I(t)$  от времени, исходя из графика на рисунке 62. Определите силу тока в момент времени: а)  $t_1 = 5,0$  мс; б)  $t_2 = 15,0$  мс.
3. Запишите закон изменения силы тока  $I(t)$  от времени, исходя из графика на рисунке 63. Определите силу тока в момент времени: а)  $t_1 = 0,010$  с; б)  $t_2 = 0,025$  с.

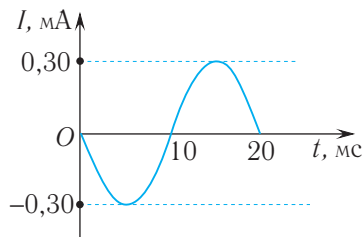


Рис. 62. График зависимости силы тока  $I$  от времени в колебательном контуре

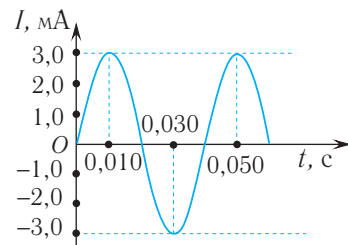


Рис. 63. График зависимости силы тока  $I$  от времени в колебательном контуре

4. Запишите закон изменения заряда на обкладках конденсатора от времени, исходя из графика на рисунке 64. Определите заряд в момент времени: а)  $t_1 = 1,50$  мс; б)  $t_2 = 3,80$  мс. Определите амплитудное  $I_0$  значение силы тока.

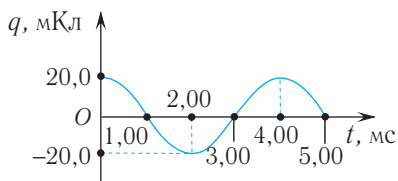


Рис. 64. График зависимости заряда  $q$  от времени  $t$  в колебательном контуре

5. В цепи переменного тока напряжение изменяется по закону  $U = U_0 \sin \omega t$ , где  $U_0 = 200$  В,  $\omega = 50\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  переменного тока. На какое напряжение  $U$  должна быть рассчитана изоляция проводов?
6. Сила тока в цепи переменного тока изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ , где  $I_0 = 3,0$  А,  $\omega = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  колебаний тока в цепи.
7. Напряжение на участке электрической цепи, по которому проходит переменный ток, изменяется со временем по закону  $U(t) = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$  (В). Определите амплитудное значение напряжения  $U_0$ , если в момент времени  $t = \frac{T}{6}$  мгновенное значение напряжения  $U = 6,0$  В.



## § 9. Преобразование переменного тока. Трансформатор

- Для использования переменного тока на производстве и в быту необходимо уметь изменять его параметры в соответствии с запросами того или иного потребителя. Для этого созданы специальные устройства, позволяющие повышать или понижать напряжение в электрической цепи. Как они устроены? Почему категорически запрещено находиться в помещении, предназначенном для работы только такого устройства?

Генераторы переменного тока создают в расчете на определенные значения напряжения. Для практического использования электрической энергии во всевозможных устройствах и приборах необходимы различные значения напряжений. Для этого используются *трансформаторы* (от лат. *transformo* — преобразую).

Первую модель (прототип) трансформатора создал в 1831 г. Майкл Фарадей, намотав на железное кольцо две изолированные обмотки,

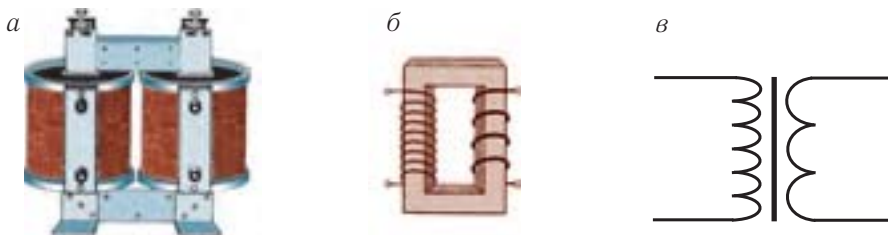


Рис. 65. Трансформатор:  
 а — общий вид; б — схематическое изображение; в — условное обозначение

которые использовал в своих экспериментах. В 1878 г. русский ученый Павел Николаевич Яблочков впервые использовал трансформатор для изменения напряжения питания изобретенных им источников света — «электрических свечей».

**Трансформатор** (рис. 65, а) — это электромагнитное устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения с сохранением его частоты.

Трансформатор, увеличивающий напряжение, называют *повышающим*, а уменьшающий — *понижающим*. Схематическое изображение и условное обозначение трансформатора на электрических схемах показаны, соответственно, на рисунке 65, б, в.

Самый простой трансформатор состоит из двух обмоток (катушек), надетых на общий замкнутый сердечник (см. рис. 65, а). Обмотка трансформатора, на которую подается переменное напряжение, называется *первичной*, а обмотка, с которой снимается преобразованное переменное напряжение, — *вторичной*. Число витков в первичной обмотке трансформатора обозначим  $N_1$ , а во вторичной —  $N_2$ .

Обмотки трансформатора могут быть расположены на сердечнике различным образом (рис. 66).



Рис. 66. Различные расположения обмоток трансформаторов

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Магнитное поле, создаваемое переменным током в первичной обмотке (см. рис. 65, а), благодаря наличию замкнутого сердечника практически без потерь (без рассеяния) пронизывает витки вторичной обмотки. Для этого сердечник изготавливается из

специального (ферромагнитного) материала, что позволяет создаваемое током в обмотках поле практически полностью локализовать внутри сердечника. В результате магнитный поток практически существует только внутри сердечника и одинаков во всех сечениях. Это позволяет считать мгновенные значения магнитных потоков во всех сечениях сердечника одинаковыми.

Пусть первичная обмотка трансформатора подключена к источнику тока с переменной ЭДС и на нее подается напряжение  $U_1$ . Если пренебречь потерями магнитного потока в сердечнике, то согласно закону Фарадея ЭДС индукции, возникающая в каждом витке вторичной обмотки, будет такой же, как ЭДС индукции в каждом витке первичной обмотки. Следовательно, отношение ЭДС в первичной  $\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  и вторичной  $\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  обмотках равно отношению числа витков в них:

$$\mathcal{E}_1 : \mathcal{E}_2 = \frac{N_1 e}{N_2 e} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

где  $e$  — значение ЭДС индукции в одном витке.

Вследствие малости электрических сопротивлений обмоток напряжение на них можно считать:

$$U_1 \approx \mathcal{E}_1, \quad U_2 \approx \mathcal{E}_2. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1, \quad (3)$$

т. е. значение напряжения  $U_2$  на вторичной обмотке пропорционально значению напряжения  $U_1$  на первичной обмотке.

Как следует из выражения (3), в зависимости от отношения числа витков в обмотках напряжение  $U_2$  может быть как больше напряжения  $U_1$  (трансформатор повышающий), так и меньше его (трансформатор понижающий).

Тип трансформатора определяется **коэффициентом трансформации**, который равен отношению числа витков первичной катушки к числу витков вторичной:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (4)$$



Рис. 67. Трансформатор с масляным охлаждением

Как следует из соотношения (4), при  $k > 1$  напряжение на вторичной обмотке будет меньше напряжения на первичной ( $U_2 < U_1$ ). Значит, в этом случае трансформатор будет *понижающим*. Соответственно, при  $k < 1$  трансформатор будет *повышающим*.

Для предотвращения перегрева мощных трансформаторов используется масляное охлаждение (рис. 67).

Современные трансформаторы являются уникальными устройствами, так как имеют очень высокие КПД (до 98—99 %), т. е. работают практически без потерь.



1. Что называется трансформатором? Опишите устройство простейшего трансформатора.
2. На каком физическом явлении основан принцип действия трансформатора?
3. Что называют коэффициентом трансформации?
4. Какой трансформатор называется повышающим? Понижающим?



## § 10. Производство, передача и потребление электрической энергии

- Жизнь современного общества невозможно представить без использования электроэнергии. Где и как она вырабатывается? Как попадает в наши дома?

Благодаря открытию явления электромагнитной индукции и изобретению генераторов электрического тока появилась возможность превращения механической энергии в электрическую. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях. В зависимости от вида используемого источника энергии все современные электростанции делятся на тепловые, атомные и гидроэлектростанции. Приведем характеристики основных типов электростанций.

**Тепловые электростанции (ТЭС)** используют теплоту, получаемую при сжигании угля, нефти, мазута, природного газа и других горючих ископаемых (КПД  $\eta = 40\%$ );

**Гидроэлектростанции (ГЭС)** используют энергию движущейся воды рек, водохранилищ и иных водных потоков (КПД  $\eta = 90 - 93\%$ );



**Атомные электростанции (АЭС)** работают на энергии, выделяющейся при расщеплении ядер урана и плутония (КПД  $\eta = 20 - 25\%$ ).

Электроэнергию, выработанную на электростанции, необходимо доставить потребителю. При передаче электроэнергии от электростанций к крупным промышленным центрам и городам наиболее часто используют проводные линии передач, которые являются надежным и сравнительно недорогим способом передачи энергии. В соответствии с законом Джоуля — Ленца потери на нагревание проводов (в единицу времени) составляют:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{I_0^2 R}{2}, \quad (1)$$

где  $I_0$  — амплитудное значение силы тока в линии электропередачи,  $R$  — сопротивление проводов.

Этих потерь нельзя избежать, но их можно уменьшить. Из формулы (1) следует, что для этого необходимо, по возможности, уменьшить как сопротивление линии электропередачи, так и значение силы тока в ней.

Однако уменьшение электрического сопротивления ( $R = \rho \frac{l}{S}$ ) проводов возможно только за счет увеличения их поперечного сечения, что приводит к значительному увеличению массы проводов, т. е. материальных затрат. Так как уменьшение силы тока в  $n$  раз в соответствии с (1) снижает тепловые потери в проводах в  $n^2$  раз, то наиболее эффективно передавать электроэнергию при наименьшем значении силы тока.

Одну и ту же мощность электрического тока в соответствии с соотношением  $P = IU$  можно получать с различными сочетаниями напряжения и силы тока, т. е., увеличивая напряжение и уменьшая силу тока, можно оставлять передаваемую мощность неизменной. При этом потери на нагревание проводов будут уменьшаться. Следует отметить, сочетание высокого напряжения и малой силы тока непригодно для применения в бытовых электрических приборах — в них напряжение должно быть низким как для безопасности, так и для упрощения их конструкции. Таким образом, для передачи электрической энергии к потребителю необходимо использовать высокое напряжение, а при использовании в быту — малое.

Для сохранения величины мощности, передаваемой по линии передач, значение напряжения повышают во столько раз, во сколько уменьшают значение силы тока ( $I_1 U_1 \approx I_2 U_2$ ). Поэтому на практике приме-



Рис. 68. Высоковольтная линия электропередачи

няют высоковольтные (сотни тысяч вольт) линии передач (рис. 68). Величина напряжения в линии передачи ограничивается возможностью надежной изоляции и стеканием заряда с проводов в атмосферу при коронном разряде. Это величина составляет  $\sim 100$  кВ. С одной стороны, генераторы переменного тока на электростанциях дают напряжения не более 16—20 кВ, с другой стороны, такие напряжения не могут предлагаться потребителю.

Для безопасного обслуживания потребителей энергии (станков, бытовых приборов и других потребителей) напряжение на них должно быть низким, что легко достигается при использовании понижающих трансформаторов. Понижение напряжения обычно происходит в несколько этапов.

Рассмотрим блок-схему передачи и распределения электроэнергии (рис. 69): генератор переменного тока (10—20 кВ)  $\Rightarrow$  повышающий трансформатор (до 110 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ)  $\Rightarrow$  высоковольтные линии электропередачи  $\Rightarrow$  каскадное понижение напряжения (до 35 кВ, 5 кВ)  $\Rightarrow$  понижающие трансформаторы (до 220 В, 127 В, 380 В, 660 В)  $\Rightarrow$  потребитель.

В современном обществе потребление электроэнергии распределяется примерно следующим образом: промышленность — 70 %; транспорт — 15 %; сельское хозяйство — 10 %; бытовое потребление — 5 %.

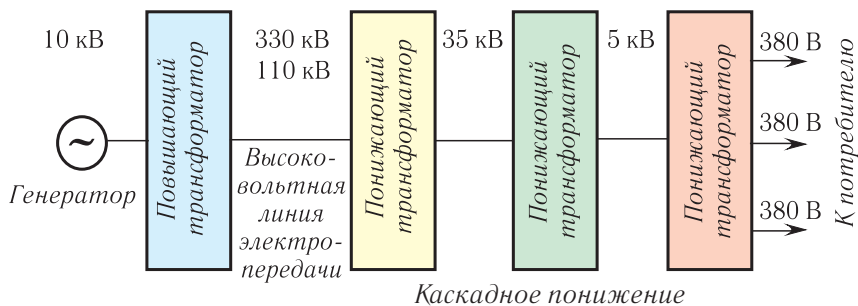


Рис. 69. Блок-схема передачи электроэнергии

► В настоящее время все большее распространение получают линии передач, работающие на постоянном токе. Хотя преобразование постоянного напряжения сложнее и дороже, но постоянный ток по сравнению с переменным обладает рядом преимуществ.

Во-первых, постоянный ток в отличие от переменного не создает переменные магнитные поля, которые индуцируют токи в близлежащих проводниках, что приводит к потерям мощности.

Во-вторых, постоянный ток можно передавать при более высоком напряжении, так как действующее напряжение в цепи равно амплитудному, и не следует опасаться электрического пробоя изолятора или воздуха при том же действующем напряжении.



1. Благодаря какому явлению появилась возможность выработки электроэнергии?
2. Какие типы электростанций вы знаете?
3. Как осуществляется передача электроэнергии на большое расстояние?
4. Почему, чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение?

## § 11. Экологические проблемы производства и передачи электрической энергии

■ Как влияет производство и использование электроэнергии на окружающую среду?

Развитие цивилизации сопровождается непрерывным ростом энергопотребления на нашей планете. Однако запасы природного топлива (нефти, природного газа, угля, торфа) и иных полезных ископаемых на Земле ограничены, поскольку из-за изменения геологических условий их формирование в настоящее время практически прекратилось.

Явным лидером среди энергоносителей на сегодняшний день является нефть, поскольку ее сравнительно легко добывать, транспортировать, очищать и использовать. Помимо этого нефть также является источником красок, лекарств, пластмасс, волокон и многих других синтетических материалов.

По различным оценкам, в настоящее время выработано около 60 % разведанных основных месторождений угля и нефти.

На территории Беларуси к основным видам добываемых топливных ресурсов следует отнести дрова и торф.

Работа электростанций вследствие их значительной мощности существенным образом влияет на состояние окружающей среды и приводит к появлению следующих экологических проблем:

ТЭС — загрязнение атмосферы продуктами сгорания, изменение природного теплового баланса из-за рассеяния тепловой энергии;

ГЭС — изменение климата, нарушение экологического равновесия, уменьшение пахотных площадей;

АЭС — опасность радиоактивного загрязнения среды при авариях, проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Одной из главных экологических проблем современности является рост выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива (в первую очередь, углекислого газа). Углекислый газ «окутывает» Землю подобно пленке, препятствуя ее охлаждению. Это приводит к *парниковому эффекту*, при котором средняя температура на Земле медленно повышается. Соответственно, за последние десятилетия на планете происходит *глобальное потепление*, которое, согласно прогнозам ученых, может привести к необратимым изменениям в климате Земли.

Рост энергопотребления заставляет ученых и инженеров искать **альтернативные источники энергии**, которые имели бы **возобновляемый** характер, т. е., в отличие от нефти и газа, могли бы самостоятельно восстанавливаться с течением времени.

К возобновляемым источникам энергии относят ветер, недра Земли (геотермальную энергию), морские приливы, а также солнечное излучение, используемое напрямую. Поэтому основными видами альтернативной энергетики являются ветроэнергетика, геотермальная энергетика, приливная энергетика, гелиоэнергетика.

*Ветроэнергетика* — использование кинетической энергии ветра для получения электроэнергии. Энергия ветра уже достаточно успешно преобразуется в электроэнергию в многочисленных небольших ветряных генераторах в зонах устойчивых ветров (рис. 70).

*Геотермальная энергетика* — использование естественного тепла Земли для выработки электрической энергии. Геотермальная энергия в местах естественных разломов земной коры используется для нужд человека.



Рис. 70. Ветряной генератор

Например, столица Исландии — Рейкьявик полностью отапливается за счет геотермальных источников. Запасы геотермальной энергии достаточно велики, о чем можно судить по громадной разрушительной силе землетрясений и извержений вулканов и гейзеров.

*Приливная энергетика* использует энергию морских приливов. В настоящее время делаются первые шаги для

использования энергии океанических приливов и отливов. Инженерная идея подобных проектов проста: использовать перепад уровней воды во время прилива и отлива для вращения водой гидротурбин, чтобы на соединенных с ними гидрогенераторах производить электричество.

*Гелиоэнергетика* — получение электрической энергии из энергии солнечного излучения. Развитие современных технологий позволяет эффективно использовать энергию, вырабатываемую солнечными батареями. Так, в южных широтах энергии подобных батарей, установленных на крыше, хватает для энергоснабжения небольшого дома. Современные технологии позволяют, используя солнечные батареи, получать электрическую энергию от солнечного излучения не только на Земле, но и в космосе (рис. 71).

Есть очень смелые проекты, в которых предлагается разместить солнечные батареи в ближнем космосе на расстоянии 36 000 км от поверхности Земли. Это так называемая «синхронная» орбита, на которой батареи будут «неподвижными» относительно земного наблюдателя, поскольку период их обращения будет равен 24 ч. В этом случае батареи будут находиться в тени Земли только 2 % времени, что позволит производить в десятки раз больше энергии, чем на Земле. Энергия Солнца, преобразованная в электромагнитный пучок сверхвысокой частоты, будет передаваться на большие антенны на Земле.

Преимущество возобновляемых источников энергии состоит в том, что их использование не приводит к опасному загрязнению окружающей среды.

► Проекты будущего предлагают использовать в качестве возобновляемых источников энергии колоссальную энергию океанических и воздушных течений, тропических ураганов и торнадо. Основная причина их формирования — неравномерное нагревание Солнцем различных участков поверхности Земли.



Рис. 71. Солнечные батареи в космосе



1. Назовите альтернативные способы получения электроэнергии, не загрязняющие окружающее пространство.
2. Ограничены ли запасы природного топлива на нашей планете?
3. Перечислите наиболее распространенные виды природного топлива.

4. Какая часть природных месторождений топлива освоена на сегодняшний день?
5. Какие виды природного топлива добываются в Беларуси?
6. В чем заключается сущность парникового эффекта? Чем опасно глобальное потепление?
7. Какие источники энергии называются возобновляемыми?
8. Перечислите основные проекты использования возобновляемых источников энергии. Какие из них являются наиболее перспективными для Беларуси?
9. Что является самым распространенным источником энергии во Вселенной?

## § 12. Электромагнитные волны и их свойства. Шкала электромагнитных волн

- Практически до начала XX в. человеческая цивилизация не знала о существовании электромагнитных волн, использование свойств которых до неузнаваемости изменило быт современных людей. Как тепловое излучение Солнца достигает Земли через холодные просторы космоса? Конечна ли скорость света? Как осуществляется связь с космонавтами на околоземной орбите?

Впервые гипотезу о существовании электромагнитных волн высказал в 1864 г. английский физик Джеймс Максвелл. В своих работах он показал, что источниками электрического поля могут быть как электрические заряды, так и магнитные поля, изменяющиеся во времени.

В свою очередь магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами (электрическим током), либо переменными электрическими полями.

Изменение индукции магнитного поля с течением времени вызывает появление в окружающем пространстве вихревого электрического поля. Силовые линии этого поля замкнуты и охватывают линии индукции магнитного поля, и напряженность  $\vec{E}(t)$  в любой точке пространства перпендикулярна индукции  $\vec{B}(t)$  магнитного поля (рис. 72, а).

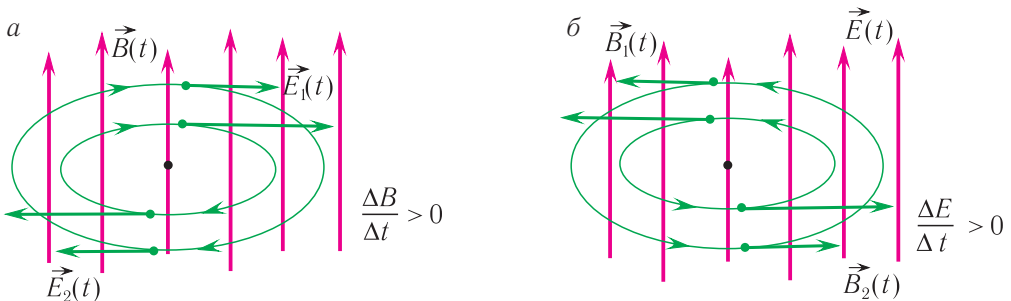


Рис. 72. Переменные электрические (а) и магнитные поля (б), порождающие друг друга

Максвелл предположил, что любое изменение напряженности вихревого электрического поля сопровождается возникновением переменного магнитного поля (рис. 72, б). Далее этот процесс может повторяться «до бесконечности», поскольку поля смогут попеременно воспроизводить друг друга даже в вакууме.

Таким образом, в вакууме возникает система изменяющихся и взаимно поддерживающих друг друга электрических и магнитных полей, захватывающих все большие и большие области пространства (рис. 73).

Совокупность связанных друг с другом периодически изменяющихся электрического и магнитного полей называют переменным **электромагнитным полем**. Согласно теории Максвелла электромагнитное поле распространяется в пространстве с конечной скоростью.

Рассмотрим подробнее процесс образования электромагнитного поля в пространстве, окружающем проводник.

Пусть в проводнике возбуждены электромагнитные колебания, в результате чего сила электрического тока в нем непрерывно меняется. Поскольку сила тока связана со скоростью движения свободных зарядов в проводнике, то скорость движения последних также будет непрерывно изменяться с течением времени. Это говорит о том, что свободные заряды внутри проводника будут двигаться с ускорением.

Согласно теории Максвелла при ускоренном движении свободных зарядов в проводнике в пространстве вокруг него создается переменное магнитное поле, которое порождает переменное вихревое электрическое поле. Последнее, в свою очередь, вновь вызывает появление переменного магнитного поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д. Таким образом, в пространстве вокруг проводника образуются взаимосвязанные электрические и магнитные поля, которые распространяются с течением времени в виде волны.

Электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме или в какой-либо среде с конечной скоростью, называется **электромагнитной волной** (рис. 74).

Электромагнитные волны являются поперечными. В них направления колебаний векторов напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и индукции  $\vec{B}$  магнитного поля волны происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

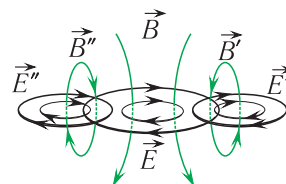


Рис. 73. Образование электромагнитной волны

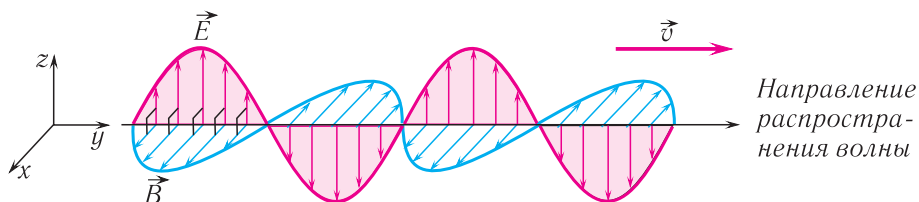


Рис. 74. Схематическое изображение электромагнитной волны

Подобно упругим механическим волнам электромагнитные волны испытывают отражение от препятствий, преломление на границах сред. Но в отличие от упругих волн электромагнитные волны могут распространяться и в вакууме.



Одним из важнейших результатов теории Максвелла было теоретическое определение модуля скорости распространения электромагнитных волн (света). Согласно этой теории модуль скорости распространения  $c$  электромагнитной волны в вакууме связан с электрической постоянной  $\epsilon_0$  и магнитной постоянной  $\mu_0$  следующим соотношением:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме является максимально (предельно) достижимой величиной. В любом веществе скорость их распространения меньше  $c$  и зависит от его электрических и магнитных свойств.

Совпадение скорости электромагнитных волн со скоростью света дало возможность Максвеллу предположить, что свет имеет электромагнитную природу. Благодаря этому произошло объединение в одно учение оптики и электромагнетизма.

Электромагнитные волны были экспериментально открыты немецким физиком Генрихом Герцем в 1887 г. Для их генерации он использовал специальное устройство (рис. 75, а), впоследствии названное *вибратором Герца*.

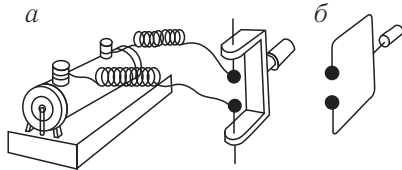


Рис. 75. Схематическое изображение экспериментальной установки Герца: а — вибратор Герца; б — приемный контур

Герц исследовал излучаемое вибратором электромагнитное поле. В воздушном зазоре между шарами при переменном напряжении, достигающем значения пробоя воздуха, происходил искровой разряд. При этом в вибраторе возникали электромагнитные колебания высокой частоты.



Индикатором электромагнитных волн, возникающих в опытах Герца, служила искра, образующаяся в приемном контуре (рис. 75, б). Размеры приемного контура (в форме прямоугольного контура или кольца) выбирались таким образом, чтобы собственная частота возникающих в нем колебаний была равна частоте излучаемых волн.

Изменяя положение приемного контура по отношению к вибратору и наблюдая появление в нем искры, Герц определял наличие поля в различных точках пространства. Таким образом, Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

В своих экспериментах, проведенных в 1887—1891 гг., Герц сумел не только убедительно доказать существование электромагнитных волн, но и установить их основные свойства. Перечислим основные свойства электромагнитных волн:

- распространяются не только в различных средах, но и в вакууме;
- в вакууме распространяются со скоростью  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- отражаются и преломляются на границах раздела сред;
- являются поперечными.

Спектр электромагнитного излучения удобно изображать в виде шкалы электромагнитных волн, приведенной на рисунке 76.

Свойства электромагнитных волн очень сильно зависят от их частоты. Излучение электронов, обусловленное их движением в проводниках, позволяет генерировать электромагнитные волны с частотой до  $10^{12}$  Гц. Для генерации излучений с частотой выше  $10^{12}$  Гц используют излучение атомов. Верхний предел частот, которые могут генерировать атомные системы, составляет  $10^{30}$  Гц.

Излучения более высоких частот (гамма-излучение) испускаются атомными ядрами.

Классификация электромагнитных волн в зависимости от частот (длин волн) приведена в таблице 7.



Рис. 76. Шкала электромагнитных волн

Таблица 7. Классификация электромагнитных волн

| Виды излучения             | Интервал частот, Гц; (длин волн (вакуум), м)                                    | Источники излучения  | Приемники излучения (применение)  |
|----------------------------|---|--|---|
| Низкочастотные волны       | $< 3 \cdot 10^3$<br>( $> 1 \cdot 10^5$ )  | Генераторы переменного тока, электрические машины                | Передача электрической энергии, обработка металлов  |
| Радиоволны                 | $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^9$<br>( $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^{-1}$ )           | Колебательные контуры, вибраторы Герца                           | Колебательные контуры электрических цепей, связь и навигация  |
| Микроволны                 | $3 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{12}$<br>( $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-4}$ )     | Мазеры, полупроводниковые приборы                                | Колебания молекул, приготовление пищи, нагревание   |
| Инфракрасное излучение     | $1 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$<br>( $1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-7}$ )  | Солнце, электролампы, лазеры, космическое излучение              | Кожа человека, сушка, тепловое фотокопирование  |
| Видимое излучение          | $4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$<br>( $7 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$ )  | Солнце, электролампы, лазеры, светодиоды                         | Глаз человека   |
| Ультрафиолетовое излучение | $8 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$<br>( $4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-8}$ )  | Солнце, космическое излучение, лазеры, электролампы              | Кожа человека (загар, лечение заболеваний кожи), уничтожение бактерий, сигнализация                           |
| Рентгеновское излучение    | $1 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$<br>( $3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-10}$ ) | Бетатроны, солнечная корона, небесные тела, рентгеновские трубки | Ионизация, счетчик Гейгера — Мюллера, рентгенография, радиология, обнаружение подделок произведений искусства |

Продолжение

| Виды излучения  | Интервал частот, Гц; (длин волн (вакуум), м)                                     | Источники излучения   | Приемники излучения (применение)     |
|-----------------|--|---|--------------------------------------|
| Гамма излучение | $3 \cdot 10^{18} — 3 \cdot 10^{29}$<br>( $1 \cdot 10^{-10} — 1 \cdot 10^{-21}$ ) | Космическое излучение, радиоактивные распады, бетатрон, циклотрон | Стерилизация, медицина, лечение рака |

В настоящее время электромагнитные волны находят широкое применение в науке и технике в таких процессах и явлениях, как:

- плавка и закалка металлов в электротехнической промышленности, изготовление постоянных магнитов (*низкочастотные волны*);
- телевидение, радиосвязь, радиолокация (*радиоволны*);
- мобильная связь, радиолокация (*микроволны*);
- сварка, резка, плавка металлов лазерами, приборы ночного видения (*инфракрасное излучение*);
- освещение, голография, лазеры (*видимое излучение*);
- люминесценция в газоразрядных лампах, лазеры (*ультрафиолетовое излучение*);
- рентгенотерапия, рентгеноструктурный анализ, лазеры (*рентгеновское излучение*);
- дефектоскопия, диагностика и терапия в медицине, исследование внутренней структуры атомов, военное дело (*гамма-излучение*).

► 7 мая 1895 г. русский ученый Александр Степанович Попов на заседании Русского физико-химического общества в Санкт-Петербурге сообщил о возможности приема электромагнитных сигналов на расстоянии. А уже 18 декабря 1897 г. он передал на расстояние 250 м первую в мире радиограмму из двух слов «Heinrich Hertz» (Генрих Герц) в честь первого в мире человека, наблюдавшего электромагнитные волны.



В 1901 г. итальянский инженер Г. Маркони впервые осуществил радиосвязь через Атлантический океан. В 1909 г. он получил Нобелевскую премию по физике за развитие радиотехники и распространение радио как средства связи.



1. Что является источником вихревого электрического поля?
2. Чем отличается вихревое электрическое поле от: а) магнитного; б) электростатического?

3. Что называется электромагнитной волной?
4. Перечислите основные интервалы частот (длин волн), соответствующие различным типам электромагнитных волн.
5. Чем электромагнитные волны отличаются от механических?
6. Приведите примеры применения электромагнитных волн различных частот.

### Пример решения задачи

Радиоприемник настроен на радиостанцию, работающую на длине волны  $\lambda_1 = 25$  м. Во сколько раз  $n$  необходимо изменить емкость приемного колебательного контура радиоприемника, чтобы настроить его на длину волны  $\lambda_2 = 31$  м?

Дано:  
 $\lambda_1 = 25$  м  
 $\lambda_2 = 31$  м  


---

 $n$  — ?

Решение  
 Длина волны определяется по формуле:  

$$\lambda = cT,$$
 где  $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

По формуле Томсона:

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

Тогда для двух длин волн можем записать:

$$\lambda_1 = c2\pi\sqrt{LC_1},$$

$$\lambda_2 = c2\pi\sqrt{LC_2}.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}.$$

Откуда

$$n = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2; \quad n = \left(\frac{31}{25}\right)^2 = 1,5.$$

Ответ:  $n = 1,5$ .

### Упражнение 9

1. Радиоприемник принимает передачу на волне длиной  $\lambda = 15$  м. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  колебаний тока в колебательном контуре приемника.

2. Рассчитайте расстояние  $l$  до объекта, если отраженный от него радиосигнал вернулся через промежуток времени  $\tau = 3,0$  мкс.
3. Посланный на Венеру радиосигнал был принят на Земле через промежуток времени  $\tau_1 = 4,5$  мин, а на Марс — через промежуток времени  $\tau_2 = 3,5$  мин. Определите по этим данным расстояния от Земли до Венеры и от Земли до Марса.
4. Определите количество  $N$  длин волн монохроматического излучения частотой  $\nu = 150$  ГГц, которое укладывается на отрезке длиной  $l = 15$  м.
5. Определите длину волны  $\lambda_1$ , на которую настроен радиоприемник, если напряжение в приемном контуре меняется по закону:  $U(t) = 200 \cos(2 \cdot 10^4 \pi t)$  (В). Определите также длину волны  $\lambda_2$ , излучаемую передатчиком, если сила тока в его колебательном контуре изменяется по закону  $I = 0,400 \cos(6\pi \cdot 10^6 t)$  (А).
6. Определите длину волны  $\lambda$ , на которую настроен радиоприемник, если его колебательный контур содержит конденсатор емкостью  $C = 4,0$  нФ и катушку индуктивностью  $L = 4,0$  мГн.
7. Емкость переменного конденсатора колебательного контура изменяется от величины  $C$  до  $64C$ . Если емкость конденсатора равна  $8C$ , то контур настроен на длину волны  $\lambda = 36$  м. Определите диапазон  $\Delta\lambda$  длин волн, принимаемых радиоприемником с данным контуром.
8. Определите расстояние  $d_2$  между обкладками плоского воздушного конденсатора, чтобы колебательный контур приемника был настроен на длину волны  $\lambda_2 = 120$  м, если при расстоянии между ними  $d_1 = 3,6$  мм приемник настроен на длину волны  $\lambda_1 = 150$  м.

## § 13. Действие электромагнитного излучения на живые организмы

■ Несмотря на то что все электромагнитные волны имеют одинаковую природу, их свойства, в зависимости от длины волны, существенно изменяются. Достаточно заметить, что благодаря видимому излучению мы можем наслаждаться всеми красками окружающего нас мира. Иными словами, процесс зрения становится возможным благодаря существованию электромагнитных волн определенного диапазона. Эти же волны из другого диапазона могут согреть, а могут и таить смертельную опасность. От чего зависят свойства электромагнитных волн? Как человек использует их особенности? Следует ли опасаться электромагнитного излучения?

Все окружающее нас пространство пронизано различными электромагнитными излучениями и полями.



Рис. 77. Основные источники электромагнитного поля

Существуют естественные и техногенные источники электромагнитных полей. Естественными источниками электромагнитного поля являются: радиоизлучение Солнца и галактик, электрическое и магнитное поля Земли, атмосферное электричество.

Бурное развитие науки и техники в XX в. привело к созданию источников техногенных электромагнитных полей. Были разработаны генераторы электро-

магнитных полей, которые широко используются в промышленности, связи, военной технике, радионавигации, здравоохранении, быту. Основными источниками электромагнитного излучения являются линии электропередач, сеть электроснабжения, теле- и радиостанции, спутниковая и сотовая связь, радары, персональные компьютеры (рис. 77).



Электромагнитные излучения могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на живые организмы.

Рассмотрим сначала положительное воздействие различных диапазонов электромагнитного излучения.

**Инфракрасное (тепловое) излучение** играет определяющую роль в поддержании жизни на Земле, поскольку люди, животные и растения могут существовать и нормально функционировать только при определенных температурах. Данное излучение широко используется сотрудниками МЧС для нахождения людей в задымленных помещениях с помощью специальных инфракрасных приборов. Так же оно помогает ученым изучать происхождение и эволюцию нашей Вселенной.

**Видимый свет** дает информацию людям об окружающем мире и возможность ориентироваться в пространстве. Он необходим также для протекания процесса фотосинтеза в растениях, в результате чего поглощается углекислый газ и выделяется кислород, необходимый для дыхания живых организмов.

Применение **ультрафиолетового излучения** обусловлено его главными свойствами: высокой химической активностью, бактерицидным действием. Так, например, ультрафиолетовые лампы способны убивать бактерии

и микроорганизмы, поэтому «кварцевые» лампы широко применяют для дезинфекции воздуха в местах массового скопления людей: больницах, учебных заведениях, вокзалах, метро.

Умеренные дозы ультрафиолетового излучения (Солнца или специальных ламп, например в соляриях) способствуют образованию в нашей коже витамина D, а также других веществ, влияющих на тонус и жизнедеятельность организма.

**Рентгеновское излучение** находит широкое применение в медицине — флюорографическое обследование или рентгеновский снимок наверняка делали каждому из вас. При прохождении рентгеновского излучения через ткани и органы человека или животных на фотопленке или светящемся экране наблюдаются различные (по степени затемнения) тени в зависимости от плотности тканей. Применение рентгеновского излучения при лечении рака основано на том, что оно убивает раковые клетки.

**Гамма-излучение** представляет собой самый широкий диапазон электромагнитного спектра, поскольку он не ограничен со стороны высоких энергий. Это излучение легко разрушает молекулы, в том числе и биологические, но, к счастью, оно не проходит через атмосферу.

Широкое применение электромагнитных приборов сопровождается прогрессирующим электромагнитным загрязнением окружающей среды, создающим угрозу здоровью человека.

Основное влияние на здоровье людей оказывают такие факторы электромагнитного излучения, как:

- интенсивность;
- частота;
- режим облучения (непрерывный, прерывистый, импульсный);
- продолжительность воздействия;
- местное или общее воздействие.

Проявляться это воздействие может в различной форме — от незначительных изменений в некоторых системах организма до серьезных нарушений.

Раньше других на электромагнитные волны реагирует нервная система. Обследование большого числа пациентов позволило выявить зависимость функционального расстройства центральной нервной системы (магнитной, или радиоволновой болезни) от дозы электромагнитного излучения.

В бытовых приборах, в промышленности, в радиолокации широко используется **микроволновое излучение** (длины волн от 1 мм до 1 м) (табл. 8).

Таблица 8. Превышение допустимых норм электромагнитного излучения в различных бытовых приборах

| Источник ЭМИ        | Показатели излучения, мкТл | Превышение, раз |
|---------------------|----------------------------|-----------------|
| Компьютер           | 1—100                      | 5—500           |
| Холодильник         | 1                          | 5               |
| Кофеварка           | 10                         | 50              |
| Печь СВЧ            | 8—100                      | 40—500          |
| Фен и электробритва | 15—17                      | 75—85           |
| Провод от лампы     | 0,7                        | 3,5             |
| Трамвай, троллейбус | 150                        | 750             |
| Метро               | 300                        | 1500            |
| Сотовый телефон     | 40                         | 200             |

Различают его тепловое и биологическое воздействие.

*Тепловое* воздействие является следствием поглощения энергии излучения. Чем выше напряженность поля и больше время его воздействия, тем сильнее проявляется тепловое воздействие. При интенсивности энергии более *теплого порога* ( $I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ) в организме начинаются необратимые процессы, так как он не справляется с отводом теплоты и температура тела повышается.



Рис. 78. Биологическое действие электромагнитных полей

*Биологическое* воздействие проявляется в ослаблении биологической активности белковых структур, нарушении сердечно-сосудистой системы и обмена веществ (рис. 78). Это воздействие проявляется при интенсивности электромагнитного поля менее *теплого порога*.

Воздействие микроволнового излучения особенно вредно для глаз, мозга, почек, желуд-



ка, желчного и мочевого пузыря — органов, у которых ткани имеют слаборазвитую сосудистую систему или недостаточное кровообращение. Например, облучение глаз может привести к помутнению хрусталика (катаракте) и ожогам роговицы.

**Инфракрасное (тепловое) излучение**, поглощаясь тканями, вызывает тепловой эффект. Это излучение наиболее поражает кожные покровы и глаза. При остром повреждении кожи возможны ожоги, резкое расширение капилляров, усиление пигментации кожи. При хроническом облучении появляется стойкое изменение пигментации, красный цвет лица, например у стеклодувов, сталеваров. Повышение температуры тела ухудшает самочувствие человека, снижает его работоспособность.

**Световое излучение** при высоких энергиях также представляет опасность для кожи и глаз. Пульсации яркого света ухудшают зрение, снижают работоспособность, воздействуют на нервную систему.

**Ультрафиолетовое излучение** в большом количестве может привести к ожогам глаз вплоть до временной или полной потери зрения, острому воспалению кожи с покраснением, иногда с отеком и образованием пузырей. При этом может наблюдаться также повышение температуры, озноб, головная боль.

Воздействие **лазерного излучения** на человека зависит от интенсивности излучения, длины волны (инфракрасного, видимого или ультрафиолетового диапазона), характера излучения (непрерывное или импульсное), времени воздействия.

Слишком большие дозы или частые обследования с помощью *рентгеновских лучей* могут вызвать серьезные заболевания.

► Предупреждающий знак о действии опасного электромагнитного излучения приведен на рисунке 79.

Для определения интенсивности электромагнитного излучения используется специальный прибор — флюксметр. Безопасным электромагнитным излучением считается излучение с показателем  $0,2—0,3$  мкТл.



Рис. 79. Знак «Опасное электромагнитное излучение»



1. Назовите основные источники электромагнитного излучения.
2. Какие основные воздействия на живые организмы оказывает СВЧ-излучение?
3. Какое электромагнитное излучение способно убивать бактерии и микроорганизмы?

4. От каких характеристик электромагнитного излучения (ЭМИ) зависит его влияние на здоровье человека?
5. Какой прибор используется для определения уровня ЭМИ?
6. Почему флюорографию следует проводить не чаще одного раза в год?
7. Какой тип ЭМИ наиболее опасен для здоровья человека?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 2

**Идеальным колебательным контуром** или *LC*-контуром называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности.

Период электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре определяется **формулой Томсона**:

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

Полная энергия идеального *LC*-контура, равная сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки, сохраняется:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.}$$



**Трансформатор** — устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения. Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции.

Тип трансформатора определяется **коэффициентом трансформации**, который равен отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки трансформатора:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Если  $k > 1$ , то трансформатор понижающий, если  $k < 1$  — повышающий.

Совокупность связанных друг с другом изменяющихся электрического и магнитного полей называют **электромагнитным полем**.

**Электромагнитными волнами** называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

Электромагнитные волны являются поперечными, так как колебания напряженности  $\vec{E}$  и индукции  $\vec{B}$  происходят в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости распространения света:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

### Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (У. Томсон (Кельвин), М. Фарадей, Д. Максвелл, Г. Герц).

2. Подготовьте доклад на тему «Действие электромагнитного излучения от различных бытовых приборов на человека».

3. Подготовьте рефераты на темы: «Переменный ток вокруг нас», «Противостояние Теслы и Эдисона: AC/DC», «Как мы чувствуем электромагнитные волны?»

4. При подключении к сети переменного тока трансформатор начинает характерно «гудеть». Используя школьную модель трансформатора (рис. 80), исследуйте характеристики этого звука. Определите частоту этого гудения, а также оцените громкость звука в различных режимах работы трансформатора.

5. Покройте черной краской одну половину внутренней поверхности банки и проделайте отверстие в ее крышке (рис. 81). Если осветить черную стенку банки лампой накаливания, работающей на переменном токе, то можно услышать отчетливый звук. Объясните наблюдаемое явление. Определите частоту звука и экспериментально установите, как влияют на его громкость такие параметры, как мощность лампы, расстояние до банки, размеры банки.



Рис. 80

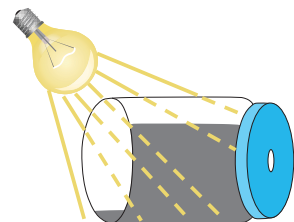


Рис. 81





# Глава 3

## Оптика

«Солнце, небо, звезд сиянье,  
море в блеске голубом,  
Всю природу и созданья мы  
лишь в свете познаем».

*М. И. Чайковский*

### § 14. Электромагнитная природа света

- С античных времен считалось, что свет практически мгновенно преодолевает любые расстояния. Вопрос о природе света долгое время также оставался открытым. Какими свойствами обладает свет? Как была измерена скорость его распространения?



Чем меньше скорость распространения света в среде, тем среда является оптически более плотной.

**Оптика** — раздел физики, в котором изучается физическая природа и свойства света, а также его взаимодействие с веществом. Соответственно световые явления часто называют оптическими явлениями. Слово оптика произошло от греч. *οπτικός* (оптикос) — видимый, зрительный, поскольку основную часть информации о природе и происходящих в ней явлениях человек получает посредством зрительных ощущений, возникающих под действием света.



Под **светом** в оптике понимают электромагнитные волны, длины волн которых находятся в диапазоне от 2,0 мм до 10 нм. Этот диапазон делится на инфракрасный (2,0 мм—0,75 мкм), видимый (от 750 нм до 380 нм) и ультрафиолетовый (380 нм—10 нм) диапазоны.

Современная оптика основана на электромагнитной теории света. Как вам известно (см. § 12), во второй половине XIX в. Дж. Максвелл доказал возможность распространения электромагнитных волн в вакууме. Согласно выводам из его теории свет имеет электромагнитную природу,

поскольку скорость его распространения равна скорости электромагнитных волн в вакууме.

Первые попытки измерения скорости света, предпринятые в начале XVII в. Г. Галилеем и другими учеными, не увенчались успехом в силу недостаточной точности измерения времени (хронометрирования). Из результатов этих экспериментов Галилей сделал вывод, что измерить модуль скорости света на малых расстояниях практически невозможно, поскольку свет преодолевает их мгновенно в силу большого значения скорости распространения.

Декарт одним из первых предложил использовать для измерения модуля скорости света огромные (астрономические) расстояния, на преодоление которых свету потребуется значительное время, которое можно измерять с достаточной точностью.

Исторически первое экспериментальное определение модуля скорости света в вакууме в 1672 г. сделал датский астроном Олаф Рёмер, который проводил систематические наблюдения в телескоп затмений спутника Юпитера — Ио. Примерно через полгода после начала наблюдений он заметил, что момент затмения спутника Ио запаздывает почти на 16 мин по сравнению с вычисленным значением. Рёмер объяснил это запаздывание конечностью скорости распространения света. Действительно, поскольку за полгода Земля переместилась из положения I (рис. 82) в положение II, то свету необходимо пройти добавочное расстояние, примерно равное диаметру земной орбиты. А при конечности скорости света для этого необходимо больше времени.

На основании имевшихся в то время данных о диаметрах орбит Земли и Юпитера он получил для скорости света значение:

$$c = 2,12 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

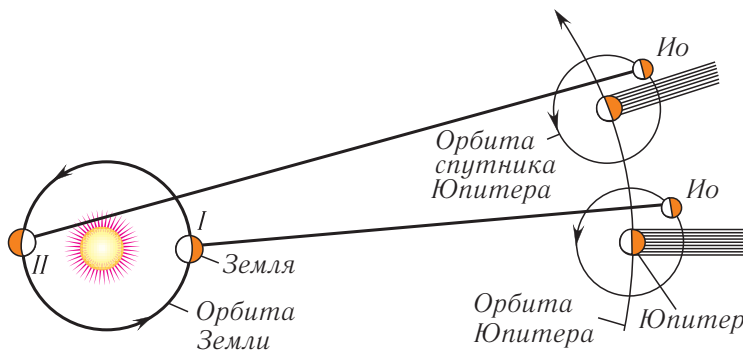


Рис. 82. Схема наблюдений Рёмера

Американский физик Альберт Майкельсон в 1926 г. для измерения скорости света использовал установку, в которой свет проходил между двумя горными вершинами. Он получил значение скорости света, близкое к современным данным:

$$c = (299796 \pm 4) \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

В 1972 г. скорость света была определена на основе независимых измерений длины волны и частоты света. Это позволило значительно повысить точность измерений. В качестве источника был выбран гелий-неоновый лазер. Таким образом, было получено значение скорости света, превосходящее по точности все ранее известные значения более чем на два порядка. Ввиду этого в 1983 г. на 17-й Генеральной конференции по мерам и весам значение скорости света в вакууме принято равным

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ (точно).}$$

Заметим, что при решении задач, как правило, используют приближенное значение модуля скорости света:

$$c \approx 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Именно это значение скорости распространения света  $c$  связывает длину волны  $\lambda$  в вакууме с периодом ее колебаний  $T$ :

$$\lambda = cT$$

и с частотой  $\nu$ :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Результаты измерений показали, что скорость света  $v$  в различных веществах всегда меньше, чем скорость света  $c$  в вакууме. В 1862 г. французский физик Жан Фуко измерил скорость распространения света в воде и получил значение  $2,23 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через несколько лет Майкельсон определил скорость распространения света в сероуглероде —  $1,71 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Следовательно, в воде скорость распространения света уменьшается в 1,33 раза по сравнению с вакуумом, а в сероуглероде — в 1,64 раза.

Из курса физики 8-го класса вам известно, что чем меньше скорость распространения света в среде, тем среда считается оптически более плотной. Мерой оптической плотности вещества является его *абсолютный показатель преломления*, который обозначается латинской буквой  $n$ .

**Абсолютный показатель преломления**  $n$  вещества характеризует его оптические свойства и показывает, во сколько раз скорость распространения света в данном веществе меньше скорости распространения света в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Так как скорость распространения света в любом веществе всегда меньше, чем в вакууме, то абсолютный показатель преломления вещества всегда больше единицы ( $n \geq 1$ ). Абсолютный показатель преломления зависит как от свойств вещества, т. е. его химического состава, агрегатного состояния, температуры, давления, так и от частоты света.

Исходя из соотношения (1), можно записать формулу для нахождения модуля скорости распространения света в веществе:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (n > 1). \quad (2)$$

Кроме того, из соотношения (1) следует, что для любых сред:

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = \dots = c, \quad (3)$$

где  $n_1, n_2$  — абсолютные показатели преломления сред,  $v_1, v_2$  — скорости распространения света в средах.

Подставим в соотношение (3) выражение  $v = \lambda \nu$ , связывающее модуль скорости распространения света  $v$  в веществе с длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ . Так как при переходе электромагнитной волны из вакуума в вещество или из одного вещества в другое **частота колебаний** напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и индукции  $\vec{B}$  магнитного поля **не изменяется** ( $\nu = \text{const}$ ), то:

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 = \dots = \lambda,$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — длины световых волн в средах,  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

Отсюда следует, что *длина световой волны*  $\lambda_n$  при переходе из одного вещества в другое *изменяется*.

**Длина световой волны**  $\lambda_n$  **в веществе**, абсолютный показатель преломления которого  $n$ , определяется по формуле:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}. \quad (4)$$

Таким образом, при переходе света из одного вещества в другое частота остается неизменной, а изменяется скорость распространения световой волны и ее длина волны.

Белый свет представляет собой совокупность электромагнитных волн всевозможных частот видимого диапазона. Волна одной определенной частоты называется **монохроматической** (от греч. *μονος* (монос) — один и *χρῶμα* (хрома) — цвет, т. е. одноцветный).

Как показали результаты многочисленных экспериментов, световое ощущение у человека вызывают лишь электромагнитные волны определенного диапазона ( $4,0 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$ ) Гц, которому соответствуют длины волн от  $\lambda_1 = 0,76$  мкм до  $\lambda_2 = 0,40$  мкм, воспринимаемые глазом человека.

Каждой частоте соответствует свое цветовое ощущение. Так, например, свет частотой  $\nu_1 = 4,0 \cdot 10^{14}$  Гц вызывает ощущение красного цвета, а  $\nu_2 = 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц — фиолетового. Поскольку при переходе света из одной среды в другую частота не изменяется, то при этом не изменяется и его цветовое восприятие.

► Скорость распространения света в вакууме обозначается латинской буквой *c* (от лат. *celeritas* — скорость).

В соответствии с резолюцией на 17-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1983 г. принято новое определение метра как расстояния, проходимого светом в вакууме за  $1/(299\,792\,458)$  долю секунды.

Результаты измерений показывают, что 47 % своей энергии Солнце посылает в виде инфракрасных лучей, 44 % энергии приходится на видимую часть спектра, а оставшиеся 9 % энергии солнечного излучения — на ультрафиолетовый диапазон.



1. Что изучает оптика?
2. Что такое свет? Чему равна скорость распространения света в вакууме?
3. Что характеризует абсолютный показатель преломления вещества?
4. Как изменяются частота, скорость распространения и длина волны света при переходе света из одной среды в другую?
5. Электромагнитные волны какого частотного диапазона вызывают зрительное цветовое ощущение у человека?
6. Какое излучение называется монохроматическим?

### Пример решения задачи

Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda_0 = 550$  нм переходит из стекла в воздух. Определите, на сколько  $\Delta\lambda$  при этом увеличивается длина волны света, если абсолютный показатель преломления стекла



равен  $n = 1,40$ . Найдите скорость  $v$  распространения света в стекле, если скорость распространения света в воздухе  $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано:

$$\lambda_0 = 550 \text{ нм} = 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = 1,40$$

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

---


$$\Delta\lambda - ? \quad v - ?$$

Решение

Учитывая, что частота света не изменяется при переходе из одной среды в другую, запишем

$$\lambda_0 = \frac{v}{\nu}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (2)$$

где  $v$  — скорость света в стекле,  $\lambda$  — длина волны света в воздухе.

Из соотношений (1) и (2) следует:

$$\lambda = \frac{c}{v} \lambda_0.$$

Учитывая, что  $n = \frac{c}{v}$ , находим:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{c-v}{v} \lambda_0 = \lambda_0 (n - 1), \quad \Delta\lambda = (1,40 - 1) \cdot 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 2,20 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$$v = \frac{c}{n}, \quad v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,40} = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $\Delta\lambda = 0,220 \text{ мкм}$ ,  $v = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### Упражнение 10

1. Какой промежуток времени  $\tau$  необходим свету, чтобы дойти от Солнца до Земли, расстояние между которыми  $l = 1,48 \cdot 10^8 \text{ км}$ ?
2. Определите скорость распространения света  $v$  в кварце, абсолютный показатель преломления которого  $n = 1,54$ .
3. Скорость распространения света в воде  $v_1 = 2,250 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ , а в стекле —  $v_2 = 1,982 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . Определите отношение  $k$  показателей преломления стекла и воды.
4. Определите промежуток времени  $\tau$ , за который свет проходит расстояние  $l = 450 \text{ км}$  в воде, показатель преломления которой  $n = 1,33$ .
5. Наблюдатель услышал гром через промежуток времени  $\tau = 5,0 \text{ с}$  после вспышки молнии. Найдите, на каком расстоянии  $l$  от наблюдателя произошел грозовой разряд. Скорость распространения звука в воздухе  $v_g = 3,4 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

6. При переходе света из вакуума в некоторое вещество длина волны уменьшилась на 20 %. Определите показатель преломления  $n$  данного вещества.

## § 15. Интерференция света

- Импульс тела можно скомпенсировать импульсом, имеющим противоположное направление. А можно ли погасить свет светом? При каких условиях два световых пучка при наложении друг на друга образуют темные и светлые полосы? Как осуществить такой эксперимент?



Принцип суперпозиции электрических полей: напряженность  $\vec{E}$  электрического поля системы точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$  в некоторой точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из этих зарядов по отдельности, причем поле каждого не зависит от полей других:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Рассмотрим процесс наложения световых волн длиной  $\lambda$ , возбуждаемых точечными источниками света  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 83). В той области, где эти волны встречаются, происходит их наложение.

Так как световые волны имеют электромагнитную природу, для них так же, как и для электрических и магнитных полей, выполняется принцип суперпозиции (от лат. *superposition* — добавление). Согласно этому принципу колебания, вызванные волнами, складываются таким

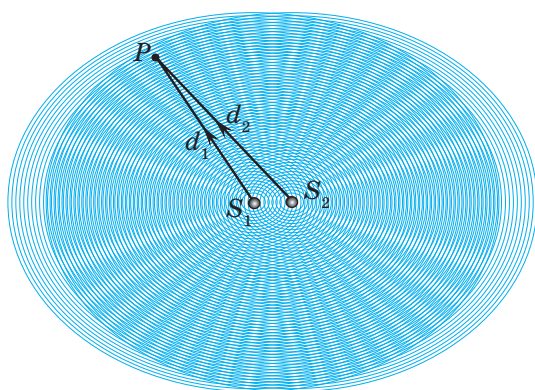


Рис. 83. Процесс наложения когерентных волн. Светлые сектора — максимумы, темные — минимумы

образом, что результирующее электромагнитное поле равно векторной сумме полей, созданных каждой из них:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ ,  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . При этом каждая из волн распространяется независимо от другой. В области, где волны перекрываются, возникает достаточно сложная картина (см. рис. 84). Однако, выйдя из этой области, волны распространяются так, как будто они свободно «проходят друг сквозь друга» и при этом никак не взаимодействуют между собой.

Если в точку  $P$  от монохроматических источников частоты  $\omega$  пришли две волны, прошедшие разные расстояния  $d_1$  и  $d_2$  (рис. 84), то разность расстояний  $\Delta d = d_2 - d_1$  называют *разностью хода*. Поскольку при разности хода  $\Delta d = \lambda$  разность фаз  $\Delta\varphi = 2\pi$ , то можно составить пропорцию  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta d} = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Из этого соотношения находим:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda}. \quad (1)$$

Следовательно, разность фаз  $\Delta\varphi$  определяется разностью хода  $\Delta d$ .

Волны одинаковых частот, разность фаз колебаний которых в каждой точке пространства не изменяется с течением времени, называются **когерентными** (когерентность от лат. *cohaerens* — связанный, сцепленный). Соответственно, свойство, характеризующее согласованность протекания в пространстве и времени нескольких колебательных или волновых процессов, называется **когерентностью**.

Предположим, что приходящие волны будут иметь в точке  $P$  напряженности электрического поля:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(\omega t + \alpha_1), \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(\omega t + \alpha_2), \quad (2)$$

где  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  — амплитуды,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — начальные фазы колебаний в каждой из волн в точке  $P$ .

Напряженность результирующего электрического поля согласно принципу суперпозиции в данной точке в любой момент времени равна векторной сумме напряженностей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  каждой волны по отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (3)$$

Если разность хода волн от источников  $S_1$  и  $S_2$  кратна длине волны  $\Delta d = m\lambda$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то  $\Delta\varphi = 2\pi m$ , и колебания, возбуждаемые волнами в точке  $C$  (рис. 85, *a*), происходят в одинаковой фазе. При этом

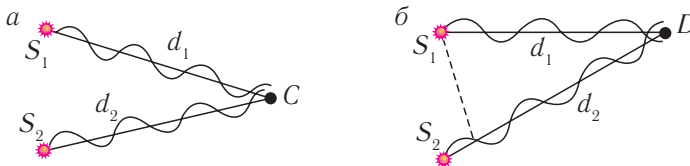


Рис. 85. Сложение монохроматических колебаний двух волн:  
*a* — максимальная амплитуда в точке  $C$ ; *b* — минимальная амплитуда в точке  $D$

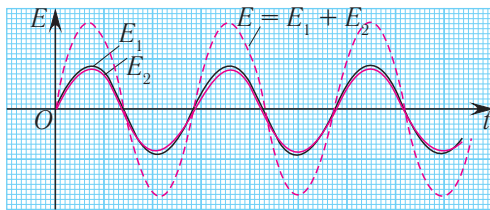


Рис. 86. Наложение волн одинаковых по фазе

$$E_{\max} = E_1 + E_2. \quad (4)$$

Если же разность хода волн в точке  $D$  (рис. 85, б) равна нечетному числу полуволен  $\Delta d = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то  $\Delta\varphi = \pi(2m + 1)$ , и колебания происходят в противофазе. При этом гребень одной волны накладывается на впадину другой.

Таким образом, в этом случае амплитуда результирующего колебания равна модулю разности амплитуд накладываются волн и оказывается минимальной (рис. 87):

$$E_{\min} = |E_1 - E_2|. \quad (5)$$

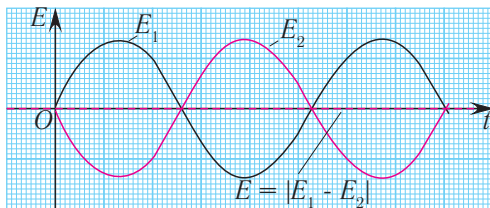


Рис. 87. Наложение волн, противоположных по фазе

Заметим, что во всех других точках амплитуда  $A$  результирующего колебания имеет промежуточное значение

$$E_{\min} \leq E \leq E_{\max}.$$

Приемники излучения фиксируют не саму световую волну, а энергию, принесенную волной в данную

область пространства. Параметром, характеризующим эту энергию, является интенсивность световой волны, которая обозначается латинской буквой  $I$ .

► Согласно теории электромагнетизма интенсивность электромагнитной волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности ее электрического поля  $I \sim \langle E^2 \rangle$ . Символ  $\langle \rangle$  означает усреднение по времени. Аналогичное усреднение можно сделать и для вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .

Исходя из соотношений (4) и (5), видно, что  $I_{\max} \sim (E_1 + E_2)^2$ ,  $I_{\min} \sim (E_1 - E_2)^2$ , т. е. интенсивность результирующей волны не равна сумме интенсивностей исходных волн. Это означает, что волны интерferируют друг с другом.

Вследствие зависимости разности фаз (1) от точки наблюдения, в пространстве получается сложная картина распределения интенсивности результирующей волны. Устойчивое во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве при интерференции называется **интерференционной картиной**.

Таким образом, **интерференция** (от лат. *inter* — взаимно, между собой и *ferio* — ударяю, поражаю) — явление возникновения устойчивой во времени картины чередующихся максимумов и минимумов амплитуд результирующей волны при сложении двух (или нескольких) когерентных волн.

Подчеркнем, что закономерности интерференции справедливы для волн любой природы (рис. 88) (электромагнитных, звуковых, волн на поверхности воды и т. д.), т. е. носят универсальный характер.

При рассмотрении интерференции света (электромагнитных волн) следует учесть, что длина волны света в веществе изменяется в зависимости от показателя преломления вещества. Если одна волна распространяется в веществе с показателем преломления  $n_1$ , а другая — с показателем преломления  $n_2$ , то разность фаз колебаний:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda},$$

где

$$\delta = n_2 d_2 - n_1 d_1 = c \left( \frac{d_2}{v_2} - \frac{d_1}{v_1} \right). \quad (7)$$

Здесь  $\delta$  — **оптическая разность хода** волн от источников до точки наблюдения, а величина  $nd$  — **оптическая длина пути**. Эта величина определяется расстояниями  $d_1$  и  $d_2$ , пройденными световыми волнами с учетом их различных модулей скоростей  $v_2$  и  $v_1$  распространения в этих средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

Таким образом, если оптическая разность хода (7) равна целому числу длин волн в вакууме, то **условие максимума интерференции**:

$$\delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

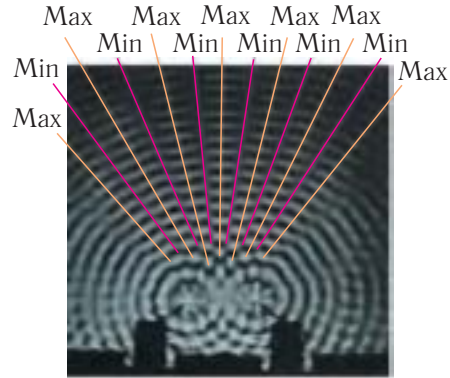


Рис. 88. Интерференционная картина поперечных волн на поверхности воды

Волны приходят в точку  $P$  (см. рис. 85) синфазно, поскольку разность фаз в этом случае кратна  $2\pi$ :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} m\lambda = 2\pi m.$$

Если оптическая разность хода (7) равна нечетному числу полуволен, то условие минимума интерференции:

$$\delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

Волны приходят в точку  $P$  в противофазе, и разность фаз колебаний в этом случае равна:

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi.$$

Для наблюдения интерференции света необходимы когерентные источники, излучающие волны с постоянной во времени разностью фаз. Распространенные обычные источники света (лампы накаливания, лампы дневного света, свечи и т. д.) не являются когерентными. Для того чтобы можно было наблюдать от них интерференцию света, свет от одного и того же источника необходимо разделить на два пучка и затем свести их вместе.

Для получения интерференционной картины пользуются классической **интерференционной схемой (схемой Юнга)**, где пучок света от небольшого отверстия  $A$  в экране разделяется на два когерентных пучка с помощью небольших отверстий  $B$  и  $C$  в следующем экране (рис. 89). Поскольку эти пучки созданы одним и тем же источником  $A$ , они являются когерентными. Поэтому на третьем экране в области  $DE$  перекрытия пучков наблюдается интерференционная картина.

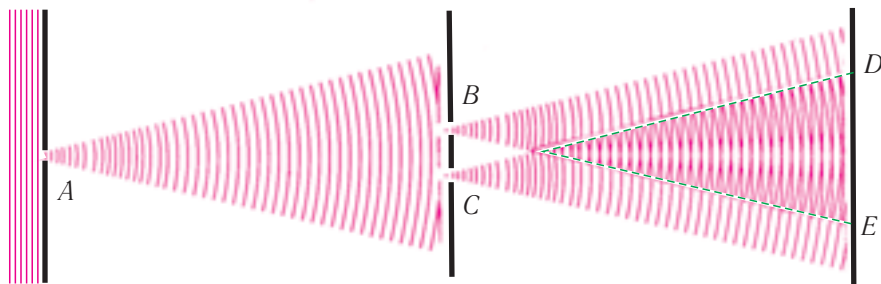


Рис. 89. Схема эксперимента Юнга по интерференции света

Изобретение и распространение когерентных источников излучения — *лазеров* — сделало демонстрацию явления интерференции достаточно простой.

Наиболее известное проявление интерференции, с которым мы часто встречаемся в повседневной жизни — радужное окрашивание мыльных пузырей (рис. 90) или тонких пленок бензина (нефти) на воде или асфальте. Радужные цвета возникают на этих пленках вследствие интерференции света, отраженного двумя поверхностями пленки.



Рис. 90. Интерференция света в мыльном пузыре

► Английский ученый Томас Юнг в 1801 г. провел классический эксперимент по интерференции света (см. рис. 89). Это позволило ему убедительно подтвердить волновую природу света и измерить длину световой волны. Отметим еще один распространенный случай интерференции — сложение волн одинаковой частоты, распространяющихся в противоположных направлениях (например, падающей и отраженной волны), приводящее к образованию в пространстве устойчивой картины чередования максимумов амплитуды колебаний — «пучностей» и минимумов — «узлов» (рис. 91). Волна, возникающая в результате сложения двух волн одинаковой частоты, распространяющихся в противоположных направлениях, называется стоячей волной.

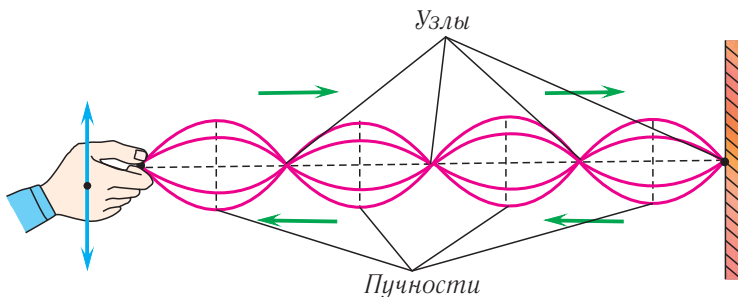


Рис. 91. Стоячая волна



1. Что такое когерентность? Какие волны называются когерентными?
2. Что называют интерференцией волн? При каких условиях происходит это явление?

3. Что называют разностью хода волн? Оптической разностью хода волн?
4. Запишите условия образования интерференционных максимумов и минимумов. Какой должна быть оптическая разность хода двух волн, чтобы их интерференция приводила к ослаблению (усилению) результирующего сигнала?
5. Почему не возникает интерференционной картины от света двух фар автомашины?
6. Если две волны интерферируют друг с другом, то влияет ли одна волна на распространение другой?
7. Почему мыльный пузырь на солнце играет всеми цветами радуги?
8. Почему в тонком слое бензина, плавающем на поверхности воды, возникают радужные полосы?



### Пример решения задачи

Определите положения максимумов и минимумов интерференционной картины на экране, находящемся на расстоянии  $L = AO = 2,0$  м от двух одинаковых когерентных источников света  $S_1$  и  $S_2$ , которые расположены в вакууме на расстоянии  $d = 5,0$  мм друг от друга (рис. 92). Длина волны излучения источников  $\lambda = 600$  нм. Найдите расстояние  $\Delta x$  между соседними максимумами.

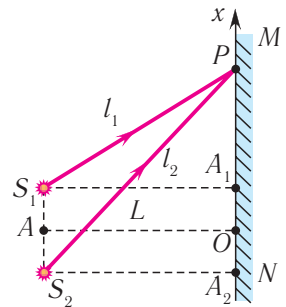


Рис. 92

Дано:

$$d = 5,0 \text{ мм} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$L = 2,0 \text{ м}$$

$$\lambda = 600 \text{ нм} = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$\Delta x$  — ?

Решение

До некоторой точки  $P$  на экране каждая из волн проходит различный путь  $l_1$  и  $l_2$ . Максимумы и минимумы будут наблюдаться при выполнении условий соответственно:

$$\delta = l_2 - l_1 = m\lambda,$$

$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Из треугольников  $S_1PA_1$  и  $S_2PA_2$  по теореме Пифагора находим:

$$l_1^2 = L^2 + \left(x_m - \frac{d}{2}\right)^2, \quad (1)$$

$$l_2^2 = L^2 + \left(x_m + \frac{d}{2}\right)^2, \quad (2)$$

где  $x_m$  — координата точки  $P$ .

Откуда, вычитая из соотношения (2) соотношение (1), получаем:

$$l_2^2 - l_1^2 = 2x_m d.$$



С учетом того что  $d \ll L$  и  $l_1 + l_2 \approx 2L$ , находим:

$$(l_1 + l_2)(l_1 - l_2) \approx 2L(l_1 - l_2) = 2x_m d \Rightarrow l_1 - l_2 = \delta = \frac{x_m d}{L}.$$

Из условия максимумов следует:

$$m\lambda = x_{m\max} \frac{d}{L}.$$

Тогда расстояние от центра экрана до  $m$ -й светлой полосы находится из соотношения:

$$x_{m\max} = m\lambda \frac{L}{d}.$$

Из условия для минимумов находим положение темных полос:

$$(2m + 1) \frac{\lambda}{2} = x_{m\min} \frac{d}{L}.$$

Откуда

$$x_{m\min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}.$$

Расстояние между соседними максимумами:

$$\Delta x = x_{(m+1)\max} - x_{m\max} = \lambda \frac{L}{d},$$

$$\Delta x = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \frac{2,0 \text{ м}}{5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Из полученной формулы видно, что расстояние  $\Delta x$  увеличивается при уменьшении расстояния  $d$  между когерентными источниками.

Ответ:  $x_{m\max} = m\lambda \frac{L}{d}$ ,  $x_{m\min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}$ ,  $\Delta x = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

### Упражнение 11

1. Что будет наблюдаться в некоторой точке пространства в результате интерференции двух когерентных волн длиной волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$ , оптическая разность хода которых  $\delta = 2,25 \text{ мкм}$ ?
2. Сколько длин волн  $N$  монохроматического излучения частотой  $\nu = 800 \text{ МГц}$  укладывается на отрезке длиной  $l = 2,0 \text{ м}$ ?
3. Экран  $MN$  освещен когерентными монохроматическими источниками  $S_1$  и  $S_2$  (см. рис. 92), период колебаний которых  $T$ . Усиление или ослабление света будет наблюдаться в точке  $P$ , если от источника  $S_2$  свет в нее приходит позже на промежуток времени  $\tau = 2,5T$ , чем от источника  $S_1$ ?



## § 16. Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция света. Дифракционная решетка

- Волновые процессы имеют свои специфические закономерности, которые отличают их от других физических процессов. Что это за закономерности? При каких условиях они проявляются? Как их можно использовать?



Среда называется однородной, если ее физические свойства по всему объему одинаковы во всех точках пространства. Среда называется изотропной, если ее физические свойства одинаковы по всем направлениям в пространстве.

Волновая поверхность — это поверхность, все точки которой колеблются в одинаковых фазах, т. е. это поверхность равных фаз. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени  $t$ , называется волновым фронтом (см. § 5).

Волна называется круговой, если ее волновой фронт является окружностью.

Закономерности распространения волн любой природы в различных средах имеют много общего.

Для наглядности рассмотрим процесс распространения волн на поверхности воды. Волны, возбуждаемые точечным источником  $S$ , распространяются по всем направлениям с одинаковой по модулю скоростью  $v$ . Следовательно, фронт волны будет иметь вид окружности (рис. 93, *a*) некоторого радиуса. Если эта волна от точечного источника будет распространяться в однородной изотропной среде, то ее волновой фронт будет иметь вид сферической поверхности.

Как видно из рисунка 93, *a*, если в некоторый момент времени  $t$  фронтволны от источника  $S$  занимал положение  $abc$ , то через промежу-

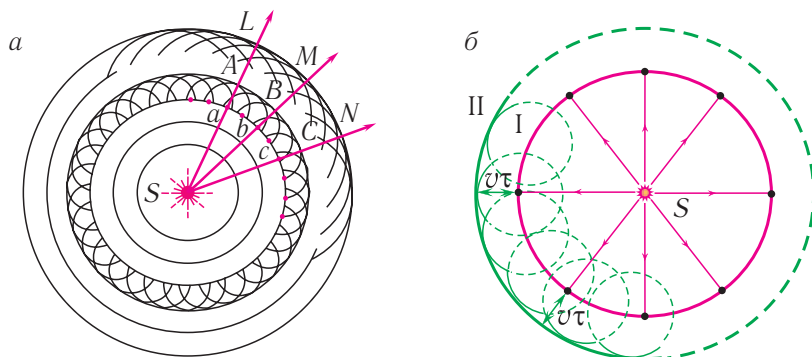


Рис. 93. *a* — объяснение перемещения фронта волны по принципу Гюйгенса; *б* — формирование фронта сферической волны

ток времени  $\tau$  фронт займет уже положение  $ABC$ , точки которого будут удалены от начального фронта волны на расстояние  $l = v\tau$ . В каждом последующем положении волновой фронт будет по-прежнему оставаться сферической поверхностью.

Общие закономерности процесса распространения волн объяснил Х. Гюйгенс, сформулировав в 1690 г. *принцип*, позволяющий определять положение волнового фронта через малый промежуток времени по его положению в данный момент времени. Согласно **принципу Гюйгенса**:

*каждая точка среды, которой волновой фронт достиг в момент времени  $t$ , становится источником вторичных сферических волн. Новое положение волнового фронта через промежуток времени  $\tau$  определяется огибающей волновых фронтов вторичных волн в момент времени  $t + \tau$ .*

Таким образом, согласно принципу Гюйгенса для нахождения положения волнового фронта через промежуток времени  $\tau$  следует провести окружности радиусом  $l = v\tau$ , представляющие собой фронты вторичных волн, с центрами на фронте в положении I (см. рис. 93, б). Соответственно, огибающая волновых фронтов вторичных волн (1, 2, 3 и т. д.) определяет новое положение волнового фронта — положение II. Напомним, что огибающей называется поверхность, касательная ко всем вторичным волнам. На очень больших расстояниях от точечного источника излучаемые им волны можно считать плоскими (рис. 94).

Линия ( $L$ ,  $M$ ,  $N$ ), перпендикулярная волновому фронту (см. рис. 93, а) в данной точке, является **лучом**. Луч определяет направление распространения волны, а также направление переноса энергии волной. Например, будут практически параллельными солнечные лучи, падающие на футбольное поле.

Принцип Гюйгенса объясняет *прямолинейность распространения* волн в однородной среде. Поскольку в такой среде радиусы фронтов вторичных волн ( $v\tau$ ) одинаковы на всех участках (рис. 94), то волновой фронт ( $A'B'$ ) плоской волны с течением времени перемещается в одном и том же направлении, оставаясь параллельным своему начальному положению  $AB$ .

Однако при распространении света вблизи границ непрозрачных тел или прохождении через отверстия в непрозрачных экранах наблюдаются отклонения от закона его прямолинейного распространения. Причем

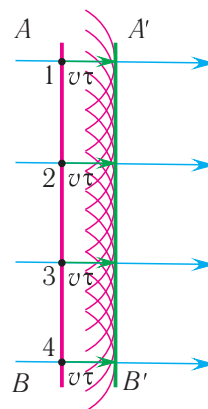


Рис. 94.

Прямолинейное распространение волн (формирование фронта плоской волны)

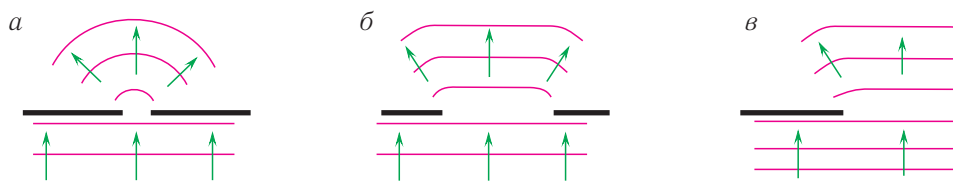


Рис. 95. Дифракция волн на различных препятствиях

отклонение существенно зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия. Действительно, стоя за углом дома, мы хорошо слышим, что едет автомобиль, хотя не видим его, поскольку находимся в области «тени». Таким образом, звуковые волны как бы «заворачивают за угол», в то время как световым волнам этого сделать не удается.

Явление огибания волнами непрозрачных препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией** (рис. 95).

Явление дифракции служит одним из подтверждений волновой природы света. Для проявления дифракции размеры препятствий (отверстий) должны быть меньше или сравнимы с длиной волны, вот почему в рассмо-

тренном примере звук  $\left( v \approx 3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \nu = 1 \cdot 10^2 \text{ Гц}, \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}} = 3 \text{ м} \right)$

от работающего мотора автомобиля смог «завернуть за угол», а свет  $\left( c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \lambda = 500 \text{ нм} = 5,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \right)$ , отраженный от автомобиля, — нет.

Принцип Гюйгенса позволяет находить только направление распространения волнового фронта и не затрагивает вопрос об амплитуде волны, а следовательно, и об интенсивности распространяющихся по разным направлениям волн.

Изучая дифракцию света, французский физик Огюстен Жан Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн, которые являются когерентными. **Принцип Гюйгенса — Френеля** позволил охарактеризовать явление дифракции количественно:

*все источники вторичных волн, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Для расчета амплитуды огибающей волны в данной точке пространства следует учесть интерференцию вторичных волн от всех участков волнового фронта в начальный момент времени (см. рис. 93, а).*

Таким образом, согласно Френелю дифракция света объясняется интерференцией вторичных волн от различных участков волнового фронта в начальный момент времени.

Для наблюдения дифракции света используется *дифракционная решетка*.

**Дифракционная решетка** — оптический прибор, предназначенный для точного измерения длин волн и разложения света в спектр.

Дифракционная решетка состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов (щелей), нанесенных на стеклянную или металлическую поверхность. Длина решеток составляет 10—15 см. Они содержат 10 000—20 000 штрихов на 1 см. Наблюдения проводятся как в отраженном свете (на металлических решетках), так и в проходящем свете (на стеклянных).

Рассмотрим дифракционную решетку, представляющую собой систему из  $N$  одинаковых равноотстоящих параллельных щелей (прозрачные участки) в плоском непрозрачном экране (рис. 96).

Если ширина каждой щели  $b$ , ширина непрозрачной части между щелями  $a$ , то величина  $d = a + b$  называется *постоянной решетки* или ее *периодом*.

Пусть на решетку, постоянная которой равна  $d$ , нормально падает плоская волна, длина которой  $\lambda$ . Из принципа Гюйгенса следует, что волны, дифрагировавшие на щелях, распространяются за решеткой по всем направлениям в пространстве (рис. 97).

Для наблюдения дифракционной картины на экране между ним и решеткой размещают собирающую линзу таким образом, чтобы экран

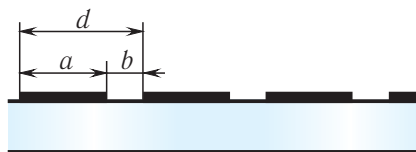


Рис. 96. Дифракционная решетка

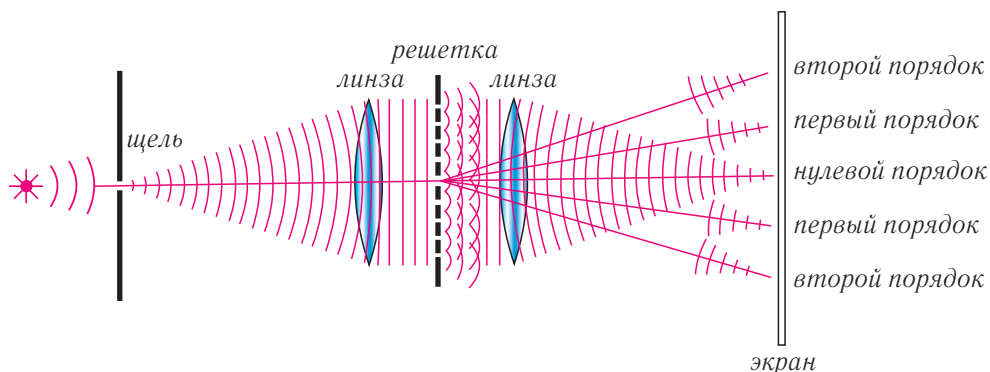


Рис. 97. Схема наблюдения дифракционных максимумов на дифракционной решетке

находился в фокальной плоскости линзы (см. рис. 97). Собирающая линза фокусирует на экране падающие на нее параллельные лучи (вторичные волны).

В зависимости от разности хода между вторичными волнами, испущенными разными щелями, они интерферируют друг с другом, усиливая или ослабляя друг друга. На экране получается *дифракционная картина* в виде системы светлых и темных полос (см. рис. 97). Наиболее яркие дифракционные максимумы получили название *главных дифракционных максимумов*.

При нормальном падении света на дифракционную решетку условие возникновения главных дифракционных максимумов, наблюдаемых под углами  $\theta$ , имеет вид (рис. 98):

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Здесь  $m$  — *порядок максимума* или *порядок спектра*,  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

Полученное условие определяет направления распространения света в пространстве, по которым на отрезке  $\Delta l = d \sin \theta$  укладывается целое число длин волн  $m\lambda$  (см. рис. 98). Следовательно, при выполнении условия (1) вторичные волны от всех щелей решетки приходят в точку

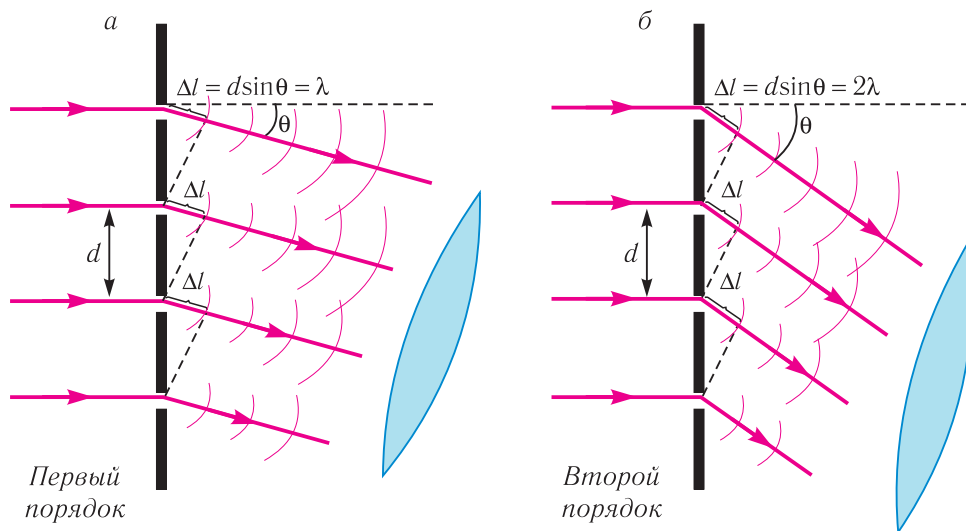


Рис. 98. Геометрия волновой теории дифракционной решетки:  $d$  — период решетки;  $\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $\theta$  — угол дифракции

наблюдения синфазно (с фазами, отличающимися на число, кратное  $2\pi$ ) и усиливают друг друга.

Между максимумами интенсивности расположены минимумы, так как при изменении угла  $\theta$  на отрезке  $\Delta l$  уже не будет укладываться целое число длин волн. Следовательно, вторичные волны приходят в точку наблюдения, ослабляя друг друга.

Из условия возникновения главных дифракционных максимумов (1) следует, что при  $m = 0$  для любых длин волн  $\theta = 0$ . Следовательно, прямо по центру решетки образуется нулевой максимум, который называется также *центральный* максимумом. Дифракционные максимумы, соответствующие  $m = 1$ , образуют спектр *первого порядка*,  $m = 2$  — спектр *второго порядка* и т. д. (см. рис. 97). Количество максимумов  $m$  в дифракционной картине ограничено, поскольку  $|\sin\theta| \leq 1$ . Максимальный порядок спектра  $m_{\max}$ , которой дает дифракционная решетка, при нормальном падении света на нее, определяется из условия  $|\sin\theta| \leq 1$ . Тогда из соотношения (1) следует взять целую часть отношения:

$$m_{\max} = \left[ \frac{d}{\lambda} \right], \quad (2)$$

т. е. зависит от периода решетки и длины световой волны.

Отметим, что при определении максимального порядка спектра необходимо брать целую часть числа  $m_{\max}$ .

Как следует из соотношения (2), для получения спектра первого порядка ( $m_{\max} = 1$ ) необходимо, чтобы период решетки был больше длины световой волны ( $d > \lambda$ ).

При падении на решетку белого света центральный максимум ( $m = 0$ ) представляет собой изображение источника (рис. 99, а), так как в этом направлении собирается излучение всех длин волн. Для всех максимумов ненулевого порядка ( $m \neq 0$ ) в дифракционной решетке синус угла отклонения прямо пропорционален длине волны падающего излучения ( $\sin\theta \sim \lambda$ ). Следовательно, красные лучи, имеющие большую длину волны, чем синие, отклоняются дифракционной решеткой сильнее (рис. 99, б, в). Таким образом, при освещении решетки белым светом справа и слева от центрального мак-

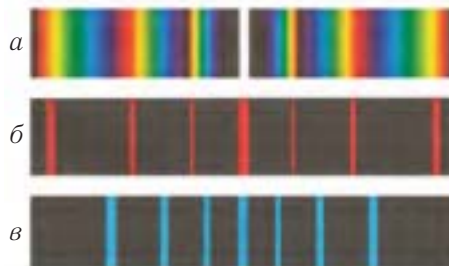


Рис. 99. а — дифракционный спектр белого света; б — дифракционные максимумы красного света; в — дифракционные максимумы синего света

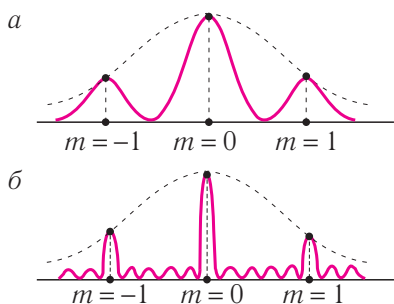


Рис. 100. Изменение дифракционной картины при увеличении числа щелей: *а* — две щели; *б* — шесть щелей

симула наблюдаются максимумы первого, второго и более высоких порядков, обращенных фиолетовым краем к центру дифракционной картины, а красным — от нее (рис. 99, *а*).

С увеличением числа щелей в дифракционной решетке возрастает количество световой энергии, пропускаемой решеткой, следовательно, интенсивность главных максимумов при этом увеличивается. Кроме того, главные максимумы из расплывчатых превращаются в резкие и узкие, которые разделены практически темными промежутками, так как вторичные максимумы

очень слабы и составляют не более 5 % от главного (рис. 100). Поэтому при падении монохроматического излучения на решетки, в которых число штрихов на 1 см достигает  $10^5$ , дифракционный спектр состоит из очень резких линий.

► Первая дифракционная решетка, сконструированная в 1786 г. американским ученым Дэвидом Риттенхаузом, состояла из параллельного ряда волосков диаметром около 0,1 мм и длиной 10 мм, натянутых на расстоянии порядка 0,2 мм один от другого.

Немецкий физик Йозеф Фраунгофер вместо волосков использовал параллельные штрихи, нанесенные на стекло алмазным острием. Фраунгоферу удалось нанести 300 штрихов на 1 мм решетки!



1. Что называют дифракцией света? При каких условиях ее наблюдают?
2. В чем сущность принципа Гюйгенса?
3. Почему при удалении оркестра, когда он оказывается за углом дома, через некоторое время слышны только звуки барабана и труб-басов?
4. В чем сущность принципа Гюйгенса — Френеля?
5. В чем сходство и различие между интерференцией и дифракцией?
6. Что называют дифракционной решеткой? Периодом решетки?
7. Запишите формулу для определения максимумов интенсивности, создаваемой дифракционной решеткой.
8. Почему близорукие люди щурят глаза, чтобы лучше видеть?





### Пример решения задачи

На дифракционную решетку, имеющую  $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ , падает нормально монохроматическое излучение длиной волны  $\lambda = 550 \text{ нм}$ . Определите наибольший порядок  $m_{\text{max}}$  дифракционного максимума, который можно наблюдать.

Дано:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{штр}}{\text{м}}$$

$$m_{\text{max}} \text{ — ?}$$

Решение

Условие дифракционных максимумов:

$$d \sin \theta = \frac{\sin \theta}{N} = m \lambda.$$

Следовательно,

$$\sin \theta = N m \lambda.$$

Наибольший порядок  $m_{\text{max}}$  дифракционного максимума наблюдается при угле  $\theta$ , близком к углу  $90^\circ$ . Вследствие этого будем считать, что

$$\theta_{\text{max}} \approx \frac{\pi}{2}, \text{ т. е. } \sin \theta_{\text{max}} \approx 1,$$

тогда наибольший порядок максимума находится по формуле:

$$m \approx \frac{1}{N \lambda}.$$

Для определения  $m_{\text{max}}$  необходимо взять целую часть полученного значения:

$$m_{\text{max}} = \left[ \frac{1}{N \lambda} \right] = \left[ \frac{1 \text{ м}}{5 \cdot 10^5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \right] = [3,6] = 3.$$

Ответ:  $m_{\text{max}} = 3$ .

### Упражнение 12

1. Под каким углом  $\theta$  наблюдается максимум третьего порядка при нормальном падении света длиной волны  $\lambda = 840 \text{ нм}$  на дифракционную решетку с периодом  $d = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ ?
2. Рассчитайте число штрихов  $N$  на миллиметр дифракционной решетки, если измеренный угол  $\theta = 46^\circ 43'$  и красная линия спектра кадмия первого порядка имеет длину волны  $\lambda = 644 \text{ нм}$ . Сделайте аналогичные вычисления, если под этим углом видна линия второго порядка.
3. Сколько штрихов  $N$  на 1 см должна иметь дифракционная решетка, если спектр второго порядка отсутствует в видимой области?

4. Определите наибольший порядок  $m_{\max}$  спектра, наблюдаемого при нормальном падении монохроматического света на дифракционную решетку, имеющую  $N = 500 \frac{\text{шт}}{\text{мм}}$ , если длина волны света  $\lambda = 520 \text{ нм}$ .
5. Монохроматический свет падает нормально на дифракционную решетку. Дифракционный максимум первого порядка наблюдается под углом  $\theta = 12^\circ$ . Сколько других порядков  $m$  может наблюдаться и под какими углами?
6. Свет с длинами волн от  $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$  до  $\lambda_2 = 780 \text{ нм}$  падает нормально на дифракционную решетку. В каких порядках может произойти перекрытие максимумов и минимумов? Зависит ли ответ от ширины щели?



§16-1

## § 17. Прямолинейное распространение и отражение света. Зеркала

- Интересные явления наблюдаются при отражении света от границы раздела двух сред. Как происходит отражение света (рис. 101)? Как можно управлять световым лучом?



**Закон прямолинейного распространения света:** в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.

**Закон независимости световых лучей:** распространение световых лучей в веществе происходит независимо друг от друга.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом падения.

Угол, образованный отраженным лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом отражения.

**Закон отражения света:** лучи, падающий и отраженный, а также перпендикуляр к отражающей поверхности, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения.



Рис. 101. Изображение в плоском зеркале

Для изучения свойств электромагнитных волн необходимо знать как закономерности их распространения в однородной среде, так и отражения и преломления на границе раздела двух сред.

**Геометрической оптикой** называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения оптического излучения на основе представления о световых лучах. В геометрической оптике волновая природа света не учитывается. Условимся изображать световые лучи



Рис. 102. Световой пучок

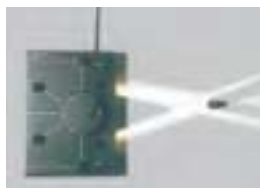


Рис. 103. Прямолинейное распространение света

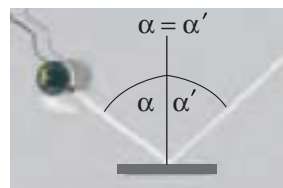


Рис. 104. Отражение света

графически с помощью геометрических лучей. Геометрическому лучу на практике соответствует тонкий *световой пучок*, получаемый при пропускании светового излучения, идущего от удаленного источника, через отверстие (диафрагму) в экране (рис. 102).

Таким образом, следует различать геометрический луч (математическое понятие) и световой пучок (материальный объект), получаемый от источника света.

Уже в начальные периоды оптических исследований были экспериментально установлены четыре основных закона геометрической оптики:

**закон прямолинейного распространения света** (рис. 102, 103);

**закон независимости световых лучей;**

**закон отражения световых лучей** (рис. 104);

**закон преломления световых лучей** (рис. 105).

В законе прямолинейного распространения света, законах отражения и преломления света использовались понятия «световой пучок» и «световой луч», причем последний рассматривался как бесконечно тонкий пучок. Световой поток можно разделить на отдельные световые пучки, выделяя их при помощи диафрагм (см. рис. 103).

Лучи, выходящие из одной точки, называют **расходящимися**, а собирающиеся в одной точке — **сходящимися** (рис. 106).

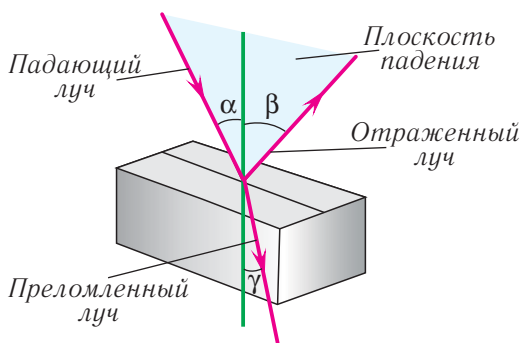


Рис. 105. Преломление и отражение света на границе раздела сред

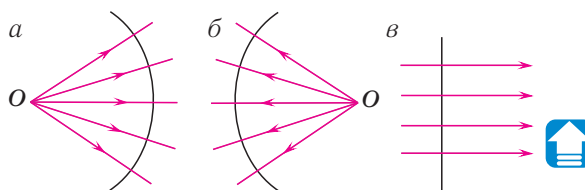


Рис. 106. Пучки света: а — расходящийся; б — сходящийся; в — параллельный

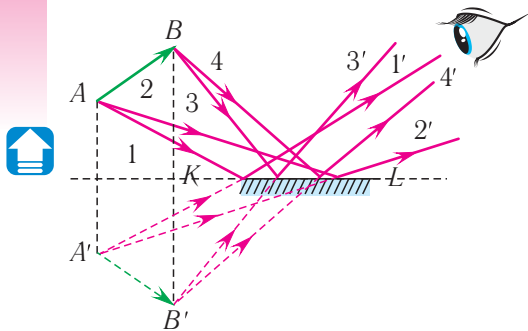


Рис. 107. Построение изображения предмета в плоском зеркале

сделаем для точки  $B$ . Глазу наблюдателя будет казаться, что лучи вышли из точек  $A'$  и  $B'$ , т. е. из крайних точек изображения  $A'B'$  предмета  $AB$ .

В оптике изображение называется **действительным**, если оно образовано самими лучами (т. е. в данную точку поступает световая энергия). Если же изображение образовано не самими лучами, а их продолжениями, то говорят, что изображение **мнимое** (световая энергия не поступает в данную точку).

Изображение называется **прямым**, если изображение ориентировано так же, как предмет. Если же изображение перевернуто, то его называют **обратным** или **перевернутым**.

Таким образом, изображение предмета в плоском зеркале — мнимое прямое, в натуральную величину. Оно симметрично предмету относительно плоскости зеркала и находится на таком же расстоянии за плоскостью зеркала, как и сам предмет

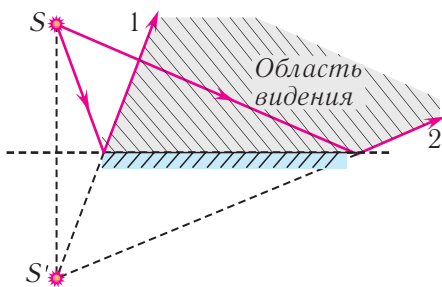


Рис. 108. Построение изображения источника и области видения в плоском зеркале

Как видно из рисунка 106, сферической волне соответствует расходящийся пучок световых лучей, а плоской — параллельный пучок.

Используя закон отражения, можно построить изображение предмета  $AB$  в **плоском зеркале** (рис. 107), представляющем собой плоскую отражающую поверхность. Построив ход лучей 1 и 2 от точки  $A$  после отражения от зеркала  $KL$ , продолжим их до пересечения в точке  $A'$ . Аналогичные построения

сделаем для точки  $B$ . Глазу наблюдателя будет казаться, что лучи вышли из точек  $A'$  и  $B'$ , т. е. из крайних точек изображения  $A'B'$  предмета  $AB$ .

На рисунке 108 приведен пример построения области видения источника  $S$  в плоском зеркале. Для его построения необходимо построить ход лучей 1 и 2, направленных на края зеркала. Область (заштрихованная) между отраженными лучами и дает область, находясь в которой можно увидеть источник.



1. Что называют лучом? Можно ли считать лучом очень узкий пучок света?
2. Какому закону подчиняется распространение света в однородной прозрачной среде?
3. Как следует расположить точечный источник света, плоский предмет и экран, чтобы контур тени на экране был геометрически подобен контуру предмета?
4. Какими станут параллельный, сходящийся и расходящийся пучки света после отражения от плоского зеркала?
5. Какое изображение называется: а) действительным; б) мнимым; в) прямым; г) обратным? Назовите характеристики изображений в плоском зеркале.
6. Как расположено изображение в плоском зеркале?

### Пример решения задачи

Луч света, отраженный от плоского зеркала, падает перпендикулярно на плоский экран, установленный на расстоянии  $l = 5,0$  м от зеркала (рис. 109). На какое расстояние  $d$  переместится световой зайчик на экране, если зеркало повернуть на угол  $\varphi = 15^\circ$  вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала и перпендикулярной к плоскости, в которой находятся падающий и отраженный лучи?

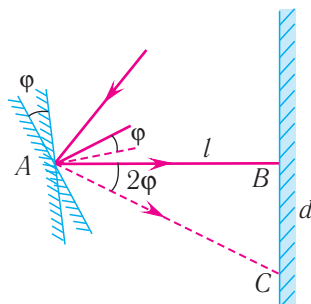


Рис. 109

Дано:

$$l = 5,0 \text{ м}$$

$$\varphi = 15^\circ$$

$$d = ?$$

Решение

При повороте зеркала на угол  $\varphi$  перпендикуляр к зеркалу также повернется на угол  $\varphi$ . Следовательно, угол падения лучей увеличится также на угол  $\varphi$  (см. рис. 109). В соответствии с законом отражения на такую же величину возрастет и угол отражения.

Таким образом, суммарный поворот отраженного луча составит  $2\varphi$ .

Следовательно, смещение светового зайчика на экране равно длине катета  $BC$  прямоугольного треугольника  $ABC$

$$d = l \cdot \operatorname{tg}(2\varphi),$$

$$d = 5,0 \text{ м} \cdot \operatorname{tg}(2 \cdot 15^\circ) = 2,9 \text{ м}.$$

Ответ:  $d = 2,9$  м.



### Упражнение 13

1. Определите угол падения  $\alpha$  солнечных лучей, если столб высотой  $H = 5,0$  м отбрасывает тень длиной  $l = 2,5$  м.
2. Определите высоту  $H$  дерева, если тень от него имеет длину  $l_1 = 3,5$  м, а установленная вертикально линейка длиной  $l = 30$  см отбрасывает тень длиной  $l_2 = 20$  см.
3. Вы хотите сфотографировать себя в зеркале с расстояния  $l = 2,2$  м. Можно ли это сделать? Если да, то на какое расстояние  $x$  должен быть сфокусирован объектив фотоаппарата.
4. Человек, глаза которого находятся на высоте  $h = 1,48$  м над полом, стоит перед плоским вертикальным зеркалом на расстоянии  $l = 2,70$  м от него. Нижний край зеркала расположен на высоте  $a = 40$  см над полом. На каком расстоянии  $b$  от зеркала находится ближайшая точка, которую видно в него?
5. Постройте изображение предмета  $AB$  в плоском зеркале  $KL$  (рис. 110). Определите графически область его видения.
6. Если мальчик приближается к плоскому зеркалу со скоростью  $v = 0,60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , то с какой скоростью необходимо удалять зеркало от него, чтобы расстояние между мальчиком и его изображением не изменялось?

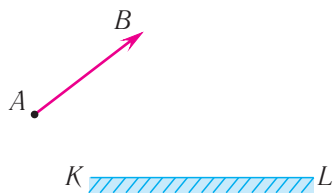


Рис. 110



## § 18. Вогнутые и выпуклые сферические зеркала. Построение изображений

- Каждое утро, умываясь, вы смотрите в плоское зеркало и видите свое четкое отражение в нем. Но поверхность зеркала может быть не только плоской, но и искривленной. Параллельные лучи света, отражаясь от искривленной поверхности, не останутся параллельными. Но отражаются они упорядоченно и могут как сходиться, так и расходиться (рис. 111).

Самый простой пример искривленной отражающей поверхности — сферическая поверхность. Зеркало с такой поверхностью называют **сферическим**.



Рис. 111. Отражения от искривленной зеркальной поверхности

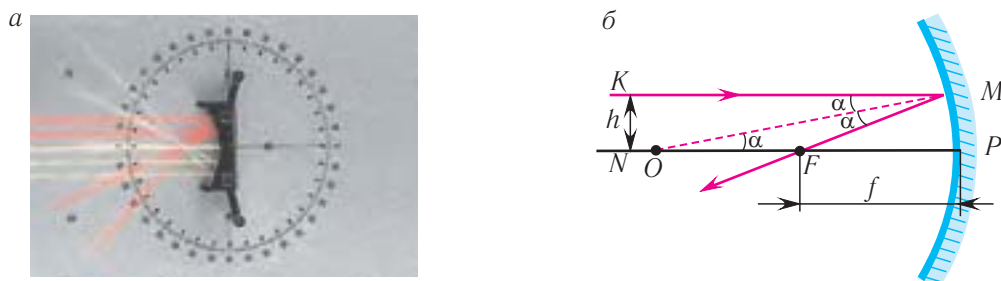
Рис. 112. Сферические зеркала: *a* — вогнутое; *б* — выпуклое

Различают два типа сферических зеркал: *вогнутые*, если зеркальной является внутренняя поверхность сферы (рис. 112, *a*), и *выпуклые*, если — внешняя (рис. 112, *б*).

#### Основные характеристики сферических зеркал

Рассмотрим основные характеристики сферических зеркал на примере вогнутого зеркала (рис. 113). Центр сферы  $O$  называется **оптическим центром** зеркала, его радиус  $R$  — **радиусом** зеркала. Вершина шарового сегмента  $P$  называется **полюсом** зеркала. Прямая линия  $OP$ , проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется **главной оптической осью**. Любая прямая, например прямая  $OM$ , проходящая через оптический центр  $O$  и поверхность зеркала (за исключением его главной оптической оси), называется **побочной оптической осью**.

Так как поверхность зеркала сферическая, то из ее геометрических свойств следует, что любая оптическая ось перпендикулярна поверхности зеркала. Поэтому луч, идущий по направлению к зеркалу по какой-либо из оптических осей, отразившись от зеркала, пойдет по той же самой оптической оси, но уже в обратном направлении.

Рис. 113. Вогнутое сферическое зеркало:  
*a* — ход лучей параллельных главной оптической оси; *б* — основные элементы

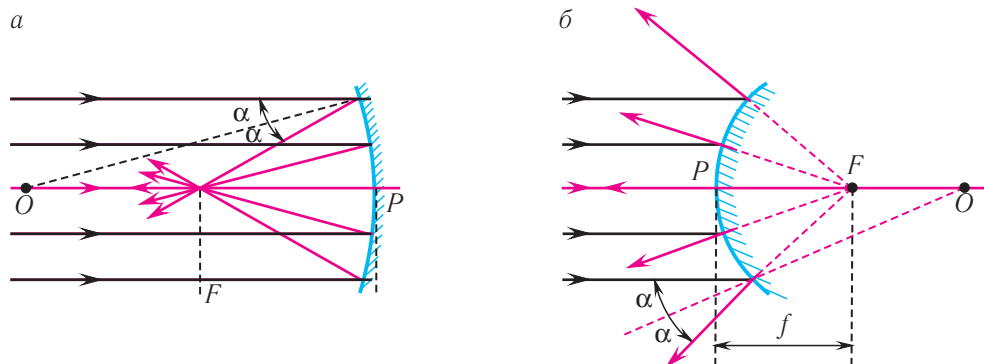


Рис. 114. Построение хода лучей, параллельных главной оптической оси, в зеркалах: *a* — вогнутом; *б* — выпуклом

В плоских зеркалах изображение точечного источника всегда является точечным. Сферические зеркала дают неискаженные изображения только в том случае, если предмет достаточно мал и лучи распространяются вблизи главной оптической оси.



Если направить пучок лучей параллельно главной оптической оси вогнутого сферического зеркала, то все они пересекут главную оптическую ось в одной и той же точке на расстоянии  $F = \frac{R}{2}$  (рис. 113, 114, *a*). Аналогичные построения можно сделать и для выпуклого зеркала (рис. 114, *б*). Только в отличие от вогнутого зеркала пересекаться в фокусе будут не лучи, а их продолжения. Эта точка находится на главной оптической оси на расстоянии  $F = \frac{R}{2}$  от полюса зеркала — в мнимом фокусе.

Точка  $F$  (см. рис. 113, 114) называется **главным фокусом зеркала**. Расстояние  $PF = F$  от вершины зеркала до фокуса называется **фокусным расстоянием**. Фокусное расстояние зеркала равно половине радиуса его кривизны. Плоскость, проходящая через главный фокус  $F$  линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной**.

Из свойства обратимости оптических лучей следует, что луч, идущий от источника и проходящий через фокус  $F$ , после отражения пойдет параллельно главной оптической оси.

При падении пучка параллельных лучей под углом к главной оптической оси лучи после отражения пересекут побочную оптическую ось в точке, называемой *побочным фокусом*  $F'$  (рис. 115).

### Построение изображений в сферических зеркалах

Для построения изображения любой точки в сферическом зеркале достаточно построить ход двух любых лучей в зеркале и найти их точку



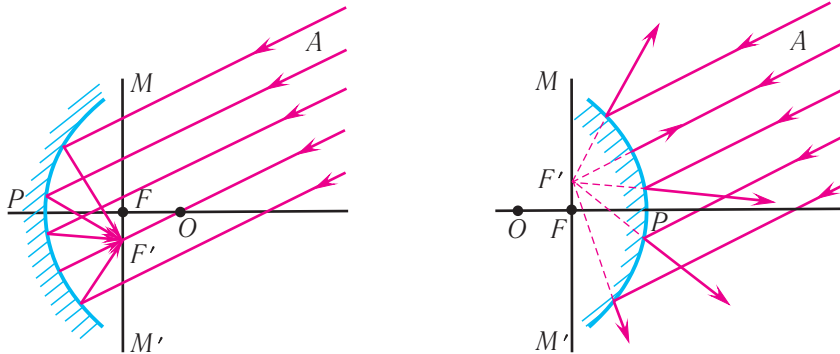


Рис. 115. Отражение пучка лучей, параллельных побочной оптической оси

пересечения. Естественно, что для этого следует выбрать лучи, построить ход которых в зеркале проще всего.

Как правило, для построений выбирают один из **четырёх стандартных (характерных) лучей** (рис. 116):

луч (1) — **через центр зеркала** — отраженный луч пойдет по тому же направлению в обратную сторону;

луч (2) — **параллельный главной оптической оси** — отраженный луч проходит через главный фокус;

луч (3) — **через главный фокус** — отраженный луч проходит параллельно главной оптической оси;

луч (4) — **падающий на зеркало в его полюсе** — отраженный луч идет симметрично главной оптической оси.

**Характеристики изображений**

Если предмет  $AB$  (см. рис. 116, 117) перпендикулярен главной оптической оси в вогнутом сферическом зеркале, то его изображение будет

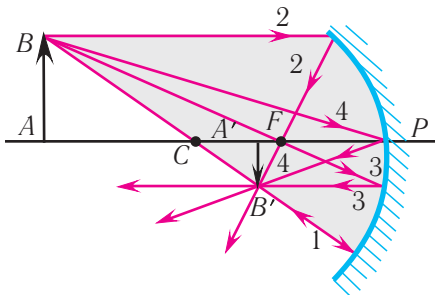


Рис. 116. Стандартные лучи в сферическом зеркале

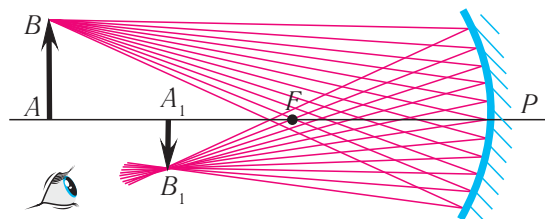


Рис. 117. Формирование действительного изображения в вогнутом сферическом зеркале

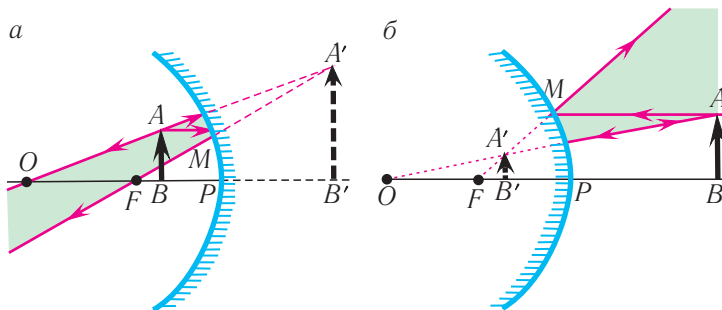


Рис. 118. Построение изображения в зеркалах: *a* — вогнутом; *б* — выпуклом

также перпендикулярно этой оси. Поэтому достаточно построить изображение только точки *B*. Из свойств обратимости светового луча следует, что предмет *AB* и его изображение  $A_1B_1$  можно поменять местами. Если предмет находится за оптическим центром зеркала, то изображение  $A_1B_1$  предмета — **действительное, обратное и уменьшенное** — находится между главным фокусом и центром зеркала (рис. 117).

Если предмет находится между фокусом и оптическим центром зеркала (см. рис. 117), то изображение  $A_1B_1$  предмета — **действительное, обратное и увеличенное** — находится за центром зеркала.

Если предмет находится между полюсом зеркала и его фокусом, то изображение  $A_1B_1$  предмета — **мнимое, прямое и увеличенное** — находится за зеркалом (рис. 118, *a*).

Построим изображение предмета *AB* в выпуклом зеркале (рис. 118, *б*). Изображение в таком зеркале **всегда** получается **прямым, мнимым, уменьшенным**.

Все возможные изображения предметов в сферических зеркалах построены на рисунке 119.

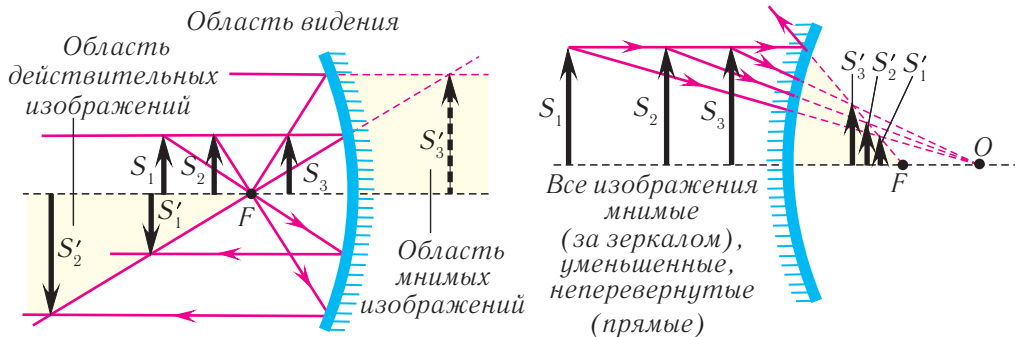


Рис. 119. Изображения предметов в вогнутом и выпуклом зеркалах

Поскольку вогнутые зеркала фокусируют любое электромагнитное излучение, то они находят широкое применение в радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии, в телевидении. В частности, вогнутые зеркала применяют в телескопах — приборах для наблюдения звезд, галактик.

► Чертеж первого прожектора был составлен Леонардо да Винчи в Атлантическом кодексе. Первый прожектор был построен в 1779 г. русским механиком И. П. Кулибиным.

В настоящее время широко применяются светодиодные прожекторы (рис. 120). Они имеют рекордно низкое потребление электроэнергии, большой ресурс работ, небольшой вес, большую компактность и могут работать в широком температурном диапазоне.

Первый зеркальный телескоп-рефлектор был построен в 1668 г. И. Ньютоном (рис. 121).

Современные телескопы-рефлекторы имеют зеркала большого диаметра. Так, диаметр главного зеркала телескопа Маунт-Паломарской обсерватории в США — 5 м, а диаметр телескопа специальной обсерватории на Северном Кавказе в России — 6 м.



Рис. 120. Светодиодные прожекторы

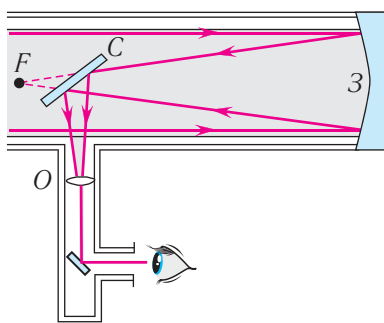


Рис. 121. Телескоп-рефлектор Ньютона и ход лучей в нем



1. Дайте определение сферических зеркал и их классификацию.
2. Дайте определения основных элементов сферических зеркал.
3. Что называется главным фокусом зеркала? Фокальной плоскостью?
4. Какие лучи используются для построения в сферических зеркалах?
5. Что такое побочная оптическая ось и побочный фокус?
6. Какие изображения получаются в сферических зеркалах: а) вогнутых; б) выпуклых?

### Пример решения задачи

С помощью сферического зеркала получено изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  (рис. 122). Определите построением положение и фокус зеркала. Установите также тип зеркала (вогнутое или выпуклое). Известно, что  $BB_1$  — оптическая ось зеркала.

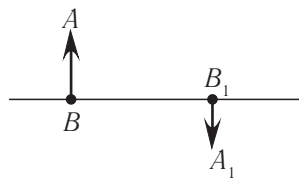


Рис. 122

### Решение

Как видно из рисунка 123, изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  является обратным и действительным. Следовательно, зеркало является вогнутым, поскольку только вогнутое зеркало дает действительное изображение. Соединим прямой линией точки  $A$  и  $A_1$ . Точка  $O$  пересечения прямых  $AA_1$  и  $BB_1$  является центром кривизны сферического зеркала. Отразим точку  $A$  симметрично относительно оси  $AB_1$  в точку  $C$ . Проведем прямую  $CA_1$  до пересечения с прямой  $BB_1$ . Точка  $P$  пересечения будет полюсом вогнутого сферического зеркала. Разделив отрезок  $OP$  пополам, найдем положение фокуса  $F$  вогнутого зеркала.

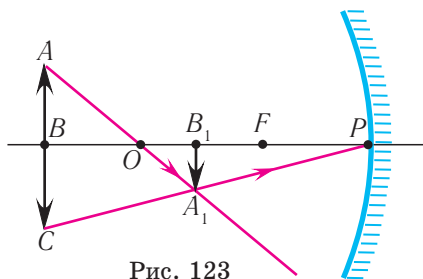


Рис. 123

Ответ: зеркало является вогнутым.

### Упражнение 14

1. Постройте изображения предметов в вогнутых сферических зеркалах (рис. 124).

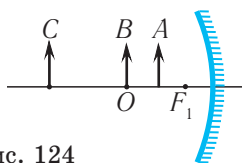


Рис. 124

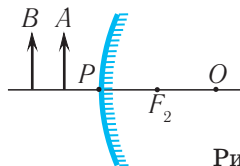


Рис. 125

2. Постройте изображения предметов в выпуклых сферических зеркалах (рис. 125).
3. Постройте ход лучей в вогнутых сферических зеркалах (рис. 126).
4. Постройте ход лучей в выпуклых сферических зеркалах (рис. 127).

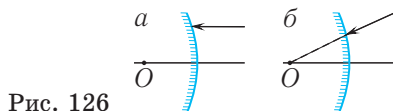


Рис. 126

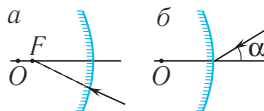


Рис. 127

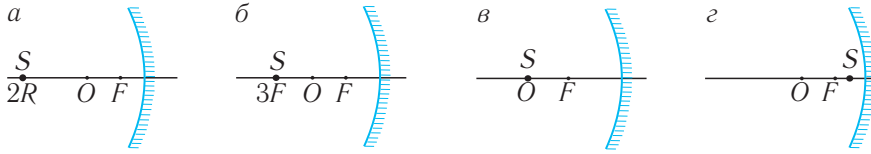


Рис. 128

5. Постройте изображение точечного источника света, находящегося в точке  $S$  (рис. 128).



§18-1

## § 19. Закон преломления света. Показатель преломления. Полное отражение

- Что происходит со световым лучом, прошедшим во вторую среду? Как можно управлять световым лучом?



Изменение направления распространения луча света при прохождении через границу раздела двух сред называется преломлением света (рис. 129).

Угол между перпендикуляром, восстановленным в точке падения к границе раздела двух сред, и преломленным лучом называется углом преломления.

Для изучения свойств световых волн необходимо знать закономерности их распространения в однородной среде, а также закономерности отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Рассмотрим падение плоской световой волны на плоскую поверхность раздела однородных изотропных и прозрачных сред при условии, что размеры поверхности раздела намного больше длины волны падающего излучения.

Пусть на плоскую поверхность раздела  $LM$  двух сред падает плоская световая волна, фронт которой  $AB$  (рис. 130). Если угол падения  $\alpha$  отличен от нуля, то различные точки фронта  $AB$  волны достигнут границы раздела  $LM$  не одновременно.

Рассмотрим, что будет происходить во второй среде, считая, что модуль скорости  $v_2$  распространения света в ней меньше, чем в первой



Рис. 129. Преломление света на границе раздела двух сред

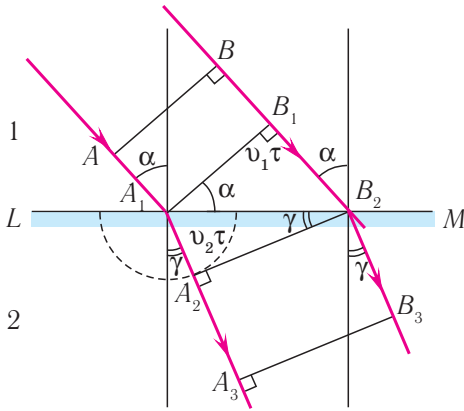


Рис. 130. Объяснение преломления света в соответствии с принципом Гюйгенса:  $AB$  — фронт падающей плоской волны;  $A_3B_3$  — фронт волны после преломления

( $v_2 < v_1$ ) (см. рис. 130). Фронт падающей волны  $AB$  будет перемещаться со скоростью, модуль которой  $v_1$ , по направлению  $AA_1$ . К моменту времени (за промежуток времени  $\tau = \frac{B_2B_1}{v_1}$ ),

когда точка  $B_1$  фронта достигнет границы раздела двух сред (точка  $B_2$ ), вторичная волна из точки  $A_1$  (согласно принципу Гюйгенса) пройдет расстояние  $l_2 = v_2\tau$ . Фронт волны, распространяющейся во второй среде, можно получить, проводя прямую линию, касательную к полуокружности с центром в точке  $A_1$ .

Из построения видно, что  $\angle B_1A_1B_2 = \alpha$ ,  $\angle A_1B_2A_2 = \gamma$ , как углы с взаимно перпендикулярными сторонами.

Из  $\Delta A_1B_1B_2$  находим  $A_1B_2 = \frac{v_1\tau}{\sin \alpha}$  и из  $\Delta A_1A_2B_2$  —  $A_1B_2 = \frac{v_2\tau}{\sin \gamma}$ .

Откуда

$$\frac{v_1\tau}{\sin \alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin \gamma}.$$

Из него следует закон преломления:

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

Напомним, что абсолютным показателем преломления называется отношение модуля скорости распространения световой волны в вакууме  $c$  к модулю скорости распространения в данной среде:

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

С учетом этого соотношения закон преломления принимает вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Величина

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

равная отношению абсолютных показателей преломления  $n_2$  второй и  $n_1$  первой сред, называется **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. В отличие от абсолютного показателя преломления относительный показатель преломления может быть и меньше единицы, если  $n_2 < n_1$ .

Таким образом, исходя из волновой теории света, получен **закон преломления световых волн (света)**:

**отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой;**

**лучи, падающий и преломленный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к плоскости границы раздела двух сред.**

Для наблюдения явления преломления света достаточно поместить карандаш в стакан с водой и посмотреть на него со стороны — карандаш будет казаться «надломленным» (преломленным) (см. рис. 129), оставаясь при этом совершенно целым.

► Перепишем закон преломления в следующем виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

При такой записи закона преломления (без дроби) необходимо всегда умножать абсолютный показатель преломления на синус угла, относящийся к одной и той же среде.

На границе раздела двух прозрачных сред обычно одновременно с преломлением наблюдается отражение волн. Согласно закону сохранения энергии сумма энергий отраженной  $W_{\text{отр}}$  и преломленной  $W_{\text{прел}}$  волн равна энергии падающей волны  $W_{\text{пад}}$  (рис. 131):

$$W_{\text{пад}} = W_{\text{прел}} + W_{\text{отр}}.$$

Примерный баланс энергий между отраженной и преломленной волнами приведен на рисунке 131.

Причиной преломления волн, т. е. изменения направления распространения волн на границе раздела двух сред, является изменение модуля

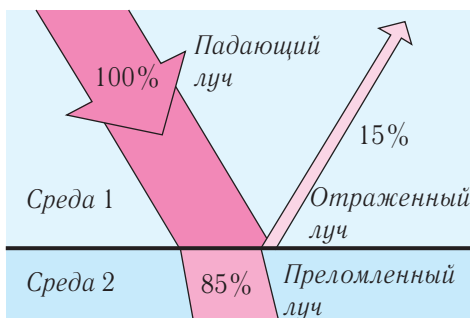


Рис. 131. Баланс энергий при отражении и преломлении света на границе раздела прозрачных сред

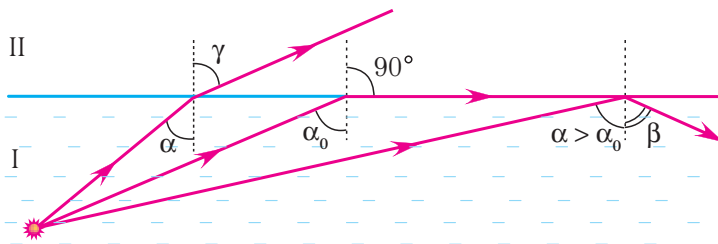


Рис. 132. Преломление и отражение света на границе раздела сред

скорости распространения электромагнитных волн при переходе излучения из одной среды в другую.

Как следует из закона преломления, при переходе света из *оптически более плотной* среды I (с большим абсолютным показателем преломления  $n_1$ ) в *оптически менее плотную* среду II (с меньшим показателем преломления  $n_2$ ) угол преломления  $\gamma$  становится больше угла падения  $\alpha$  (рис. 132, 133).

По мере увеличения угла падения, при некотором его значении  $\alpha_0$ , угол преломления станет  $\gamma = 90^\circ$ , т. е. свет не будет попадать во вторую среду.



Это явление называется **полным отражением света** (рис. 133). Угол  $\alpha_0$ , при котором возникает полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**. Он определяется из закона преломления при условии, что угол преломления  $\gamma = 90^\circ$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}; \quad (n_2 < n_1).$$

Таким образом, преломленная волна отсутствует при углах падения, больших предельного угла  $\alpha \geq \alpha_0$ . Например, для границы вода ( $n = 1,33$ ) — воздух предельный угол полного отражения  $\alpha_0 = 49^\circ$ , для границы алмаз ( $n = 2,42$ ) — воздух —  $\alpha_0 = 24^\circ$ .



Рис. 133. Полное отражение света на границе раздела сред



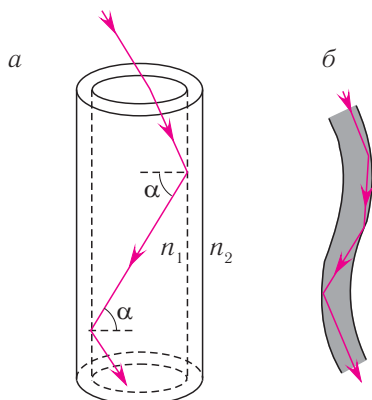


Рис. 134. Ход лучей в световоде:  
а — прямом; б — гибком



Рис. 135. Световоды

Явление полного отражения используют в волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких световодов (рис. 134, 135), а также в различных отражательных призмах различных оптических приборов. В волоконно-оптических устройствах, в которых свет распространяется по тонким световодам, стеклянная световедущая жила которых покрыта слоем вещества с меньшим показателем преломления.

► В 1954 г. белорусским физиком, академиком Федором Ивановичем Федоровым было теоретически предсказано новое физическое явление — поперечное смещение (перпендикулярно плоскости падения) светового пучка при его полном отражении. Это смещение пучка намного меньше длины волны и для его наблюдения световой пучок должен быть ограниченным в поперечном направлении. В 1969 г. французским физиком К. Эмбером оно было подтверждено экспериментально и получило название «сдвиг Федорова».



В 2009 г. китайский ученый Чарльз Као удостоен Нобелевской премии по физике за выдающийся вклад в исследование световодов для оптической связи.



1. Какое явление называется преломлением света?
2. Что является причиной преломления света на границе раздела сред?
3. Объясните, почему карандаш, опущенный в воду, кажется сломанным (см. рис. 129).
4. Сформулируйте закон преломления света.
5. Что называется полным отражением света? При каких условиях оно наблюдается?

6. По какой формуле рассчитывается предельный угол полного отражения света?
7. Чему равен угол преломления при нормальном падении света на границу двух сред?
8. Почему кажущаяся глубина водоема меньше действительной?
9. Для чего аквалангисты надевают маски на глаза при погружения в воду?

### Пример решения задачи

Определите угол падения  $\alpha$  луча из воздуха на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , если угол между отраженным и преломленным лучами равен  $\varphi = 90^\circ$ .

Дано:

$$n = 1,5$$

$$n_{\text{в}} = 1,0$$

$$\varphi = 90^\circ$$

$\alpha$  — ?

Решение

Из закона преломления света находим:

$$\sin \alpha = n \sin \gamma.$$

Из геометрического построения (рис. 136) следует, что угол отражения и преломления связаны соотношением:

$$\beta + \gamma = 90^\circ.$$

$$\gamma = 90^\circ - \beta.$$

Подставляем найденный угол  $\gamma$  в закон преломления и с учетом закона отражения ( $\beta = \alpha$ ) определяем искомый угол падения:

$$\sin \alpha = n \sin(90^\circ - \beta) = n \sin(90^\circ - \alpha) = n \cos \alpha.$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = n, \quad \operatorname{tg} \alpha = 1,5, \quad \alpha = 56^\circ.$$

Ответ:  $\alpha = 56^\circ$ .

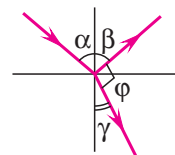


Рис. 136

### Упражнение 15

1. Определите глубину реки  $H$ , если человеку, смотрящему нормально к ее поверхности, она кажется равной  $h = 4,0$  м. Показатель преломления воды относительно воздуха принять  $n = \frac{4}{3}$ .
2. Найдите относительный показатель преломления  $n_{21}$  второй среды относительно первой, если угол отражения луча на границе раздела двух сред  $\alpha = 40^\circ$ , а угол его преломления —  $\gamma = 46^\circ$ .
3. Определите угол падения  $\alpha$  луча света на поверхность стекла из воздуха, если угол преломления в  $k = 2,0$  раза меньше угла падения. Показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

4. Определите предельный угол полного отражения  $\alpha_2$  на границе вещества со стеклом (показатель преломления стекла  $n = 1,42$ ), если на границе этого вещества с воздухом ( $n_{\text{в}} = 1,0$ ) предельный угол полного отражения  $\alpha_1 = 45^\circ$ .
5. Определите угол падения  $\alpha$  луча света из воздуха на поверхность стекла с показателем преломления  $n = 1,6$ , если угол преломления этого луча  $\gamma = 29^\circ$ .
6. Определите угол падения  $\alpha$  на плоскую границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1,7$ , если луч отраженный перпендикулярен лучу преломленному.
7. Свет распространяется вдоль оптического волокна с показателем преломления  $n_1 = 1,60$ . Определите показатель преломления  $n_2$  оболочки, если предельный угол полного отражения равен  $\alpha_{\text{пр}} = 85,0^\circ$ .



## § 20. Прохождение света через оптические элементы

- Законы отражения и преломления света широко используются для управления ходом световых пучков. Для отражения света в приборах применяются зеркала и призмы, для преломления — призмы, плоскопараллельные пластинки (рис. 137), линзы. Зеркала, призмы, пластинки и линзы являются элементами, комбинируя которые создают различные оптические приборы. Как они работают?

Рассмотрим отдельные элементы оптических приборов.

### Плоскопараллельная пластинка

Рассмотрим ход светового луча от источника в плоскопараллельной пластинке толщиной  $d$ , находящейся в воздухе (рис. 138, а). Согласно закону преломления на первой и второй границах

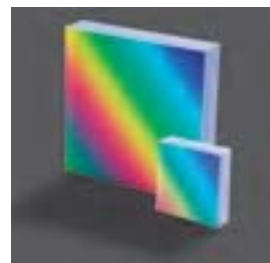


Рис. 137. Плоскопараллельные пластинки



Рис. 138. а — световой луч, проходящий через плоскопараллельную пластинку; б — ход луча в пластинке

раздела для луча, падающего под углом  $\alpha$  на первую границу, имеем (рис. 138, б):

$$\sin \alpha = n \sin \gamma, \quad n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1.$$

Здесь  $\gamma$  — угол преломления на первой границе,  $\alpha_1$  — угол падения на вторую границу,  $\gamma_1$  — угол преломления на второй границе,  $n$  — абсолютный показатель преломления вещества пластинки.

Накрест лежащие углы  $\gamma$  и  $\alpha_1$  при параллельных прямых  $AD$  и  $BK$  (перпендикулярах к первой и второй параллельным границам) равны, т. е.  $\alpha_1 = \gamma$ . Следовательно,  $\sin \alpha = n \sin \gamma = n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1$ . Откуда следует, что:

$$\alpha = \gamma_1. \quad (1)$$

Таким образом, *луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, с обеих сторон которой находится одна и та же среда, смещается на некоторое расстояние  $h = BC$  перпендикулярно своему начальному направлению* (см. рис. 138, б).

Соответственно, все предметы, если смотреть на них сквозь прозрачную плоскопараллельную пластинку под углом, не равным нулю, будут также казаться смещенными.

Как видно из рисунка 138, а, лучи, отраженные от верхней и нижней граней пластинки, параллельны друг другу на выходе из нее.



▶ На рисунке 139 изображена трехгранная призма. Луч света, проходя через трехгранную призму, отклоняется от своего начального направления пространства к основанию (утолщенной части) призмы. Подчеркнем, что это справедливо в том случае, если абсолютный показатель преломления вещества призмы больше абсолютного показателя преломления окружающей среды ( $n_2 > n_1$ ).

Обратите внимание, что если на призму падает луч белого света, то после прохождения призмы на экране наблюдается разноцветная полоска, содержащая набор цветов — от красного до фиолетового. Исаак Ньютон, впервые проделавший данный эксперимент, назвал эту полоску спектром. Порядок следования цветов в спектре легко запомнить с помощью известной фразы:

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| красный — 770—630 нм        | каждый    |
| оранжевый — 630—590 нм      | охотник   |
| желтый — 590—570 нм         | желает    |
| зеленый — 570—495 нм        | знать,    |
| голубой, синий — 495—435 нм | где сидят |
| фиолетовый — 435—390 нм     | фазаны    |



Рис. 139. Преломление лучей в призме



1. Нарисуйте ход светового луча в плоскопараллельной пластинке.
2. При каком угле падения луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, не смещается?

### Упражнение 16

1. Определите показатель преломления пластинки, исходя из хода лучей на рисунке 140. Окружающая среда — воздух ( $n = 1,0$ ).

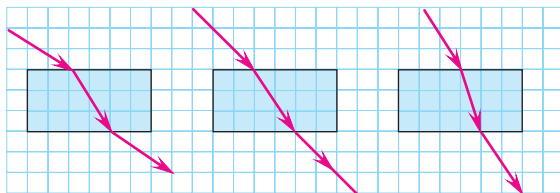


Рис. 140

2. Определите показатель преломления пластинки, исходя из хода лучей на рисунке 141, если показатель преломления окружающей среды  $n = 2,0$ .

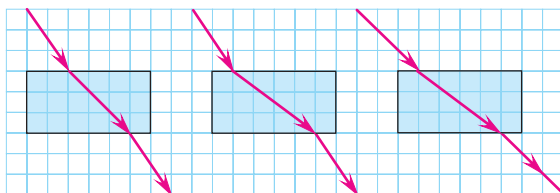


Рис. 141

3. Постройте ход луча в пластинках из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$  (рис. 142, 143), если угол  $\theta = 45^\circ$ .

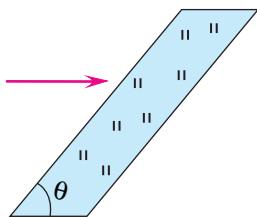


Рис. 142

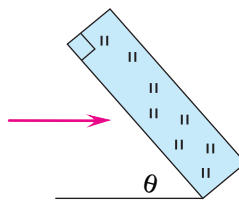


Рис. 143

4. Угол падения двух параллельных лучей света из воздуха на плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,6$ ) равен  $\alpha = 30^\circ$ , а расстояние между ними  $l_0 = 20$  мм. Определите расстояние  $l$  между лучами в пластинке.



## § 21. Формула тонкой линзы

- Одним из простейших оптических приборов является тонкая линза (рис. 144), которая широко используется как для исправления дефектов зрения, так и для получения оптических изображений. Какие изображения дает тонкая линза? Как связаны между собой расстояние от предмета до тонкой линзы и расстояние от линзы до изображения?



Рис. 144. Линзы



Линза называется собирающей, если после преломления в ней параллельный пучок становится сходящимся (рис. 145, а). Если же после преломления в линзе параллельный пучок становится расходящимся, то линза называется рассеивающей (рис. 145, б).

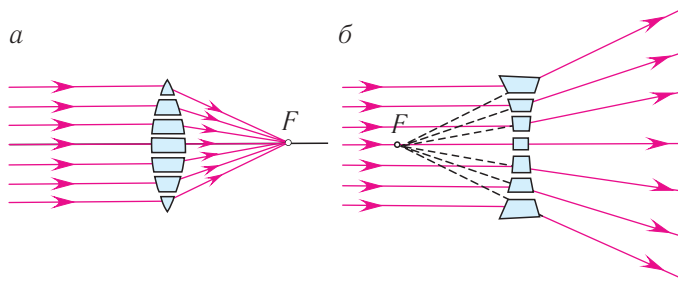


Рис. 145. Модель линзы: а — двояковыпуклой; б — двояковогнутой

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, выраженному в метрах, называется ее оптической силой:  $D = \frac{1}{F}$ .

Единица оптической силы — диоптрия (1 дптр). 1 дптр соответствует оптической силе линзы с фокусным расстоянием  $F = 1$  м; 1 дптр =  $1 \text{ м}^{-1}$ .

Линзы можно представить в виде совокупности трехгранных призм. На рисунке 145 изображена модель двояковыпуклой линзы, собранной из призм, повернутых основаниями к центру линзы (см. рис. 145, а). Соответственно, модель двояковогнутой линзы будет представлена призмами, повернутыми основаниями от центра линзы (см. рис. 145, б). Преломляющие углы этих призм можно подобрать таким образом, чтобы падающие на нее параллельные лучи после преломления в призмах собрались в одной точке  $F$  (см. рис. 145, 146).

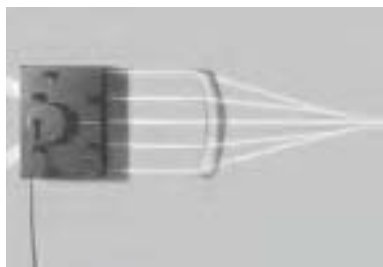


Рис. 146. Ход лучей в собирающей линзе

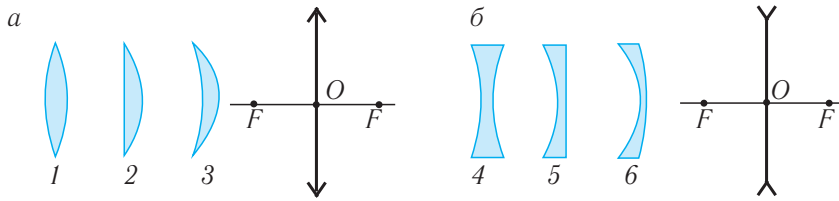


Рис. 147. Типы линз и их условные обозначения: *а* — собирающие: 1 — двояковыпуклая; 2 — плосковыпуклая; 3 — вогнуто-выпуклая; *б* — рассеивающие: 4 — двояковогнутая; 5 — плосковогнутая; 6 — выпукло-вогнутая

Линза считается **тонкой**, если ее толщина в центре намного меньше радиусов ограничивающих ее поверхностей. Тонкая линза дает неискаженное изображение только в том случае, если свет монохроматический и предмет достаточно мал, следовательно, лучи распространяются вблизи главной оптической оси.

Отметим условия, при *одновременном* выполнении которых линза является **собирающей** (рис. 147, *а*):

- толщина в центре больше толщины у краев;
- ее показатель преломления больше показателя преломления окружающей среды.

При невыполнении (или выполнении) *только одного* из этих условий линза является **рассеивающей** (рис. 147, *б*):

Рассмотрим **основные характеристики линзы** (рис. 148, *а, б*).

Прямая линия, на которой лежат центры обеих сферических поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**.

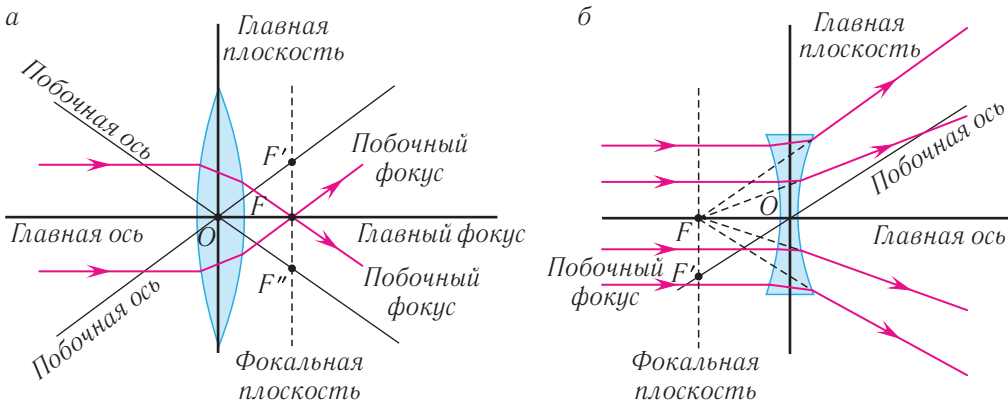


Рис. 148. Основные характеристики линз:  
*а* — собирающая линза; *б* — рассеивающая линза

Точка линзы, проходя через которую луч не преломляется, называется **оптическим центром**.

Прямая линия, проходящая через оптический центр линзы, не совпадающая с главной оптической осью, называется **побочной оптической осью**. Каждая линза имеет только одну главную оптическую ось и бесконечно много побочных осей.

Плоскость, проходящая через оптический центр тонкой линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **главной плоскостью** линзы.

Точка, в которую собирается узкий пучок света после преломления в линзе, распространяющийся параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом  $F$**  линзы. Расстояние  $OF$  от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется **фокусным расстоянием** линзы.

Плоскость, проходящая через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**. Фокальная плоскость собирающей линзы является геометрическим местом точек, в которых пересекаются параллельные лучи, падающие на линзу под любым углом к главной оптической оси. Поэтому пучок света, направленный на собирающую линзу параллельно побочной оптической оси, собирается в **побочном фокусе**.

### Построение изображений

Обычно для построений в линзах используют три **характерных (стандартных) луча** (рис. 149, а, б):

луч (1), идущий через **оптический центр линзы**, не испытывает преломления;

луч (2), **параллельный главной оптической оси**, после преломления проходит через **главный фокус**;

луч (3), **проходящий через главный фокус**, после преломления идет **параллельно главной оптической оси**.

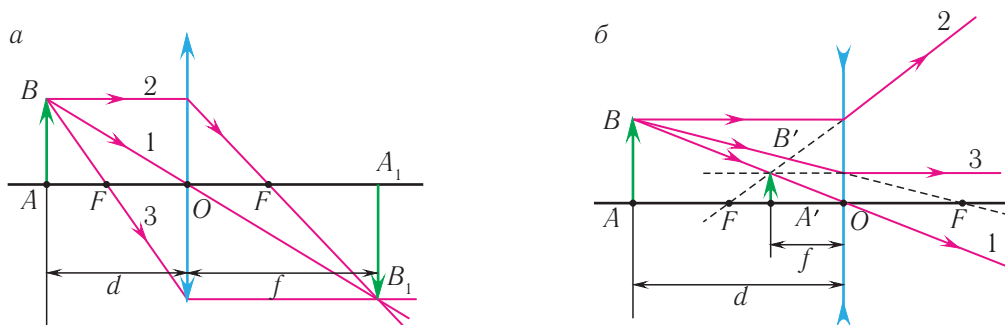


Рис. 149. Стандартные лучи для построения в линзах: а — собирающая линза; б — рассеивающая линза



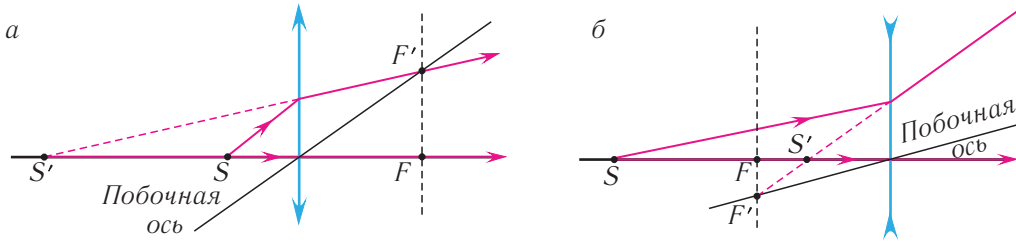


Рис. 150. Построение изображения с помощью побочной оптической оси:  
*a* — собирающая линза; *b* — рассеивающая линза

Для построения изображения в линзе достаточно построить ход двух лучей от каждой точки предмета (см. рис. 149). Изображение находится в месте пересечения лучей после преломления на поверхностях линзы (действительное изображение) или в месте пересечения продолжений лучей (мнимое изображение).

Отметим, что если предмет  $AB$  расположен перпендикулярно главной оптической оси, то и его изображение  $A_1B_1$  будет перпендикулярно этой оси. Поэтому достаточно построить только изображение  $A_1$  точки  $A$  предмета, а изображение  $B_1$  точки  $B$  находим, опуская перпендикуляр из точки  $B_1$  на главную оптическую ось (см. рис. 149).

Для построения изображения точки, находящейся на главной оптической оси, кроме луча, проходящего через центр линзы, используют луч, падающий на нее параллельно какой-либо побочной оптической оси (рис. 150). Этот луч после преломления в линзе пройдет через побочный фокус  $F'$ , лежащий на побочной оси. Такие построения приведены для собирающей и рассеивающей линз на рисунке 150. На рисунке 151 приведен пример построения области видения предмета  $S$  в тонкой линзе.

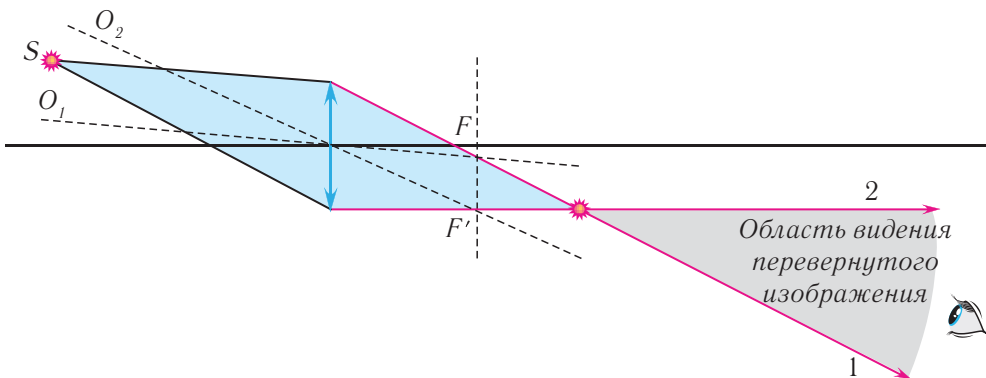


Рис. 151. Построение изображения в собирающей линзе и область видения

### Характеристики изображений

В зависимости от типа линзы и расстояния до нее можно получать изображения: *увеличенные и уменьшенные, прямые и обратные (перевернутые), действительные и мнимые* (рис. 152).

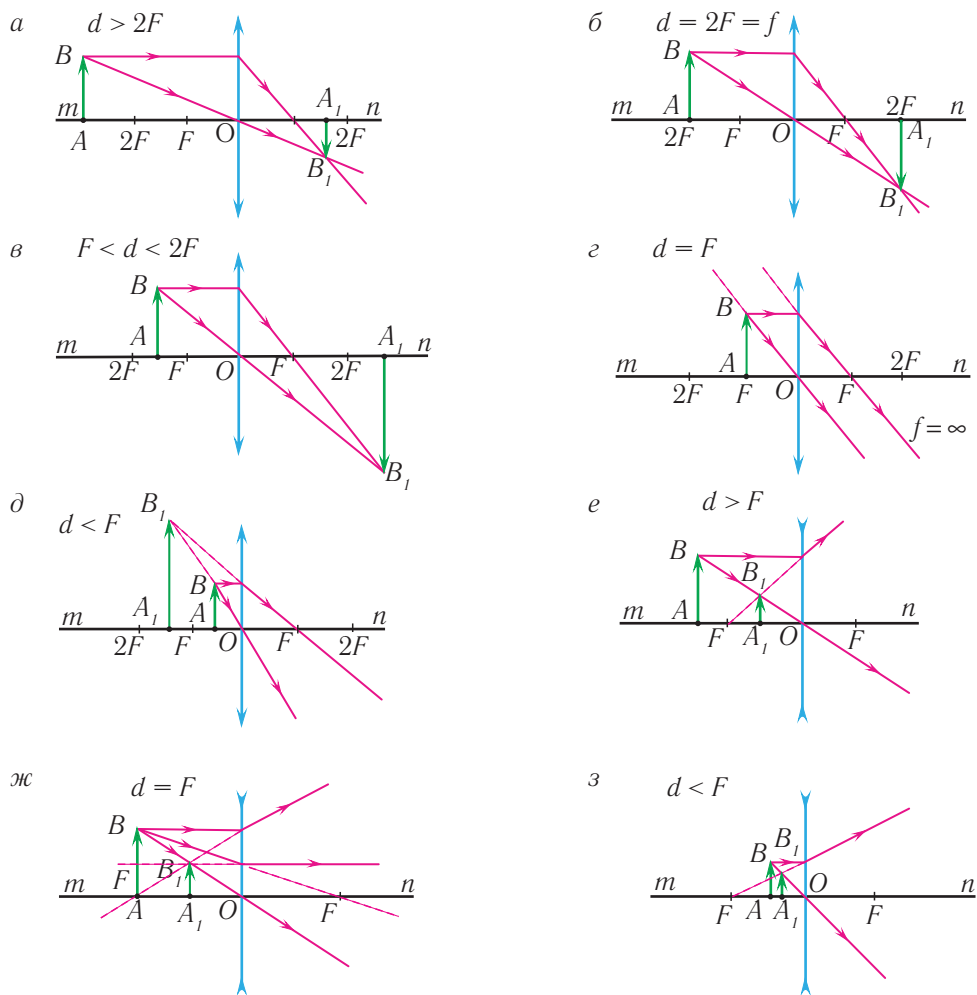


Рис. 152. Построения в тонких линзах: *а* — изображение действительное, обратное, уменьшенное; *б* — изображение действительное, обратное, в натуральную величину; *в* — изображение действительное, обратное, увеличенное; *г* — изображение отсутствует (на бесконечности); *д* — изображение мнимое, прямое, увеличенное; *е* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное; *ж* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное в 2 раза; *з* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное

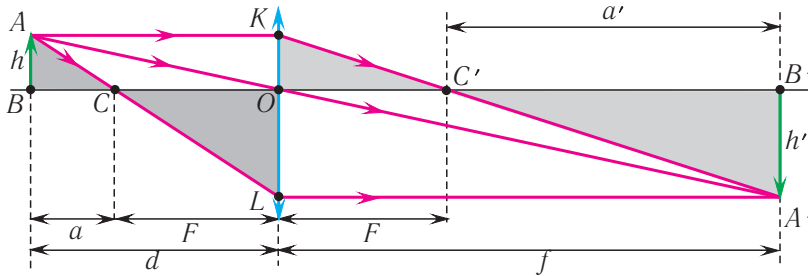


Рис. 153. К выводу формулы линзы

Между фокусным расстоянием тонкой линзы, расстоянием от предмета до линзы и от линзы до изображения существует определенная количественная зависимость, называемая **формулой тонкой линзы**.

Выведем формулу тонкой линзы из геометрических соображений, рассматривая ход характерных лучей: луча, идущего через оптический центр  $O$  линзы, луча, параллельного главной оптической оси линзы, и луча, проходящего через главный фокус линзы.

Построим изображение предмета  $AB$  в тонкой собирающей линзе (рис. 153). Пусть расстояние от предмета до линзы  $d$ , расстояние от линзы до изображения  $f$ , фокусное расстояние линзы  $F$ , расстояние от предмета до переднего главного фокуса  $a$ , расстояние от заднего главного фокуса до изображения  $a'$ , высота предмета  $h$ , высота его изображения  $h'$ .

Из рисунка 153 видно, что  $\triangle ABC \sim \triangle CLO$ ,  $\triangle A'B'C' \sim \triangle KOC'$ ,  $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$ . Из подобия треугольников следует:

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{F}; \quad (1)$$

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F}; \quad (2)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h'}{f}. \quad (3)$$

Используя соотношения (1) и (2), получим:

$$aa' = F^2. \quad (4)$$

С учетом того что  $d = a + F$ ,  $f = a' + F$  (см. рис. 153), находим  $a = d - F$  и  $a' = f - F$  и подставляем в формулу (4):

$$(d - F)(f - F) = df - Ff - dF + F^2 = F^2.$$

Откуда получаем  $df = Ff + dF$ .

Разделив обе части последнего выражения на  $dfF$ , получаем **формулу тонкой линзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (5)$$

Для практического использования формулы линзы следует твердо запомнить **правило знаков**:

для собирающей линзы, действительного источника и действительного изображения величины  $F$ ,  $d$ ,  $f$  считают *положительными*. Для рассеивающей линзы, мнимого источника и мнимого изображения —  $F$ ,  $d$ ,  $f$  считают *отрицательными*.

Заметим, что предмет или источник является *мнимым* только в том случае, если на линзу падает пучок сходящихся лучей.

Таким образом, линза с  $F > 0$  является **собирающей** (положительной), а с  $F < 0$  — **рассеивающей** (отрицательной).

**Линейным (поперечным) увеличением**  $\Gamma$  называется отношение линейного размера изображения  $h'$  к линейному размеру предмета  $h$ . Из соотношения (3) находим линейное увеличение тонкой линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}. \quad (6)$$

Поскольку оптическая сила линзы зависит от свойств окружающей среды, то под водой без плавательных очков мы видим плохо.

В современных оптических приборах для улучшения качества изображений используются **системы линз**. Оптическая сила  $D$  системы тонких линз, сложенных вместе, равна сумме их оптических сил  $D_i$ :

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n. \quad (7)$$



1. Что называют оптической силой линзы? В каких единицах она измеряется?
2. Что называют главной оптической осью линзы? Побочной осью?
3. Что называют главным фокусом линзы? Фокусным расстоянием?
4. По какой формуле определяется поперечное увеличение линзы?
5. Как известно, световые лучи обратимы. Как это утверждение можно применить при использовании формулы тонкой линзы?
6. Какие изображения может дать собирающая линза? Рассеивающая?
7. По какой формуле определяется оптическая сила системы тонких линз?

8. Определите, как изменяется положение изображения и его линейное увеличение при перемещении предмета вдоль главной оптической оси собирающей (рассеивающей) линзы от оптического центра до бесконечности.
9. Может ли рассеивающая линза дать действительное изображение?

**Пример решения задачи:**

На каком расстоянии  $d$  от рассеивающей линзы с оптической силой  $D = -4$  дптр надо поместить предмет, чтобы его мнимое изображение получилось в  $k = 5$  раз меньше ( $\Gamma = \frac{1}{5}$ ) самого предмета? Постройте изображение предмета.

Дано:  
 $D = -4$  дптр  
 $\Gamma = \frac{1}{5}$   


---

 $d = ?$

Решение  
 Из формулы для линейного увеличения:  

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \Gamma$$
  
 находим:

$$f = \Gamma d.$$

По формуле тонкой линзы (рис. 154) в соответствии с правилом знаков:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

с учетом выражения для  $f$  получаем:

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\Gamma}}{D}, \quad d = \frac{1 - \frac{1}{5}}{-4 \text{ м}^{-1}} = \frac{1 - 5}{-4} \text{ м} = 1 \text{ м}.$$

Ответ:  $d = 1$  м.

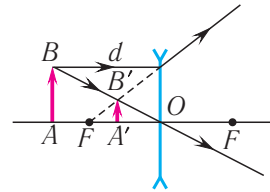


Рис. 154

**Упражнение 17**

1. Постройте изображение предмета  $AB$  в тонких собирающей и рассеивающей линзах (рис. 155, 156). Какое это изображение?
2. Определите построением положение фокусов тонкой линзы, если задана главная оптическая ось и ход произвольного луча  $ABC$  (рис. 157).

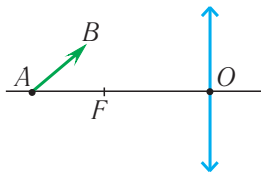


Рис. 155

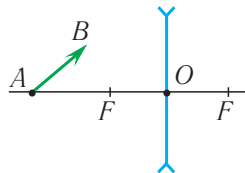


Рис. 156

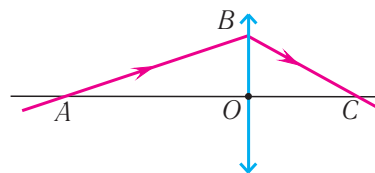


Рис. 157

3. Заполните таблицу классификации изображений, даваемых тонкой линзой в различных случаях.

| $d$                | $f$ | $\Gamma$ | Вид изображения | Формула линзы |
|--------------------|-----|----------|-----------------|---------------|
| Собирающая линза   |     |          |                 |               |
| $d > 2F$           |     |          |                 |               |
| $d = 2F$           |     |          |                 |               |
| $F < d < 2F$       |     |          |                 |               |
| $d = F$            |     |          |                 |               |
| $d < F$            |     |          |                 |               |
| Рассеивающая линза |     |          |                 |               |
|                    |     |          |                 |               |

4. Изображение предмета, находящегося на расстоянии  $d = 32,0$  см перед тонкой линзой, расположено на расстоянии  $f = 43,0$  см за линзой. Какая эта линза и чему равно ее фокусное расстояние  $F$ ?
5. Фокусное расстояние тонкой собирающей линзы  $F = 15$  см. Где расположен точечный источник света, если его действительное изображение получается на экране на расстоянии  $f = 40$  см от линзы и удалено на  $H = 3,0$  см от ее главной оптической оси?
6. Тонкая линза с фокусным расстоянием  $F = 12$  см дает действительное изображение на расстоянии  $f = 20$  см от линзы. Определите расстояние  $d$ , на котором расположен предмет, и найдите увеличение  $\Gamma$  линзы.
7. Оптическая сила тонкой линзы  $D = 13\frac{1}{3}$  дптр. Где надо поместить предмет, чтобы получить мнимое изображение на расстоянии  $f = 25$  см от линзы?



## § 22. Оптические приборы для получения действительных изображений

Посредством глаза, а не глазом  
Смотреть на мир умеет разум.

*Вильям Блейк*

■ Сложно представить жизнь современного человека без использования разнообразных оптических приборов. Они используются не только в быту и на производстве, но и в морских глубинах, в космосе, позволяя увидеть то, что ранее было скрыто от глаз человека. Как они устроены? Какие их основные характеристики? Чем они отличаются друг от друга?

Познакомимся с оптическими приборами, широко используемыми человеком.

По своему назначению оптические приборы подразделяются на две большие группы:

- 1) для получения действительных изображений предметов (проекторы, фотоаппараты);
- 2) для увеличения угла зрения (лупа, микроскоп, подзорная труба).

**Фотоаппарат** — оптическое устройство, предназначенное для получения действительных уменьшенных обратных изображений предметов на светочувствительной матрице (сенсорной матрице) (рис. 158). При этом предметы могут быть расположены на различном удалении от точки съемки. Фотоаппарат состоит из закрытой светонепроницаемой камеры и системы линз, называемых **объективом (O)** (см. рис.158).

Перемещая объектив фотоаппарата, добиваются наводки на резкость, при которой изображение предмета формируется точно на специальной светочувствительной матрице. В противном случае изображение получается нечетким (размытым). Она покрыта сенсорами освещенности, каждый из которых имеет фильтр одного из основных цветов: синий, красный или зеленый.

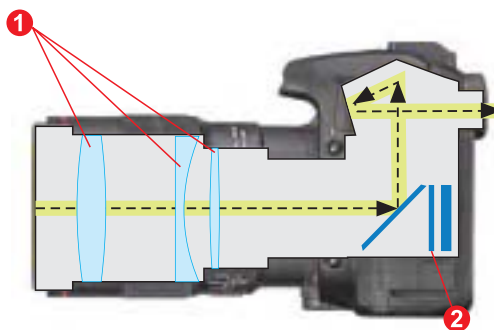


Рис. 158. Цифровой фотоаппарат и его оптическая схема: 1 — система линз (объектив); 2 — светочувствительная матрица

Количество световой энергии, поступающей на пленку, определяется размерами *диафрагмы* и временем открытия затвора (*выдержкой*).

► Фотографический метод регистрации изображения изобрели в 1839 г. Л. Дагер и Ж. Ньепс.

На элементе формируется точка изображения — **пиксель** (от англ. *pixel* — *picture element* — элемент изображения). Чем больше пикселей, тем более качественное изображение получается. Поэтому важнейшей характеристикой цифровых фотоаппаратов является его разрешение, т. е. количество пикселей. У самых простых фотоаппаратов оно составляет несколько мегапикселей, а у лучших — до нескольких десятков мегапикселей. Количество сенсоров влияет также на величину изображения, которую можно получить с помощью данного аппарата.

При нажатии кнопки затвора на каждом пикселе чувствительного элемента фотоаппарата фиксируется интенсивность каждого из трех цветов. Процессор аппарата, как у компьютера, собирает информацию о цвете в файл и записывает его на запоминающее устройство — карту памяти. После этого фото можно просматривать на компьютере или специальной приставке. При этом и на самом фотоаппарате можно сразу посмотреть сделанный снимок, что является огромным преимуществом цифрового фотоаппарата.

Какие еще достоинства имеет цифровой фотоаппарат?

Во-первых, возможность получения неограниченно большого количества копий без потери качества «оригинала» фотографии.

Во-вторых, возможность использования фотоаппарата при различных световых условиях и с разных расстояний без дополнительных устройств.

В-третьих, возможность использования цифровых изображений для переноса на различные поверхности и размещения на Web-сайте, а также редактирования с помощью различных компьютерных программ.

В-четвертых, возможность сделать большое количество снимков с минимальным интервалом времени (10 и более кадров в секунду).

В-пятых, габаритные размеры и масса. Например, некоторые аппараты имеют размеры  $10 \times 6 \times 5$  см и массу 200 г.



1. Для чего служит фотоаппарат? Назовите его основные части и объясните их назначение.



2. Можно ли сфотографировать себя в зеркале? Что при этом получим на фотопленке? Ответ обоснуйте.



## § 23. Оптические приборы для увеличения угла зрения

- Поскольку острота зрения человека ограничена, то особое значение как в науке, так и на производстве приобретают оптические приборы, позволяющие увидеть и контролировать мельчайшие детали объектов. Что для этого необходимо? Как называются эти приборы и как они устроены? Какие их основные характеристики?



Процесс фокусировки изображения на сетчатку глаза называется аккомодацией глаза (от лат. *commodus* — удобный).

Близорукость — дефект зрения, при котором глаз видит удаленный предмет не резко, а расплывчато.

Дальнозоркость — дефект зрения, при котором глаз не в состоянии видеть резко близкие предметы.

Основную часть информации (примерно 90 %) об окружающем мире мы получаем с помощью органов зрения.

*Расстояние наилучшего зрения* — это расстояние от предмета до глаза, при котором глазные мышцы не устают, и угол зрения максимален.

Размер изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на сетчатке (рис. 159) определяется *углом зрения*  $\varphi = \frac{h}{F}$ , вершина которого находится в оптическом центре глаза — точке  $O$ .

Угол зрения образован лучами, направленными на крайние точки предмета, т. е. *это угол под которым виден предмет из оптического центра глаза*. Отметим, что изображение на сетчатке всегда действительное, уменьшенное и перевернутое.

От бесконечно удаленного предмета в глаз попадает пучок параллельных лучей. В этом случае ( $d = \infty$ ) аккомодации не требуется. Если предмет приближается, то лучи становятся расходящимися. В этом случае оптическая система глаза собирает лучи на сетчатке. В отличие от фотоаппарата наводка на резкость достигается не перемещением «объектива» хрусталика, а изменением его оптической силы.

Понятие «*нормальный глаз*» человека характеризуется расстоянием наилучшего зрения около 25 см и пределом зрения (дальняя точка), находящимся на бесконечности.

С возрастом возможность аккомодации быстро уменьшается в основном из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность достаточно сжиматься. Пожилой человек не может отчетливо видеть близкие пред-

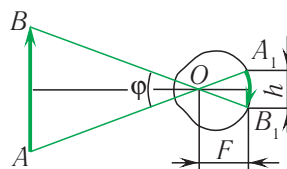


Рис. 159. Ход лучей в глазу

меты, а также различать буквы в газетах и книгах. К пятидесяти годам расстояние наилучшего зрения увеличивается в среднем до 50 см.

С возрастом вследствие болезни или при несоблюдении гигиены у глаз могут появиться дефекты. Два наиболее распространенных дефекта зрения — *близорукость* и *дальнозоркость*.

**Очки** — первый оптический прибор, примененный человеком. Появились они довольно давно в XIII—XIV вв. Для исправления близорукости используют очки с рассеивающими линзами, а дальнозоркости — очки с собирающими линзами. Сейчас очки стали обычным предметом обихода, и многим дают возможность нормально жить и работать. Другой разновидностью устройств, корректирующих зрение, являются контактные линзы. Помимо практичности, их особенностью является плотный контакт с роговицей, позволяющий значительно уменьшить искажения и увеличить поле зрения системы глаз-линза.

Наш глаз не дает возможности увидеть очень малые объекты без специальных вспомогательных устройств, так как мы ясно видим объект только в том случае, когда воспринимаем зрительные впечатления от различных точек объекта.

Соответственно, две точки можно раздельно видеть только тогда, когда их изображения получаются на различных чувствительных элементах сетчатки — палочках или колбочках. Так как минимальное расстояние между соседними колбочками или палочками в центральной ямке приблизительно 5 мкм, а расстояние от сетчатки до хрусталика 17 мм, то поэтому минимальный угол зрения, при котором две точки еще видны раздельно для нормального глаза, составляет около 1'. Кроме того, минимальный угол зрения должен соответствовать дифракционному расширению пучка, вызванному его прохождением через зрачок.

Чем больше угол  $\varphi$  между прямыми, соединяющими оптический центр глаза  $O$  (рис. 160) с крайними точками предмета (угол зрения), тем яснее виден предмет и тем большее число различных деталей можно различить. Угол зрения можно увеличить ( $\varphi' > \varphi$ ), приближая предмет к глазу или глаз к предмету. При этом размер изображения на сетчатке также увеличивается ( $h' > h$ ).

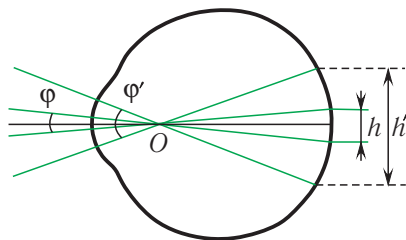


Рис. 160. Увеличение угла зрения

Таким образом, увеличение объема зрительной информации может быть достигнуто лишь за счет увеличения угла зрения. Простейший способ увеличить

угол зрения — приблизить предмет к глазу. Однако это не всегда возможно. Наименьшее расстояние до глаза, при котором мы еще видим предмет, определяется ближним пределом аккомодации. Опыт показывает, что объект не фокусируется на сетчатке, если он находится от глаза на расстоянии ближе 14 см. Вследствие этого возникает потребность в создании приборов, позволяющих увеличить угол зрения.

Оптические приборы, вооружающие глаз, подразделяются на две группы:

- 1) приборы для рассматривания *очень мелких объектов* (лупа, микроскоп), которые эти объекты как бы «увеличивают»;
- 2) приборы, предназначенные для рассматривания *удаленных объектов* (зрительные трубы, бинокли, телескопы), которые эти объекты как бы «приближают».

**Лупа** — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения (т. е. увеличить мелкие детали предметов) (рис. 161).

Лупа представляет собой короткофокусную линзу ( $F$  от 10 мм до 100 мм), которая располагается между глазом и предметом.

При использовании лупы предмет нужно поместить вблизи фокальной плоскости линзы (изображение находится на бесконечности), чтобы мышцы глаз были полностью расслаблены. Предмет может также помещаться на расстоянии наилучшего зрения, т. е. между фокусом и оптическим центром линзы.

Увеличением лупы  $\Gamma$  называется отношение углов, под которыми виден предмет при применении лупы (угол  $\varphi'$ ) и при рассматривании его невооруженным глазом (угол  $\varphi$ ) с *расстояния наилучшего зрения*  $d_0$  (рис. 162):

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

Тогда увеличение лупы равно:

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{F + d_0}{F} = 1 + \frac{d_0}{F}. \quad (1)$$



Рис. 161. Лупа

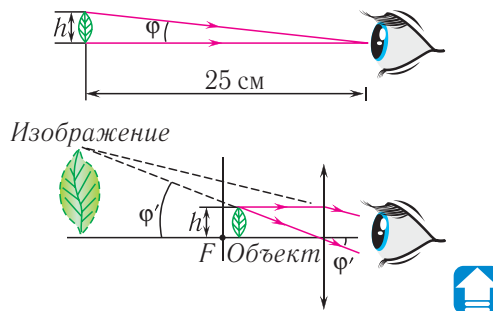


Рис. 162. Мелкий предмет, рассматриваемый: а — невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения; б — через лупу

Эта формула соответствует *аккомодации глаза на расстояние наилучшего зрения*.



Тогда угол  $\varphi' = \frac{h}{F}$  и увеличение лупы в этом случае имеет вид:

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{d_0}{F}. \quad (2)$$



Эта формула соответствует *аккомодации глаза на бесконечность*.

Но в этом случае приходится напрягать мышцы глаз.

Вследствие того что  $d_0 = 0,25$  м, обычно лупы имеют увеличение от 2,5 до 25 раз. Лупы с увеличением  $\Gamma > 40$  не применяются из-за сильных искажений изображения или малости обзора.

▶ В XVII в. голландский мастер Антоний Ван Левенгук с помощью линз смог увидеть капилляры кровеносной системы, красные кровяные тела, изучать подробности строения простейших одноклеточных.

**Микроскоп** (от греч. *μικρος* (микрос) — маленький и *σκοπεω* (скопео) — смотрю) — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным глазом.

Таким образом, назначение *микроскопа* состоит в том, чтобы получать с его помощью такое изображение не различимого для глаза предмета, которое, не находясь ближе 14 см от глаза, рассматривалось бы под углом зрения большим, чем предельный угол в  $1'$ .

Микроскоп состоит из двух собирающих линзовых систем: объектива  $1$  с фокусным расстоянием  $F_1$ , равным нескольким миллиметрам, и окуляра  $2$  с фокусным расстоянием  $F_2$ , равным нескольким сантиметрам (рис. 163). Предмет  $S_1S_2$  помещается перед фокусом объектива.



В микроскоп объект виден детальнее, поскольку рассмотрение многого изображения  $S_1''S_2''$  объекта в окуляр осуществляется под большим углом зрения.



Из-за явления дифракции в микроскоп невозможно рассматривать объекты, размеры которых сравнимы с длиной волны света. Таким образом, максимальное увеличение микроскопа ограничено ( $\Gamma \leq 2000$ ) вследствие волновой природы света.



При рассматривании крупных, но очень удаленных объектов угол зрения мал и может быть меньше предельного. В этом случае для увеличения угла зрения применяются *бинокли* и *телескопы*.

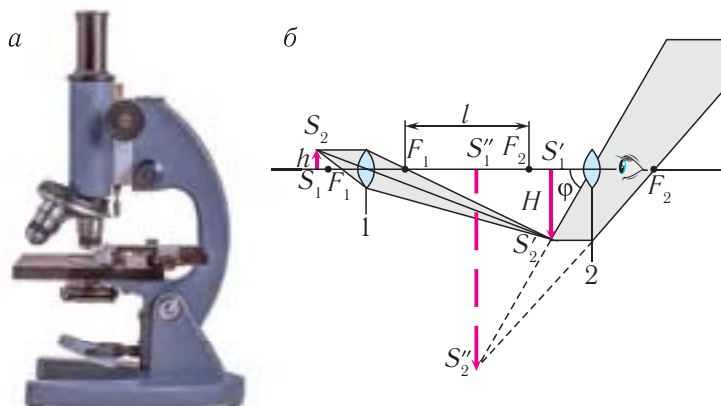


Рис. 163. Микроскоп: *a* — общий вид; *б* — оптическая схема и ход лучей

**Телескопы** (от греч.  $\tau\eta\lambda\epsilon$  (теле) — далеко и  $\sigma\kappa\omicron\lambda\epsilon\omega$  (скопео) — смотрю) — астрономические оптические приборы, предназначенные для наблюдения небесных тел. О них вы узнаете подробно в курсе астрономии.

Две маленькие подзорные трубы, составленные вместе для двух глаз, дают **бинокль** (рис. 164, *a*). Поскольку труба Кеплера дает перевернутое изображение, то в биноклях, построенных на ее основе, применяется оборачивающая система из двух призм с полным отражением (рис. 164, *б*).

Наличие двух призм позволяет создать прямое изображение, так как одна призма поворачивает изображение в вертикальной плоскости, другая — в горизонтальной. Кроме того, благодаря призмам объективы в полевом бинокле можно раздвинуть больше, чем окуляры, которые приставляются к глазам (см. рис. 164). Соответственно, изображение в таком бинокле не только приближено, но и объемно.

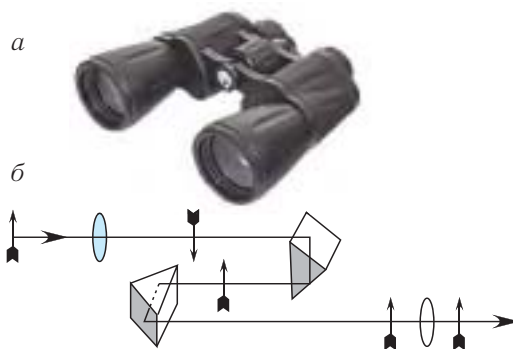


Рис. 164. Бинокль: *a* — общий вид; *б* — оборачивающая система призм



1. Что такое угол зрения? Чем определяется минимальный угол зрения?
2. Для чего предназначена лупа? Микроскоп? Подзорная труба? Бинокль?
3. Чем микроскоп отличается от подзорной трубы?
4. Какой цвет обеспечивает наилучшую разрешающую способность оптического микроскопа?

5. Почему оптический микроскоп не позволяет наблюдать молекулы и клетки?
6. Почему изображение, даваемое биноклем, объемно?
7. Атомы имеют размеры порядка  $\sim 10^{-10}$  м. Объясните, можно ли, используя видимый свет, визуально наблюдать атом.



### САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 3

**Оптика** — раздел физики, в котором изучаются свойства света, его физическая природа и взаимодействие с веществом.

Под **светом** понимают электромагнитные волны с частотами от  $1,5 \cdot 10^{11}$  Гц до  $3 \cdot 10^{16}$  Гц (длины волн изменяются в диапазоне, соответствующем инфракрасному, видимому и ультрафиолетовому излучению).

Электромагнитные волны распространяются в вакууме с максимально возможной в природе скоростью переноса энергии —  $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Скорость распространения света в веществе** определяется соотношением:

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

**Абсолютный показатель преломления вещества** равен отношению модуля скорости света в вакууме к модулю скорости света в веществе:

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

**Длина волны  $\lambda_n$  в веществе** определяется соотношением:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n},$$

где  $\lambda$  — длина волны в вакууме,  $n$  — абсолютный показатель преломления вещества.

При переходе световой волны из вакуума в вещество или из одного вещества в другое **частота света остается неизменной**.

**Интерференция** света — явление возникновения устойчивой во времени картины чередующихся максимумов и минимумов амплитуд результирующей волны при сложении двух (или нескольких) когерентных волн.

**Оптическая разность хода** волн  $\delta = n_2 d_2 - n_1 d_1 = c \left( \frac{d_2}{v_2} - \frac{d_1}{v_1} \right)$  — разность расстояний, пройденных волнами с учетом их различных модулей скоростей  $v_2$  и  $v_1$  распространения в этих средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

**Условие максимумов интерференции:**

$$\delta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Условие минимумов интерференции:**

$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Устойчивое во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве при интерференции называется **интерференционной картиной**.

**Принцип Гюйгенса — Френеля:**

все вторичные источники, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Огибающая волна, получающаяся в результате интерференции вторичных волн, совпадает с волной, испускаемой источником.

Явление огибания волнами непрозрачных препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией**.

**Дифракционная решетка** — оптический прибор, предназначенный для разложения света в спектр и точного измерения длин волн. Он состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов, нанесенных на стеклянную или металлическую поверхность.

Условие возникновения главных дифракционных максимумов, наблюдаемых под углами  $\theta$ , при нормальном падении света на дифракционную решетку:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Под **лучом** понимают линию, вдоль которой переносится энергия электромагнитной волны.

**Геометрической оптикой** называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о нем как о совокупности световых лучей.

**Закон отражения света:**

лучи, падающий и отраженный, а также перпендикуляр к отражающей поверхности, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости;

угол отражения равен углу падения.

Центр сферы  $O$  называется **оптическим центром** зеркала, его радиус  $R$  — **радиусом** зеркала. Вершина шарового сегмента  $P$  называется **полюсом** зеркала. Прямая линия  $OP$ , проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется **главной оптической осью**. Любая прямая, например прямая  $OM$ , проходящая через оптический центр  $O$

и поверхность зеркала (за исключением его главной оптической оси), называется **побочной оптической осью**. Точка  $F$ , которая находится на главной оптической оси на расстоянии  $F = \frac{R}{2}$  от полюса зеркала, называется **главным фокусом зеркала**.



Изменение направления распространения света при прохождении через границу раздела двух сред называется **преломлением света**.

**Закон преломления света:**

лучи, падающий и преломленный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к плоскости границы раздела двух сред;

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Явление отсутствия преломленного луча при отражении падающего от границы раздела сред называется **полным отражением света**. Наименьший угол, с которого начинается полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}; \quad (n_2 < n_1).$$

**Формула тонкой линзы:**

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

**Правило знаков:**

в случае собирающей линзы, действительного источника и действительного изображения знаки перед величинами  $F$ ,  $d$ ,  $f$  выбирают *положительными*;

в случае рассеивающей линзы, мнимого источника и мнимого изображения — знаки перед величинами  $F$ ,  $d$ ,  $f$  выбирают *отрицательными*.

**Линейным (поперечным) увеличением  $\Gamma$**  называется отношение линейного размера изображения  $h$  к линейному размеру предмета  $H$ :

$$\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}.$$

**Цифровой фотоаппарат** — оптический прибор, предназначенный для получения и записи оптического изображения на электронные носители (флэш-карты, диски и т. д.).





**Лупа** — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения.

**Микроскоп** — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным взглядом.

**Телескоп** — астрономический оптический прибор, предназначенный для наблюдения небесных тел.



### Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (О. Рёмер, А. Физо, А. Майкельсон, Т. Юнг, О. Френель).

2. Если посмотреть через металлическую или пластмассовую трубку на свет, то можно увидеть светлые и темные кольца. Изучите это явление и объясните его. Исследуйте, как радиусы наблюдаемых колец зависят от диаметра трубки.

3. Если проделать небольшое отверстие в стенке темного ящика (камера обскуры), то на его дальней стенке появится обратное изображение предметов (рис. 165). Исследуйте, как яркость и резкость изображения зависят от диаметра отверстия.

4. Если вы посмотрите на читаемый вами текст то правым, то левым глазом, то увидите несколько смещенные относительно друг друга и отличающиеся изображения. К какому зрительному эффекту приводят эти различия, когда вы смотрите на текст двумя глазами?

5. Из прозрачного сосуда, наполненного жидкостью (например, водой), бьет струя. Источник света (лазер) расположен таким образом, чтобы горизонтальный луч входил в струю жидкости (рис. 166). При некоторых условиях струя жидкости будет «работать» как световод. Исследуйте, как свойства такого световода зависят от скорости вытекания воды, от диаметра отверстия.

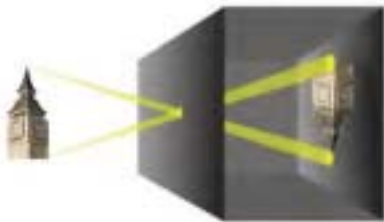


Рис. 165. Схема камеры-обскуры

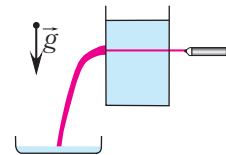


Рис. 166. Жидкий световод



## Глава 4

# Основы специальной теории относительности

Чтоб этот довод рухнул также вдруг,  
Тебе бы опыт сделать не мешало;  
Ведь он для вас — источник всех наук.

*Данте*



Роль скорости распространения света в вакууме настолько важна в физике и технике, а современные методы ее измерения настолько надежны, что в 1983 г. было принято решение считать значение этой скорости точным. Оно равно  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Результаты экспериментов показывают, что с такой скоростью распространяется в вакууме не только видимый свет, но и любое электромагнитное излучение — от радиоволн до гамма-излучения.



Развитие науки и техники позволило физикам уже на рубеже XIX — XX вв. провести достаточно точные измерения скорости света. Как оказалось, скорость света в вакууме не зависит ни от скорости движения приемника света, ни от скорости источника, излучающего свет.

Эти удивительные экспериментальные результаты привели физиков к пересмотру представлений о свойствах пространства и времени. Была создана **специальная теория относительности (СТО)** — раздел физики, в котором изучаются свойства пространства и времени, а также законы движения тел при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Специальная теория относительности называется также *релятивистской теорией* (от лат. *relativus* — относительный). Явления, происходящие при скоростях, сравнимых со скоростью света, характеризующие их величины (скорость, энергия, импульс и т. д.) и законы этих явлений тоже называются *релятивистскими*.

В повседневной жизни и практически во всех технологиях мы не встречаемся с релятивистскими скоростями. Зачем же изучать теорию относительности? Для этого имеется целый ряд причин.

Во-первых, основную информацию об окружающем мире мы получаем с помощью зрения, непосредственно воспринимая световое излучение. Таким образом, «самый релятивистский» объект природы — свет играет важнейшую роль в жизни каждого человека.

Во-вторых, как показывает весь накопленный опыт, скорость света в вакууме имеет фундаментальное, выделенное значение: ни один сигнал не может распространяться, ни одна частица не может двигаться быстрее света.

В-третьих, релятивистская теория необходима для объяснения явлений в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц. Без использования законов СТО невозможно создание ускорителей элементарных частиц, обеспечение современной технологии GPS.

В-четвертых, релятивистская теория играет важную роль в изучении Вселенной. Обнаружены галактики, движущиеся с огромными скоростями. Без релятивистской теории нельзя объяснить свойства таких астрономических объектов, как «черные дыры», нейтронные звезды, пульсары.

## § 24. Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Экспериментальные предпосылки специальной теории относительности

- После разработки высокоточных методов измерения скорости света появилась возможность проверить на эксперименте: увеличится ли скорость света, если его источник движется навстречу приемнику света? Уменьшится ли скорость света, если они будут удаляться друг от друга? Иными словами, можно ли, двигаясь навстречу свету, увеличить его относительную скорость, а убегая — уменьшить? И что же показали подобные эксперименты?



Инерциальной системой отсчета (ИСО) называется система, в которой при отсутствии воздействий на тело его скорость остается постоянной.

Принцип относительности Галилея: во всех ИСО все механические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.

Классический закон сложения скоростей:  $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{V}$ , где  $\vec{v}_1$  — скорость движения тела относительно ИСО-1,  $\vec{v}_2$  — относительно ИСО-2,  $\vec{V}$  — скорость ИСО-2 относительно ИСО-1.

Создание специальной теории относительности исторически связано с развитием электродинамики — науки об электрических и магнитных явлениях. За два столетия, которые отделяли физику Галилея и



Ньютона от физики Максвелла и Герца, в ней накопилось огромное количество новых научных фактов. В то же время представление о мироздании базировалось на **механической** картине мира, основанной на механике Галилея — Ньютона (*классической механике*).

Как известно, в классической механике такие понятия, как координата, скорость, траектория тела, являются *относительными* — они изменяются при переходе от одной ИСО к другой. В то же время некоторые понятия и величины в классической физике считались *абсолютными*. Например, как само собой разумеющееся принималось положение об *абсолютности времени* (ход времени одинаков во всех ИСО) и *абсолютности одновременности* (события одновременные в некоторой ИСО, одновременны и в любой другой ИСО). Очевидным следствием этих представлений является классический закон сложения скоростей. Согласно этому закону при переходе к ИСО, которая движется со скоростью  $\vec{V}$  навстречу телу, модуль скорости тела становится больше на величину, равную  $V$ . Это означает, что в механике Галилея — Ньютона не существует максимально возможной (*предельной*) скорости.

Такие представления согласовывались как с повседневным опытом, так и с результатами экспериментов в механике, акустике, гидродинамике и т. д.

Однако электромагнитные процессы происходят со скоростями, сравнимыми со скоростью света, т. е. гораздо бóльшими, чем скорости движения тел, с которыми имела дело механика. В связи с этим возникают вопросы: будет ли справедлив принцип относительности Галилея (важнейший принцип классической механики) для электромагнитных явлений? Зависит ли скорость света в вакууме от движения источника и (или) приемника излучения, как это должно быть по классической теории? Существует ли в природе предельная скорость? Для ответа на эти вопросы были необходимы новые эксперименты.

Рассматривая проблему распространения электромагнитных волн (света), полезно обратиться к хорошо изученным закономерностям поведения звуковых волн. Они могут распространяться только в упругой среде — газообразной, жидкой или твердой. Естественно принять в качестве гипотезы, что и для распространения света необходима некоторая среда. Ее назвали *мировым эфиром*. При таком подходе решающим становится вопрос о скорости света, измеренной наблюдателем, который движется относительно эфира.



Вернемся к аналогии со звуком. Пусть скорость звука в покоящейся среде равна  $v_{зв}$ . Опыт показывает, что, как и ожидалось, при измерении

скорости звука прибором, который движется относительно этой среды со скоростью  $\vec{V}$  навстречу звуку, получается величина, равная  $v_{\text{зв}} + V$ .

А что получится в случае распространения электромагнитных волн? Зависит ли скорость света от движения лаборатории, в которой проводятся измерения этой скорости?

В качестве такой быстро движущейся лаборатории ( $V \approx 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ) было предложено использовать Землю. Если считать, что Земля, обращаясь вокруг Солнца, движется сквозь неподвижный эфир, то в лаборатории, находящейся на Земле, следует ожидать появления так называемого «эфирного ветра» (подобно тому, как возникает встречный поток воздуха при езде на мотоцикле в безветренную погоду). Как повлияет «эфирный ветер» на скорость света в системе отсчета «Земля»?

В 1887 г. американские физики А. Майкельсон и Р. Морли провели эксперимент, точность измерений в котором была достаточной для обнаружения влияния «эфирного ветра».

Разберем схему их экспериментальной установки, получившей название *интерферометр Майкельсона* (рис. 167). Он состоял из оптического устройства, расположенного на массивной каменной платформе, плавающей в бассейне с ртутью. Такая конструкция практически исключала влияние механических колебаний платформы на оптические процессы.

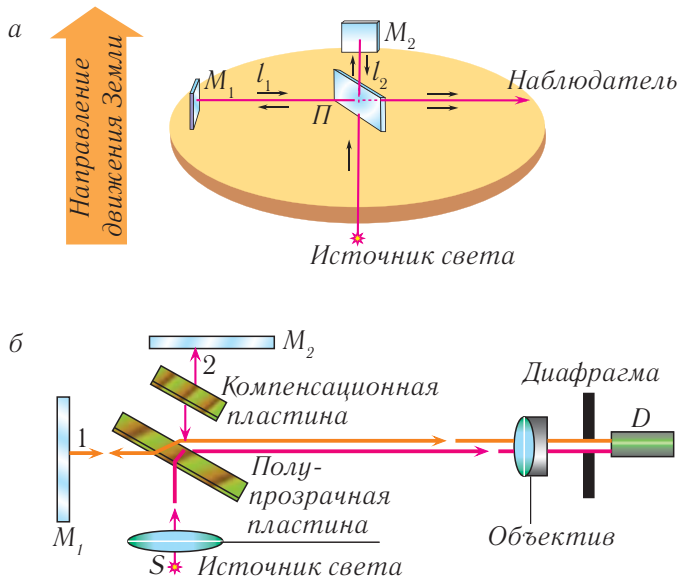


Рис. 167. Опыт Майкельсона — Морли: а — вид установки; б — схема опыта

Свет от источника  $S$  с помощью полупрозрачной пластины  $\Pi$  делился на два взаимно перпендикулярных луча 1 и 2 (см. рис. 167). Лучи отражались от зеркал  $M_1$  и  $M_2$ , а затем сводились вместе и попадали на детектор  $D$ . В результате сложения этих лучей получалась интерференционная картина (чередующиеся темные и светлые полосы, наблюдавшиеся с помощью детектора).

Ожидалось, что эта картина будет существенно зависеть от ориентации интерферометра по отношению к направлению движения Земли ( $\vec{V}_{\text{инт}}$ ) относительно «неподвижного» эфира (см. рис. 167). Действительно, если первый из пучков направлен вдоль скорости  $\vec{V}_{\text{инт}}$ , а второй — перпендикулярно ей, то «эфирный ветер» будет неодинаковым для этих лучей. Соответственно, будут различными и времена прохождения света для лучей 1 и 2 от источника  $S$  до приемника  $D$ , т. е. появится дополнительная «разность хода» интерферирующих световых волн.

При повороте платформы на  $90^\circ$  лучи «менялись местами» и, соответственно, должна была измениться разность хода. Как показывали расчеты, это привело бы к смещению интерференционной картины на 0,4 ширины интерференционной полосы. Однако ожидаемое смещение не было обнаружено, хотя интерферометр Майкельсона позволял наблюдать сдвиг интерференционной картины даже на 0,01 полосы.

Эксперименты повторялись в разное время суток и в разные времена года (т. е. при различных направлениях скорости интерферометра относительно эфира). Однако смещения интерференционной картины так и не было обнаружено. Это было настолько же невероятно, как если при езде на мотоцикле вы не почувствовали бы встречного воздушного потока.

Результаты эксперимента Майкельсона — Морли и многих других экспериментов по измерению скорости света привели к выводу о независимости скорости света в вакууме как от движения приемника, так и от движения источника излучения. Представления о существовании мирового эфира оказались несостоятельными.

Данный факт был одной из величайших загадок физики конца XIX — начала XX в. Обнаружилось явное противоречие между результатами экспериментов и классическими представлениями. Так, при переходе от одной ИСО к другой, согласно классическому закону сложения скоростей, к скорости света должна векторно прибавляться скорость движения этих ИСО друг относительно друга. Однако результаты экспериментов упрямо утверждали, что скорость света в вакууме постоянна и во всех ИСО одинакова.



Это был вызов механической картине мира, которая складывалась веками.

Выдающиеся ученые того времени (А. Пуанкаре, Г. А. Лоренц и др.) выдвинули целый ряд полезных идей для объяснения этого противоречия. Однако решающий шаг был сделан в 1905 г. 25-летним физиком Альбертом Эйнштейном, работавшим тогда техническим экспертом Федерального патентного бюро в Берне (Швейцария). Им была выдвинута новая теория пространства и времени, получившая название **специальная теория относительности**. Эта революционная теория позволила не только объяснить результат эксперимента Майкельсона — Морли, но и положила начало новому этапу развития физики.



1. Сформулируйте принцип относительности Галилея.
2. Какие величины в механике Ньютона считались относительными, а какие — абсолютными?
3. Сформулируйте закон сложения скоростей в классической механике.
4. Опишите эксперимент Майкельсона — Морли.
5. В чем состоит противоречие между классическим законом сложения скоростей и данными экспериментов по измерению скорости света?
6. Какую роль сыграл эксперимент Майкельсона — Морли в развитии физики?



## § 25. Постулаты специальной теории относительности

- Отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли поставил ученых в затруднительное положение, поскольку совершенно не укладывался в сложившиеся веками классические (ньютоновские) представления о свойствах пространства и времени. Это был «вызов века», разрешение которого привело к рождению новых, релятивистских представлений о связи пространства и времени.



Фундаментальное утверждение, лежащее в основе теории и принимаемое без доказательства, называется постулатом (аксиомой). В физике постулат, как правило, является обобщением экспериментальных фактов.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, физика столкнулась с противоречием между постоянством скорости света в вакууме и классическим законом сложения скоростей. Проиллюстрируем эту проблему на простом примере: автомобиль движется со скоростью  $\vec{V}$  навстречу лучу прожектора. Согласно классическому закону сложения скоростей

в системе отсчета «автомобиль» скорость света должна быть равной  $c + V$ . Однако результаты экспериментов решительно утверждают: во всех ИСО скорость света в вакууме равна  $c$ .

Для преодоления указанного противоречия пришлось глубоко проанализировать и пересмотреть классические представления о пространстве и времени, в результате чего была создана специальная теория относительности.



В основу данной теории Эйнштейн положил два *постулата*, являющихся обобщением экспериментальных фактов.

**Первый постулат СТО (постулат относительности):** *во всех инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.*

Данный постулат представляет собой обобщение классического принципа относительности на все физические явления. Из него следует, что никакими экспериментами, проведенными внутри ИСО, невозможно установить, покоится она или движется.

Представим себе вагон, движущийся равномерно и прямолинейно без толчков и покачиваний. Можно ли установить факт движения вагона с помощью экспериментов (механических, электромагнитных и любых других), *проводимых внутри вагона* (т. е. без наблюдения событий, происходящих вне его)? Весь накопленный в физике опыт показывает, что это невозможно в полном соответствии с первым постулатом СТО.



**Второй постулат СТО (постулат постоянства скорости света):** *во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника излучения.*



Как уже говорилось, этот постулат полностью соответствует результатам многократно проводившихся экспериментов, но противоречит классическому закону сложения скоростей.

Эйнштейн разрешил это противоречие, проведя глубокий анализ представлений о времени и пространстве.

В основе этого анализа лежит понятие *события*. Под событием понимают некоторое явление, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени. Понятие «событие» является идеализацией реального явления, происходящего очень быстро в очень малой области пространства. Примером события может служить вспышка света, выстрел орудия, соударение двух частиц, пересечение спортсменом линии финиша и т. д. Для характеристики времени и места события в определенной ИСО достаточно указать три его координаты и момент времени.



События, произошедшие в один и тот же момент времени, называются *одновременными*. Как уже говорилось, в классической физике принималось положение об *абсолютности одновременности*: «если два события произошли одновременно в некоторой ИСО, то они одновременны и в любой другой ИСО».

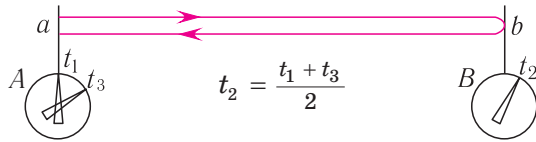


Рис. 168. Синхронизация часов

Для проверки этого нужно иметь синхронизованные часы (рис. 168). Эйнштейн обратил внимание на то, что *абсолютность одновременности* вовсе не очевидна. События, *одновременные* в одной ИСО, могут оказаться *не одновременными* в другой ИСО, если она движется относительно первой.

Таким образом, *одновременность событий* — понятие *относительное* (рис. 169). Отметим, однако, что одновременные события, произошедшие в одном и том же месте, одновременны в любой ИСО. Их одновременность абсолютна.

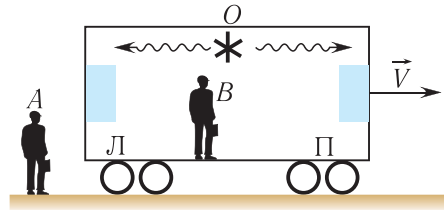


Рис. 169. Относительность одновременности

► Наряду с относительностью одновременности из постулатов СТО следует существование и других релятивистских эффектов.

**Эффект замедления времени.** Часы, движущиеся со скоростью  $v$  относительно данной ИСО, идут медленнее неподвижных часов. При этом промежуток времени  $\tau$ , измеренный движущимися часами, меньше промежутка времени  $\Delta t$ , измеренного часами, неподвижными относительно этой ИСО, согласно соотношению  $\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

Промежуток  $\tau$  называют собственным временем,  $\Delta t$  — лабораторным временем, а данный эффект — релятивистским замедлением времени.

**Эффект сокращения длины.** Линейный размер движущегося со скоростью тела сокращается в направлении его движения  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , где  $l$  — длина тела в ИСО, относительно которой оно движется, а  $l_0$  — длина тела в ИСО, в которой оно покоится. Поперечные размеры тела при движении не изменяются.

Линейный размер движущегося со скоростью тела сокращается в направлении его движения  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , где  $l$  — длина тела в ИСО, относительно которой оно движется, а  $l_0$  — длина тела в ИСО, в которой оно покоится. Поперечные размеры тела при движении не изменяются.



1. Какие системы отсчета называются инерциальными?
2. Как формулируется первый постулат СТО?

3. Какие эксперименты подтверждают справедливость первого постулата СТО?
4. Чем отличается принцип относительности Галилея от первого постулата СТО?
5. Как формулируется второй постулат СТО? Какие эксперименты его подтверждают?



§25-1

## § 26. Элементы релятивистской динамики. Взаимосвязь массы и энергии

■ Изменение представлений о свойствах пространства и времени повлекло за собой появление новых взглядов на связь энергии тела с его массой. В чем суть знаменитой формулы Эйнштейна  $E_0 = mc^2$ ? Где она находит свое применение?



В классической механике импульс тела определяется как произведение его массы на скорость:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Изменение импульса тела равно импульсу результирующей всех сил, приложенных к нему:  $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ .



Необходимость изменения динамики очевидна хотя бы из того, что согласно законам Ньютона любое тело можно в принципе разогнать до любой скорости. Приложим к покоящемуся телу массой  $m$  постоянную силу  $\vec{F}$ . Используя второй закон Ньютона, найдем, что к моменту времени  $t$  тело приобретет скорость  $v = \frac{F}{m}t$ . Следовательно, в рамках классической механики при  $t > \frac{mc}{F}$  скорость тела  $v$  превзошла бы скорость света  $c$ , что противоречит результатам экспериментов и основным положениям СТО. Зависимость скорости  $v$  тела от времени  $t$  в релятивистском случае приведена на рисунке 170.

Какие же соотношения динамики оказалось необходимым изменить при переходе от механики Ньютона к СТО, а какие остались неизменными?

Сохранили свой вид законы изменения импульса и энергии тела:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t; \quad \Delta E = A, \quad (1)$$

где  $A$  — работа, совершенная силой  $\vec{F}$ .

Изменились соотношения, выражающие зависимость импульса и энергии тела от его скорости:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



Важнейшим отличием СТО от классической механики является то, что энергия тела не обращается в нуль, даже когда оно покоится ( $\vec{v} = 0$ ). В этом случае **энергия покоя**  $E_0$  тела пропорциональна его массе:

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

Таким образом, в покоящемся теле таится огромный запас энергии. Трудно переоценить практическое значение этой несложной формулы, поскольку именно она указала на взаимосвязь энергии и массы вещества. Человечество узнало о возможности получения энергии из вещества. На этой формуле основана вся энергетика, в которой энергия покоя топлива переходит в другие виды энергии.

Из равенства (2) следует, что изменение энергии покоя тела на  $\Delta E_0$  связано с изменением его массы на  $\Delta m$ , где:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}. \quad (3)$$

Утверждение о том, что *энергия покоя пропорциональна массе, а изменение энергии покоя связано с изменением массы*, называют **законом взаимосвязи массы и энергии**.

Трудно переоценить практическое значение этого закона для современной энергетике. Из него следует, что тело массой  $m = 1,0$  г обладает энергией покоя:

$$E_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Эта энергия эквивалентна энергии, выделяющейся при сгорании 2000 тонн нефти. Так, благодаря прогрессу физики в 1905 г. человечество узнало о практически «неисчерпаемых» запасах энергии, содержащихся в любом веществе.

Формула (3) применима ко всем явлениям, в которых изменяется внутренняя энергия вещества. При процессах, происходящих на атомно-

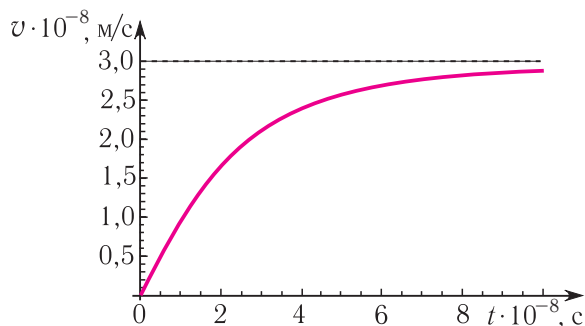


Рис. 170. Зависимость скорости релятивистской частицы от времени

молекулярном уровне, изменения массы крайне малы. Так, при полном превращении льда в воду относительное изменение массы  $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$ , при нагревании на  $\Delta t = 200^\circ\text{C}$  железного бруска  $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-12}$ . При химических реакциях относительное изменение массы несколько выше. Например, при сгорании метана в кислороде  $\frac{\Delta m}{m} = 0,9 \cdot 10^{-10}$ . Для ядерных реакций ситуация существенно иная. Для них характерны величины  $\frac{\Delta m}{m} = 10^{-3}$ , в десятки миллионов раз бóльшие, чем для химических реакций.



▶ Согласно принципу соответствия любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание физических явлений, должна включать в себя классическую (ньютоновскую) теорию как предельный случай. Специальная теория относительности полностью удовлетворяет принципу соответствия. При скоростях  $v \ll c$  законы релятивистской механики переходят в законы механики Ньютона.



1. Каким соотношением связаны между собой масса тела и энергия покоя?
2. Сформулируйте закон взаимосвязи массы и энергии покоя.



### Упражнение 18

1. Какая энергия  $E$  выделится при полном превращении вещества массой  $m = 1,0$  мг в излучение?
2. Определите массу  $m$  частицы, если ее энергия покоя  $E_0 = 8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж.
3. Какой массе  $\Delta m$  вещества соответствует энергия покоя, равная энергии, потребляемой электролампой мощностью  $P = 100$  Вт в течение промежутка времени  $\tau = 1,0$  год?
4. Определите массу  $\Delta m$ , теряемую Солнцем за год, если на поверхность Земли площадью  $S = 1,0$  см<sup>2</sup> ежесекундно попадает  $E = 0,14$  Дж энергии излучения. Расстояние от Земли до Солнца  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км.



## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 4

**Специальная теория относительности (СТО)** основывается на двух постулатах (принципах).

**Первый постулат (постулат относительности):** все законы физики, описывающие любые физические явления, должны иметь одинаковый вид во всех ИСО.

**Второй постулат (постулат постоянства скорости света):** во всех ИСО скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости движения источника, ни от скорости приемника излучения.

Скорость света в вакууме является предельной скоростью движения материальных объектов и распространения сигналов.

**Энергия покоя  $E_0$**  тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2.$$

**Закон взаимосвязи изменений массы и энергии покоя:**

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

## Задания для самостоятельных исследований

Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (А. Эйнштейн, Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Майкельсон).





## Глава 5

# ФОТОНЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

Каждый век, приобретая новые идеи, приобретает и новые глаза.

*Г. Гейне*

В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось. Законы механики и теория всемирного тяготения были известны более 200 лет. К этому времени была развита и стала общепризнанной теория электромагнитного поля, основы которой были заложены Дж. Максвеллом.

Однако к началу XX в. возникли проблемы, касающиеся физической природы излучения и вещества, а также их взаимодействия. В рамках классической физики возникали непреодолимые противоречия при объяснении экспериментальных данных для процессов поглощения и испускания света атомами, закономерностей испускания электромагнитного излучения нагретыми телами, фотоэффекта и т. п.

Анализ этих противоречий и построение на их основе новых теорий привели физиков в начале XX в. к научной революции, которая коренным образом изменила взгляды ученых на объекты микромира — атом, его ядро и элементарные частицы.

В течение последующих 30 лет были заложены основы **квантовой физики**, пришедшей на смену классической физике при рассмотрении явлений на атомном и внутриатомном (субатомном) уровнях.

## § 27. Фотоэффект. Экспериментальные законы внешнего фотоэффекта. Квантовая гипотеза Планка

- Изучение взаимодействия света с веществом привело к открытию эффектов, которые позволили сделать важный шаг к пониманию природы света. В дальнейшем использование этих эффектов позволило создать новое поколение электронных приборов и устройств. Какие же основные закономерности взаимодействия света с веществом?



Сила тока  $I$  — скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего за промежуток времени  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника, к этому промежутку: 
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$



В 1887 г. Генрих Герц обнаружил, что пробой воздушного промежутка между электродами искрового разрядника происходит при меньшем напряжении, если освещать отрицательно заряженный электрод ультрафиолетовым излучением. Дальнейшие эксперименты показали, что отрицательно заряженная цинковая пластинка при облучении ультрафиолетовым излучением (рис. 171, а) разряжается. Оба эти явления можно объяснить, предполагая, что под действием падающего излучения из металла вылетают отрицательно заряженные частицы — электроны (рис. 171, б). Это явление получило название *фотоэффекта*.

**Фотоэффектом (фотоэлектрическим эффектом)** называется явление взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества.

Если фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внешним фотоэффектом**, а вылетающие

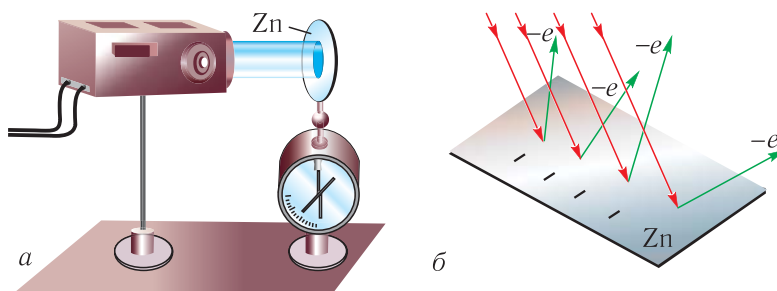


Рис. 171. Фотоэлектрический эффект: а — действие ультрафиолетового излучения на пластинку; б — вылет электронов с поверхности цинка под действием ультрафиолетового излучения

электроны — **фотоэлектронами**. Если фотоэффект не сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внутренним фотоэффектом**. При внутреннем фотоэффекте часть электронов, находящихся в веществе в связанном состоянии, переходит в свободное состояние, увеличивая концентрацию свободных носителей тока. Это приводит к изменению электрических свойств вещества под действием падающего на него света. Внутренний фотоэффект присущ только полупроводникам и диэлектрикам. Испускание веществом каких-либо частиц называется **эмиссией**. Поэтому внешний фотоэффект называют также **фотоэлектронной эмиссией (фотоэмиссией)**.

► «Фотоξ» (фотос) по-гречески означает «свет».

Систематическое изучение фотоэффекта было проведено в 1888—1889 гг. русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым.

Схема установки для экспериментального изучения внешнего фотоэффекта представлена на рисунке 172, *a*.

В экспериментах Столетова в электрическую цепь были включены два электрода (2) и (3), один из которых (2) был изготовлен из медной сетки, а (3) представлял собой цинковую пластинку. Медная сетка была заряжена положительно, а цинковая пластинка — отрицательно. Наблюдения показали, что под действием падающего ультрафиолетового излучения в цепи возникает электрический ток. Этот ток называется **фототоком**.

Изменяя напряжение  $U$  между пластинами  $A$  и  $B$  с помощью реостата (рис. 172, *б*), Столетов исследовал зависимость силы фототока  $I_{\Phi}$

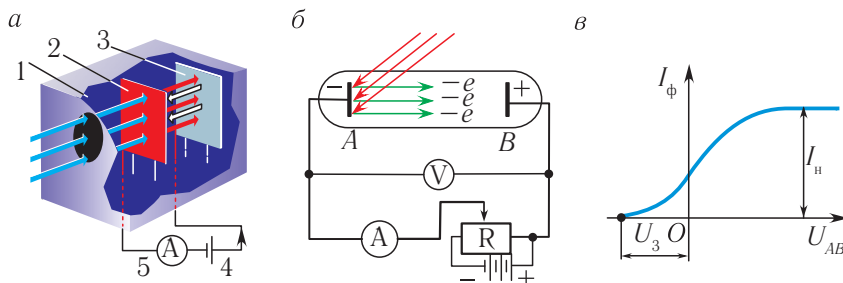


Рис. 172. Изучение внешнего фотоэффекта: *a* — вид установки: 1 — герметичный корпус; 2 — медная сетка; 3 — цинковая пластинка; 4 — источник тока; 5 — амперметр; *б* — электрическая схема снятия вольтамперной характеристики  $I(U)$ ; *в* — вольтамперная характеристика



от напряжения  $U$  (вольтамперную характеристику). Как видно из представленной на рисунке 172, *в* зависимости, даже при отсутствии разности потенциалов между пластинами в цепи проходит фототок. Так как скорости электронов, испускаемых катодом, различны как по модулю, так и по направлению, то не все они при малых значениях напряжения могут достигнуть анода.

При увеличении напряжения между электродами сила фототока возрастает до некоторого максимального значения  $I_n$  (см. рис. 172, *в*), называемого **фототоком насыщения**. При фототоке насыщения все электроны, испускаемые катодом за единицу времени, достигают анода. Вот почему дальнейшее увеличение напряжения не приводит к росту силы фототока. Изменение полярности напряжения приводит к исчезновению фототока при напряжении  $U_з$ , которое называется **задерживающим напряжением** (см. рис. 172, *в*).

Для большинства веществ фотоэффект возникает только под действием ультрафиолетового излучения. Однако некоторые металлы, например литий, натрий и калий, испускают электроны и при их облучении видимым светом.

Экспериментально установлены следующие **законы внешнего фотоэффекта**:

1. **Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна интенсивности  $I$  падающего излучения (первый закон фотоэффекта).**

Вольтамперная характеристика фотоэффекта показана на рисунках 172, *в* и 173, *а*.

Зависимость фототока насыщения  $I_n$  от интенсивности падающего излучения  $I$  показана на рисунке 173, *б*. Так как график выходит из начала

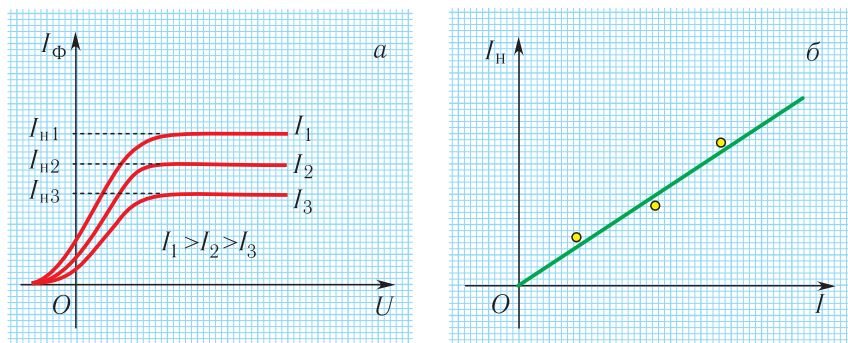


Рис. 173. *а* — вольтамперная характеристика фотоэффекта при различных интенсивностях падающего излучения; *б* — зависимость силы фототока насыщения от интенсивности падающего излучения

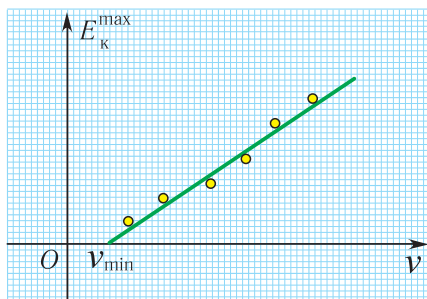


Рис. 174. График зависимости максимальной кинетической энергии  $E_k^{\max}$  фотоэлектронов от частоты  $\nu$  падающего излучения

диапазоне  $0 \leq E_k \leq E_k^{\max}$ , так как фотоэлектроны часть своей энергии, полученной от падающего излучения, передают частицам вещества до вылета с его поверхности.

На рисунке 174 представлена зависимость  $E_k^{\max}$  от частоты падающего излучения.

**3. Для каждого вещества существует граничная частота  $\nu_{\min}$  такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности (третий закон фотоэффекта).**

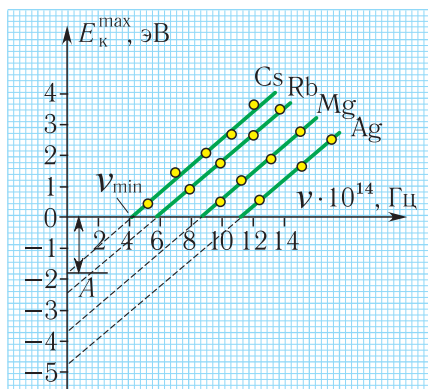


Рис. 175. Графики зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов  $E_k^{\max}$  от частоты  $\nu$  падающего излучения для Cs, Rb, Mg и Ag

координат, то сила фототока насыщения равна нулю ( $I = 0$ ) только при отсутствии излучения. Иными словами, фотоэффект наблюдается даже при малых значениях интенсивности падающего излучения.

**2. Максимальная кинетическая энергия  $E_k^{\max}$  фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  падающего излучения (второй закон фотоэффекта).**

Подчеркнем, что кинетическая энергия  $E_k$  фотоэлектронов, вылетающих из фотокатода, изменяется в некотором

Эта минимальная частота  $\nu_{\min}$  называется **красной границей** фотоэффекта. Такое название связано с тем, что минимальной частотой излучения в видимом диапазоне обладает излучение, соответствующее красному цвету.

Заметим, что красная граница фотоэффекта для различных веществ совсем не обязательно соответствует красному цвету. Например, для рубидия она соответствует желтому цвету, для кальция — синему, а для некоторых веществ может вообще находиться как в инфракрасной, так и в ультрафиолетовой областях спектра.

На рисунке 175 приведены экспериментальные зависимости максимальной

кинетической энергии фотоэлектронов  $E_k^{\max}$  от частоты падающего излучения для цезия (Cs), рубидия (Rb), магния (Mg) и серебра (Ag). Как видно из рисунка 175, экспериментальные прямые параллельны друг другу, причем точки пересечения графиков с осью абсцисс (частот) определяют красные границы фотоэффекта для каждого из них.

При частотах больших  $\nu_{\min}$  излучение даже очень малой интенсивности вызывает фотоэффект. Кроме того, между моментом включения источника излучения и моментом вылета электронов из образца фактически нет задержки во времени: электроны вылетают из вещества через промежуток времени порядка  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  с после начала облучения, т. е. практически мгновенно.

Следует заметить, что во время исследования фотоэффекта Столетовым еще ничего не было известно об электроне, который будет открыт Джозефом Джоном Томсоном только в 1897 г.

Подчеркнем, что установленные экспериментально законы фотоэффекта невозможно объяснить на основе представлений о том, что свет — это электромагнитная волна. На основе этих представлений можно объяснить только первый из приведенных экспериментальных законов фотоэффекта: чем больше энергия падающего света, тем больше электронов вылетает из вещества. Объяснить же 2-й и 3-й законы фотоэффекта в рамках классической теории излучения не представляется возможным.

Так, например, непонятно, почему максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения. Невозможно также объяснить существование красной границы фотоэффекта. Действительно, даже при малой частоте падающего излучения, но при длительном воздействии электромагнитной волны на электрон ему можно сообщить энергию, необходимую для вылета из вещества. Следовательно, исходя из волновых представлений, красная граница фотоэффекта не должна существовать. Все эти противоречия были сняты квантовой теорией.

Квантовые представления были впервые введены немецким физиком Максом Планком. Он сделал фундаментальное предположение, что излучение и поглощение электромагнитных волн атомами и молекулами происходит не непрерывно, а отдельными порциями энергии — квантами. Соответственно, под квантом следует понимать минимальную порцию излучаемой или поглощаемой энергии. Энергия кванта прямо пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где  $h$  — коэффициент пропорциональности, который называют **постоянной Планка**. Это — фундаментальная постоянная.

16 ноября 2018 г. на заседании Генеральной ассамблеи мер и весов значение постоянной Планка было принято равным:

$$h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Приближенное значение постоянной Планка, применяемое при решении задач:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Энергия любой колебательной системы (атома, молекулы), совершающей колебания с частотой  $\nu$ , может принимать лишь определенные дискретные значения, отличающиеся на целое число элементарных порций — **квантов энергии**:

$$E_n = nE = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $n$  — целое положительное число.

Следовательно, атом (молекула) может обладать не любой энергией, а лишь энергией, кратной  $\Delta E = h\nu$ . Таким образом, впервые в физике появилась идея о квантовании энергии.

14 декабря 1900 г. Планк доложил свои результаты на заседании Немецкого физического общества, который и считают днем рождения квантовых представлений. Появился квант энергии как дискретная порция энергии. Планк относил дискретность энергии к свойствам вещества, а излучение рассматривалось как электромагнитные волны.

После выдвижения гипотезы Планка (1900 г.) началось интенсивное развитие квантовых представлений в физике, которые к 1925—1928 гг. превратились в стройную и логичную квантовую теорию, открывшую «новую эру» в развитии физики.

► В 1898 г. немецкий физик Филипп Ленард и английский физик Джозеф Джон Томсон определили отношение заряда  $q$  частицы, вылетающей с поверхности металла при фотоэффекте, к ее массе  $m$  (так называемый удельный заряд —  $\frac{q}{m}$ ) по ее отклонению в электрическом и магнитном полях. Эти измерения дали то же значение, что и отношение заряда электрона к его массе  $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ . Таким образом, было доказано, что выбиваемые светом заряженные частицы — электроны.

► Слово квант происходит от лат. *quantum* — сколько или как много. Вообще, это слово обозначает часть, долю или неделимую порцию. Планк поэтически назвал новую фундаментальную постоянную  $h$  — «таинственным послем из реального мира».



За работы по определению удельного заряда электрона  $\frac{e}{m}$ , которые привели к открытию первой элементарной частицы — электрона, Дж. Томсон в 1906 г. был удостоен Нобелевской премии по физике. В 1918 г. Макс Планк был удостоен Нобелевской премии по физике «...в знак признания услуг, которые он оказал физике своим открытием квантов энергии».



1. В чем состоит сущность явления внешнего фотоэффекта? Внутреннего фотоэффекта?
2. Когда и кем было открыто явление внешнего фотоэффекта?
3. Нарисуйте схему экспериментальной установки Столетова и объясните суть проделанных им экспериментов.
4. Объясните особенности вольтамперной характеристики фотоэффекта.
5. Сформулируйте экспериментальные законы фотоэффекта. Какие из них невозможно объяснить с точки зрения волновой теории света?
6. В чем заключается гипотеза Планка?
7. Запишите приближенное значение постоянной Планка.



## § 28. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

■ Изучение законов фотоэффекта привело ученых к неожиданному выводу: при взаимодействии с веществом (поглощении или излучении) свет ведет себя подобно движущимся частицам (квантам). Что это за частицы? Каковы их свойства и как они связаны с волновыми характеристиками света?



Электронвольт — энергия, которую приобретет частица с зарядом, равным элементарному, при перемещении между двумя точками с ускоряющей разностью потенциалов 1 В ( $1,0 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Развивая идеи М. Планка, А. Эйнштейн в 1905 г. для объяснения экспериментальных законов внешнего фотоэффекта выдвинул гипотезу о дискретности самого электромагнитного излучения — свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов). Он рассмотрел элементарные процессы поглощения и испускания этих квантов.

По гипотезе Эйнштейна монохроматическое электромагнитное излучение частотой  $\nu$  обладает не только волновыми свойствами, но и свойствами характерными для потока частиц. Каждая такая частица движется со скоростью света  $c$  и несет квант энергии  $E = h\nu$ . Назвать эти частицы **фотонами** предложил в 1928 г. американский физик Артур Комптон.

Энергия фотона может быть выражена через длину волны  $\lambda$ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$



Масса фотона, движущегося со скоростью света в вакууме, равна нулю. Таким образом, фотон — удивительная частица, которая обладает энергией  $E = h\nu$ , импульсом  $\vec{p}$ . Вследствие того что скорость фотона равна скорости света в вакууме, то его масса равна нулю ( $m = 0$ ). Такие частицы называют *безмассовыми*.

Фотон является элементарной частицей, только в отличие от других элементарных частиц он не имеет массы, а потому «обречен» всегда двигаться со скоростью распространения света.

Таким образом, фотон обладает следующими свойствами:

- существует только в движении;
- является безмассовой частицей ( $m = 0$ );
- электрически нейтрален ( $q = 0$ );
- скорость его движения равна скорости распространения света в вакууме ( $v = c$ ) во всех ИСО;
- энергия фотона пропорциональна частоте соответствующего электромагнитного излучения ( $E = h\nu$ ).



Рассмотрим объяснение экспериментальных законов фотоэффекта, предложенное Эйнштейном на основе квантовых представлений. При освещении электрода электромагнитным излучением (см. рис. 171) происходит взаимодействие фотонов с электронами вещества. Если энергия фотона  $E = h\nu$  достаточно велика, то какой-либо из электронов после поглощения фотона может получить энергию, достаточную для того, чтобы покинуть облучаемый образец. Электроны, покинувшие образец, имеют некоторую скорость, поэтому даже при отсутствии напряжения между электродами сила фототока не равна нулю. Именно поэтому вольтамперная характеристика фотоэффекта при напряжении, равном нулю, не проходит через нуль (см. рис. 172, в).

Для того чтобы покинуть вещество, электрон должен совершить работу против сил взаимодействия электрона с атомами вещества. Таким

образом, минимальная энергия, необходимая для выбивания электрона с поверхности вещества, называется **работой выхода** и обозначается  $A_{\text{вых}}$  ( $A_{\text{вых}} > 0$ ). Для металлов эта работа связана с преодолением сил взаимодействия электронов с положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые удерживают электрон в веществе. Работа выхода для металлов обычно составляет несколько электронвольт (см. табл. 9).

Таблица 9. Фотоэлектрические характеристики некоторых веществ

| Вещество | $A_{\text{вых}}, \text{эВ}$ | $\nu_{\text{min}} \cdot 10^{-14} \text{ Гц}$ | $\lambda_{\text{к}}, \text{нм}$ |
|----------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| Цезий    | 1,9                         | 4,6  | 650                             |
| Калий    | 2,2                         | 5,3  | 560                             |
| Натрий   | 2,3                         | 5,6  | 540                             |
| Кальций  | 2,7                         | 6,5  | 460                             |
| Цинк     | 3,7                         | 8,9  | 340                             |
| Серебро  | 4,3                         | 10   | 260                             |
| Вольфрам | 4,5                         | 11   | 280                             |
| Никель   | 5,0                         | 12   | 250                             |
| Платина  | 5,3                         | 13   | 230                             |

Оставшаяся часть энергии поглощенного кванта составляет кинетическую энергию освобожденного электрона. Наибольшей кинетической энергией  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$  будут обладать те электроны, которые поглотят кванты света вблизи поверхности металла и вылетят из него, не успев потерять энергию при столкновениях с другими частицами в металле.

На основе закона сохранения энергии можно записать следующее уравнение для фотоэлектрона:

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

Это соотношение называют **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Отметим, что  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{\text{к}}^{\max}$  — это максимальная кинетическая энергия электрона ( $v_{\max} \ll c$ ), которой он может обладать, вылетев из вещества. Из-за различных потерь кинетическая энергия электрона будет меньше расчетного значения.



Используя уравнение Эйнштейна, можно объяснить экспериментальные законы фотоэффекта.

**Объяснение первого закона фотоэффекта.** Сила фототока насыщения пропорциональна общему числу фотоэлектронов, покидающих поверхность металла за единицу времени. Число таких фотоэлектронов, в свою очередь, пропорционально числу фотонов, падающих на поверхность за это же время. Именно пропорционально, а не равно, так как часть квантов света поглощается кристаллической решеткой, и их энергия переходит во внутреннюю энергию металла. Таким образом, увеличение интенсивности падающего света приводит к росту числа фотоэлектронов, покидающих поверхность металла.

**Объяснение второго закона фотоэффекта.** Фотоэлектрон вырывается из катода за счет действия одного кванта падающего излучения. Поэтому кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от полной энергии волны, а от энергии одного кванта, т. е. частоты  $\nu$ . При увеличении частоты  $\nu$  падающего света максимальная кинетическая энергия  $E_{\text{к}}^{\max}$  фотоэлектронов возрастает линейно, как следует из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта (2), согласно соотношению:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (3)$$

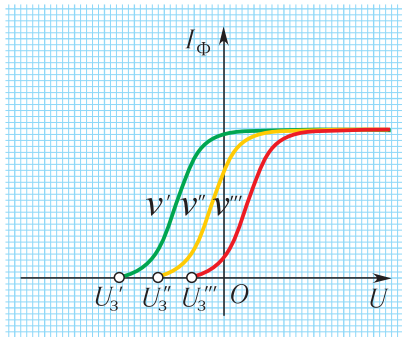


Рис. 176. Вольтамперные характеристики внешнего фотоэффекта при различных частотах падающего излучения ( $\nu' > \nu'' > \nu'''$ )

Известно, что фототоком можно управлять, подавая на металлические пластины различные напряжения. Если на систему подать небольшое напряжение обратной полярности, «затрудняющее» вылет электронов, то сила тока уменьшится, так как теперь фотоэлектронам, кроме работы выхода, придется совершать дополнительную работу против сил электрического поля.

При некотором отрицательном значении напряжения  $U_3$  электроны затормаживаются и, не достигнув поверхности анода, возвращаются на катод. Сила тока в цепи при этом будет равна нулю (рис. 176).



Величину  $U_3$ , при которой сила тока в цепи равна нулю, называют *задерживающим напряжением*. Следовательно, вся кинетическая энергия электронов затрачивается на работу против сил электрического поля. При этом максимальная кинетическая энергия электронов выражается через задерживающее напряжение следующим образом:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = eU_3. \quad (4)$$

**Объяснение третьего закона фотоэффекта.** Если частота  $\nu$  падающего излучения меньше граничной частоты  $\nu_{\text{min}}$  ( $\nu < \nu_{\text{min}}$ ), при которой  $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$ , то испускания электронов не происходит ( $v_{\text{max}} = 0$ ). Таким образом, фотоэффект отсутствует, если частота излучения оказывается меньше некоторой характерной для данного вещества величины  $\nu_{\text{min}}$ .

Следовательно, **красную границу фотоэффекта** можно найти из условия:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (5)$$

Она зависит только от работы выхода электронов, т. е. определяется строением металла и состоянием его поверхности.

Длина волны  $\lambda_{\text{к}}$  излучения, соответствующая красной границе фотоэффекта, может быть определена из соотношения:

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{c}{\nu_{\text{min}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}. \quad (6)$$



► С появлением мощных монохроматических источников света (лазеров) удалось наблюдать процессы многофотонного поглощения. В таких процессах, прежде чем покинуть вещество, электрон может поглотить не один, а несколько фотонов. Поэтому уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта запишется в виде:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = N h \nu - A_{\text{вых}},$$

где  $N$  — число фотонов, за счет поглощения которых вылетел электрон. Следовательно, для многофотонного фотоэффекта частота красной границы уменьшается в  $N$  раз, а соответствующая ей длина волны в  $N$  раз увеличивается:

$$(\nu_{\text{min}})_N = \frac{A}{Nh}.$$

В настоящее время трудно представить себе современную науку и технику без применения устройств (приемников излучения),



Рис. 177. Фотоэлемент: *а* — вакуумный (газонаполненный); *б* — полупроводниковый

преобразующих световые сигналы в электрические. Такие устройства называются *фотоэлементами* (рис. 177). Фотоэлементы используются для контроля пассажиропотока в метро, для включения и выключения освещения на улицах, для управления производственными процессами, в военной технике: в самонаводящихся снарядах, для сигнализации и локации. Инфракрасные фотоэлементы широко используются в пультах дистанционного управления различными бытовыми электронными приборами (телевизор, кондиционер и т. д.).

▶ В 1921 г. при присуждении Альберту Эйнштейну Нобелевской премии по физике в решении Нобелевского комитета указывалось, что «премией особенно отмечается объяснение законов фотоэлектрического эффекта». Первый фотоэлемент на внешнем фотоэффекте был создан Столетовым в 1888 г.



1. В чем сущность гипотезы Эйнштейна?
2. Что называется фотоном? Перечислите основные свойства фотона.
3. По какой формуле можно определить энергию фотона?
4. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и назовите все физические величины, входящие в него.
5. Покажите, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта является следствием закона сохранения и превращения энергии.
6. Перечислите условия, необходимые для возникновения фотоэффекта.
7. Что такое задерживающее напряжение?
8. Что называется красной границей фотоэффекта? От чего она зависит?
9. Как квантовая теория объясняет существование граничной частоты фотоэффекта? Запишите формулу для красной границы фотоэффекта.
10. Объясните законы фотоэффекта исходя из квантовой теории света.
11. Почему энергия фотоэлектронов для данного вещества определяется только частотой падающего света?

### Примеры решения задач

1. Монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 450$  нм падает на поверхность натрия. Определите: а) энергию  $E$  фотона этого света; б) мо-

дугль импульса  $p$  фотона падающего света; в) красную границу  $\nu_{\min}$  фотоэффекта для натрия; г) максимальную кинетическую энергию  $E_{\text{к}}^{\max}$  фотоэлектронов.

Дано:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$E \text{ — ? } p \text{ — ? } \nu_{\min} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{к}}^{\max} \text{ — ?}$$

Решение

а) Энергия фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} =$$

$$= 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,8 \text{ эВ.}$$

б) Модуль импульса фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Красная граница связана с работой выхода соотношением:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad \nu_{\min} = \frac{3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

г) Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта находим, что максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}, \quad E_{\text{к}}^{\max} = 2,8 \text{ эВ} - 2,3 \text{ эВ} = 0,50 \text{ эВ.}$$

Ответ: а)  $E = 2,8 \text{ эВ}$ ; б)  $p = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ; в)  $\nu_{\min} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ; г)  $E_{\text{к}}^{\max} = 0,50 \text{ эВ}$ .

2. Под действием света длиной волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$  с поверхности металла вылетают электроны, при этом их энергия равна половине энергии фотонов, вызывающих фотоэффект. Определите длину волны  $\lambda_{\text{к}}$ , соответствующую красной границе фотоэффекта.

Дано:

$$\lambda = 400 \text{ нм} = 4,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\lambda_{\text{к}} \text{ — ?}$$

Решение

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

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

Красную границу фотоэффекта определим из соотношения:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{min}}.$$

По условию задачи:

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

Тогда  $h\nu = h\nu_{\text{min}} + \frac{h\nu}{2}$ , откуда следует, что  $\nu_{\text{min}} = \frac{\nu}{2}$ .

Так как длина волны  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , то

$$\lambda_{\text{к}} = 2\lambda, \quad \lambda_{\text{к}} = 2 \cdot 400 \text{ нм} = 800 \text{ нм}.$$

Ответ:  $\lambda_{\text{к}} = 800 \text{ нм}$ .

### Упражнение 19

1. Определите энергию  $E$  фотона для излучения частотой  $\nu = 5,4 \cdot 10^{14}$  Гц.
2. Вычислите энергию  $E_1$  фотона видимого света длиной волны  $\lambda_1 = 0,60$  мкм и сравните ее с энергиями фотонов ультрафиолетового излучения длиной волны  $\lambda_2 = 0,252$  мкм, рентгеновского излучения длиной волны  $\lambda_3 = 0,10$  нкм и  $\gamma$ -излучения  $\lambda_4 = 0,10$  пм.
3. Определите красную границу  $\nu_{\text{min}}$  фотоэффекта для некоторого металла, если работа выхода электрона из него  $A_{\text{вых}} = 3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж.
4. Определите длину волны  $\lambda$  ультрафиолетового излучения, падающего на поверхность цинка, при которой модуль максимальной скорости вылетающих фотоэлектронов составляет  $v_{\text{max}} = 800 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .
5. Определите работу выхода  $A_{\text{вых}}$  электрона из катода, используя вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента (рис. 178). Катод освещается светом с длиной волны  $\lambda = 200$  нм. Найдите число  $N$  электронов, выбиваемых из фотокатода в единицу времени.
6. Определите количество  $N$  фотонов с частотой  $\nu = 9,5 \cdot 10^{12}$  Гц, которое содержится в импульсе излучения с энергией  $E = 8,8 \cdot 10^{-18}$  Дж.
7. Определите максимальную кинетическую энергию  $E_{\text{к}}^{\text{max}}$  и модуль максимальной скорости  $v_{\text{max}}$  фотоэлектрона, вылетевшего из натрия

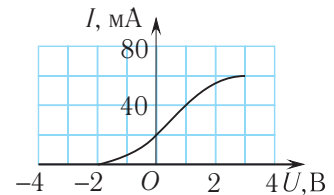


Рис. 178

при облучении его ультрафиолетовым излучением длиной волны  $\lambda = 200$  нм.

8. На металлическую пластину падает монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 413$  нм. Определите работу выхода  $A_{\text{вых}}$  (эВ), если задерживающее напряжение  $U_3 = 1,0$  В.

## § 29. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм



§28-1

Словечко громкое всегда  
Из затрудненья вас выводит!

*И. Гёте. Фауст*

- После открытия фотона в научном мире с новой силой «вспыхнула» старая дискуссия: так что же такое свет — волна или поток частиц? Как «примирить» друг с другом эти противоречивые представления? Какие из этого следуют выводы?



Давлением называется скалярная физическая величина, численно равная отношению модуля силы, действующей по нормали к площадке, к ее площади  $p = \frac{F}{S}$ . В СИ единицей давления является паскаль (Па):  $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$ .

Из законов механики следует, что тело при ударе о некоторую поверхность оказывает на нее механическое давление, обусловленное изменением импульса тела. Причем давление тела на поверхность оказывается в случае как упругого, так и не упругого удара. А будет ли возникать подобный эффект при отражении и поглощении света некоторой поверхностью? Иными словами, оказывает ли свет давление на поверхность, с которой взаимодействует? После завершения построения Максвеллом волновой теории света ответы на эти вопросы стали очевидными. Свет как электромагнитная волна обладает энергией и импульсом, поэтому оказывает давление на поверхность, на которую он падает.

Русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1899 г. впервые измерил световое давление. Он подвесил на тонкой нити коромысло с парой крылышек на концах (рис. 179): поверхность у одного из них была зачерненной,

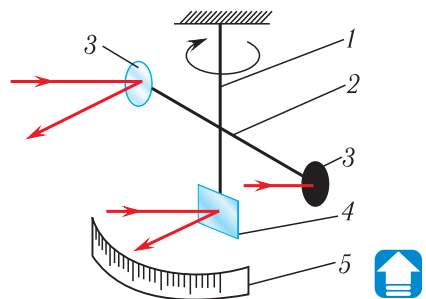


Рис. 179. Схема опыта Лебедева: 1 — подвес; 2 — коромысло; 3 — крылышки; 4 — зеркало; 5 — шкала



обеспечивая почти полное поглощение, а у другого — зеркальной, обеспечивая полное отражение. Подвес с крылышками образовал чувствительные крутильные весы, помещаемые в сосуд, воздух в котором был откачан.

Свет практически полностью отражался от зеркальной поверхности, и его давление на зеркальное крылышко было вдвое больше, чем на зачерненное. Вследствие этого создавался момент сил, поворачивающий коромысло (см. рис. 179). Измеряя угол поворота коромысла, можно было судить о силе, действовавшей на крылышки, а следовательно, определить световое давление.



Факт существования светового давления имеет большое значение, так как доказывает наличие у света не только энергии, но и импульса. Это свидетельствует о материальности электромагнитного излучения, представляющего собой еще одну форму существования материи — в виде электромагнитного поля.

К тому же со времен И. Ньютона и Х. Гюйгенса (XVII в.) представления о природе света были противоречивы. Одни ученые во главе с Ньютоном считали свет потоком частиц — корпускул (от лат. *corpusculum* — маленькая частица), другие вслед за Гюйгенсом полагали, что свет представляет собой не что иное, как волны.

До начала XIX в. обе точки зрения отстаивались с переменным успехом. Так, исходя из гипотезы о корпускулах, можно было объяснить законы прямолинейного распространения и отражения света, а такие явления, как интерференция, дифракция света, объяснялись только его волновыми свойствами.

Однако в XX в. было установлено, что в целом ряде явлений, таких как, например, фотоэффект, свет ведет себя как совокупность частиц с определенной энергией и импульсом. Одновременное наличие у объекта волновых и корпускулярных свойств получило название **корпускулярно-волнового дуализма**.

В одних процессах в большей мере проявляются волновые свойства света, в других — корпускулярные. Долгое время природа этого дуализма была совершенно непонятна, и он казался искусственным объединением противоречивых свойств материи.

Только после создания квантовой механики выяснилось, что «раздвоение личности» света закономерно и представляет собой проявление специфических свойств, присущих микромиру в целом.

Французский физик Луи де Бройль в 1923 г. высказал смелое предположение, что корпускулярно-волновой дуализм должен иметь место для всех микрообъектов.

В 1927 г. гипотеза де Бройля о наличии волновых свойств у электрона и других микро-частиц была проверена экспериментально, когда американские физики Клинтон Дэвиссон и Люстер Джермер впервые наблюдали дифракцию электронов на кристалле никеля. Так на рисунке 180 представлена современная фотография дифракции электронов на слюде.

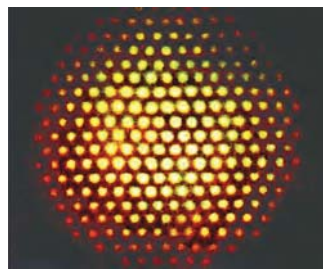


Рис. 180. Картина дифракции электронов на слюде

Современные эксперименты позволяют последовательно наблюдать процесс образования дифракционной картины при увеличении числа электронов, проходящих через щель. Компьютерное моделирование этого процесса представлено на рисунке 181. Из него видно, что при увеличении числа электронов все более отчетливо формируются дифракционные максимумы (см. рис. 181, в).



Рис. 181. Результаты компьютерного моделирования явления дифракции  $N$  электронов на двух щелях:  $a$  —  $N = 27$ ;  $б$  —  $N = 70$ ;  $в$  —  $N = 735$

Способность к интерференции и дифракции была обнаружена не только у электронов, но и у других частиц — протонов, нейтронов и альфа-частиц.

Волновые свойства частиц нашли свое применение в электронной оптике, занимающейся исследованием, построением и использованием электронных пучков для получения изображений.

Так использование волновых свойств пучка электронов позволило создать новое поколение микроскопов — электронные микроскопы (рис. 182), значительно превосходящие по степени увеличения оптические микроскопы.

Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм присущ не только свету, но и любым частицам, в соответствии с которыми используются как волновые, так и корпускулярные представления, в зависимости от конкретной ситуации.



Рис. 182. Электронный микроскоп

► Несмотря на сравнительно малое значение светового давления при обычных условиях, оно играет достаточно существенную роль в природе. В 1604 г. немецкий астроном Иоганн Кеплер объяснил изогнутую форму хвоста кометы (рис. 183) действием сил светового давления со стороны Солнца (рис. 184). Кроме того, именно давление света «изнутри» препятствует гравитационному сжатию звезд, оно сокращает срок службы искусственных спутников Земли вследствие постепенного уменьшения радиуса их орбиты.



Рис. 183. Комета Галлея



Рис. 184. Движение кометы вокруг Солнца (хвост кометы всегда направлен от Солнца)

В настоящее время активно обсуждаются и реализуются проекты космических кораблей — «парусников», которые приводятся в движение «солнечным ветром».

Уже первый электронный просвечивающий микроскоп (Э. Руска, 1933 г.) позволял изучать детали в десять раз меньшие, чем те, которые способны разрешать самые «мощные» оптические микроскопы. Дальнейшие исследования позволили сотрудникам лаборатории фирмы IBM в Цюрихе (Швейцария) Г. Биннингу и Г. Рореру в 1981 г. создать электронный сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий рассмотреть даже «отдельный» атом.

Группа специалистов Токийского университета 4 ноября 2010 г. впервые в истории с помощью электронного микроскопа сумела «сфотографировать» самый легкий и самый маленький атом — атом водорода — (рис. 185).

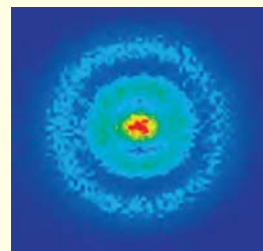


Рис. 185. «Фотография» атома водорода



В 1929 г. Луи де Бройль за открытие волновой природы электрона был удостоен Нобелевской премии по физике.

В 1986 г. Герду Биннингу и Гейнриху Рореру совместно с Эрнстом Руска была присуждена Нобелевская премия по физике за создание электронного микроскопа.





1. Как электромагнитная теория объясняет давление света?
2. Опишите суть эксперимента Лебедева по измерению светового давления.
3. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм света? Перечислите явления, в которых проявляются волновые свойства света; корпускулярные (квантовые) свойства света.



## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 5

Энергия колебательной системы, совершающей гармонические колебания с частотой  $\nu$ , может, согласно гипотезе Планка, принимать лишь определенные дискретные значения, отличающиеся на целое число элементарных порций — **квантов энергии**.

Эйнштейн развил гипотезу Планка, представив, что свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов).

Наименьшая порция (**квант**) энергии, которую несет излучение частотой  $\nu$ , определяется по формуле:

$$E = h\nu,$$

где постоянная  $h$  — фундаментальная постоянная — **постоянная Планка**. Ее приближенное значение:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Явление испускания электронов веществом под действием падающего на него света получило название **внешнего фотоэффекта**. Испускание веществом каких-либо частиц называется **эмиссией**. Поэтому внешний фотоэффект называют также **фотоэлектронной эмиссией (фотоэмиссией)**, а вылетающие электроны — **фотоэлектронами**.

Экспериментально установлены следующие **законы внешнего фотоэффекта**:

1. Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна интенсивности  $I$  падающего излучения.

2. Максимальная кинетическая энергия  $E_k^{\max}$  фотоэлектронов не зависит от интенсивности  $I$  падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  падающего излучения.

3. Для каждого вещества существует граничная частота  $\nu_{\min}$  такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности.

**Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:**

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



**Красная граница** фотоэффекта — наименьшая частота излучения, при которой наблюдается фотоэффект:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h},$$

зависит только от работы выхода электронов для данного вещества ( $A_{\text{вых}} > 0$ ), т. е. определяется химической природой вещества и состоянием его поверхности.



Под **корпускулярно-волновым дуализмом** понимают тот факт, что всем объектам в природе присущи как волновые, так и корпускулярные свойства. В одних условиях в большей мере проявляются волновые, в других — корпускулярные свойства объектов.

### **Задания для самостоятельных исследований**

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Г. Герц, А. Г. Столетов, М. Планк, П. Н. Лебедев, Луи де Бройль).

2. Подготовьте рефераты на темы: «Применение фотоэлементов в солнечных батареях, для сигнализации и локации, для управления производственными процессами».



## Глава 6

# Физика атома

### § 30. Явления, подтверждающие сложное строение атома. Ядерная модель атома

Еще, быть может, каждый атом —  
Вселенная, где сто планет;  
Там все, что здесь, в объеме сжатом,  
Но также то, чего здесь нет.

*В. Брюсов*

- Попытки объяснить структуру материи привели античных исследователей к формулировке идей атомизма. Атом в переводе с греч.  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron$  (атом) означает «неделимый». Поэтому в рамках этих представлений он не имел никакой внутренней структуры. Однако по мере накопления экспериментальных данных стало понятно, что атом совсем «не прост», поскольку имеет свои составные части. Как устроен атом? Какие модели атома были предложены физиками? В чем их различия?



Атом гелия содержит положительно заряженное ядро и два электрона, которые обращаются вокруг него. Ядро атома гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ) является  $\alpha$ -частицей.

Древнегреческий ученый Демокрит в V в. до н. э. пришел к идее о существовании мельчайших и неделимых частиц, которые он назвал **атомами**. Спустя более 2,4 тыс. лет было доказано, что атом имеет сложную структуру. Последнее десятилетие XIX в. ознаменовалось крупнейшими открытиями в физике. Практически одновременно были открыты явление естественной радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г.) и первая элементарная частица — электрон (Дж. Дж. Томсон, Э. Вихерт, 1897 г.). Поскольку радиоактивное излучение содержало положительно и отрицательно заряженные частицы, то естественно было предположить, что

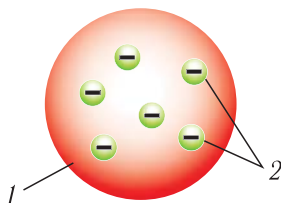


Рис. 186. Модель атома Томсона:  
1 — положительно заряженный шар; 2 — электроны

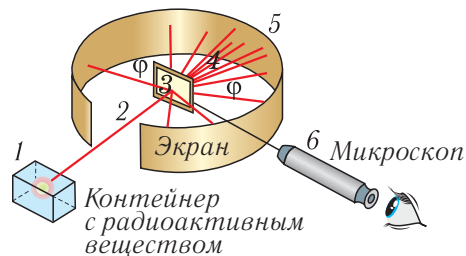


Рис. 187. Схема экспериментальной установки Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц:  
1 — источник  $\alpha$ -частиц; 2 —  $\alpha$ -частицы;  
3 — золотая фольга; 4 — рассеянные  $\alpha$ -частицы; 5 — сцинтилляционный экран;  
6 — микроскоп

такие частицы входят в состав атомов. А с открытием электрона стало ясно, что именно электроны входят в состав атома.

В начале XX в. широкое распространение получила «пудинговая» модель атома английского физика Джозефа Джона Томсона. Согласно этой модели положительный заряд равномерно распределен по всему объему атома в виде некой однородной массы, которую Томсон называл «сферой однородной положительной электризации». Так как атом электрически нейтрален, то электроны «плавают» в этой положительно заряженной среде (как изюминки в пудинге) и полностью компенсируют ее положительный электрический заряд (рис. 186).

Для проверки справедливости этой модели атома английский физик Эрнест Резерфорд с сотрудниками в 1911 г. выполнил эксперименты, результаты которых оказались в противоречии с моделью атома Томсона.

Пучок  $\alpha$ -частиц направлялся на тонкую золотую фольгу толщиной около 400 нм (рис. 187), что соответствовало примерно 1600 слоям атомов.

Световые вспышки от частиц, прошедших через фольгу, регистрировались на экране, покрытом специальным веществом, с помощью микроскопа.

Исходя из модели атома Томсона вследствие равномерного распределения заряда по всему объему атома ожидалось, что при столкновении  $\alpha$ -частиц с атомами они легко пройдут через фольгу и будут незначительно отклоняться от прямолинейной траектории (рассеиваться). При

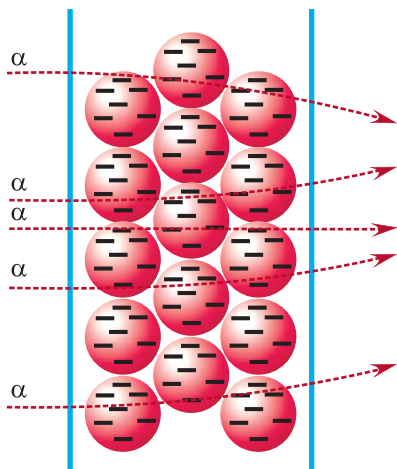


Рис. 188. Предполагаемое рассеяние  $\alpha$ -частиц атомами золота согласно модели Томсона

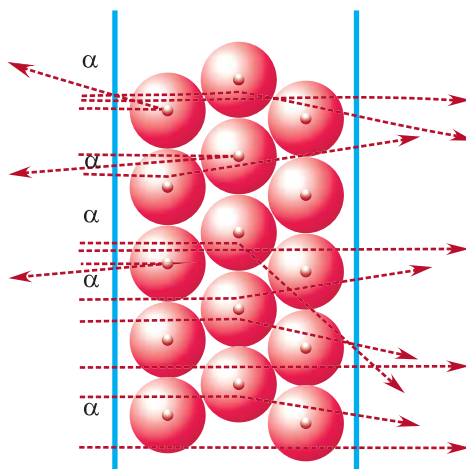


Рис. 189. Наблюдаемое рассеяние  $\alpha$ -частиц в опытах Резерфорда

этом картина их рассеяния должна была быть примерно такой, как на рисунке 188.

Однако полученные результаты экспериментов совершенно не соответствовали результатам расчетов Резерфорда. В экспериментах значительная часть  $\alpha$ -частиц действительно отклонялась от направления своего начального движения на малые углы  $\theta$  от нуля до ( $4^\circ$ — $6^\circ$ ). Но были и такие частицы, которые рассеивались на углы больше  $90^\circ$  (рис. 189) или даже возвращались назад. Как писал Резерфорд: «Это было почти столь же неправдоподобным, как если бы вы произвели выстрел по кусочку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас».

Примерно одна из 20 000  $\alpha$ -частиц испытывала отклонение на угол больше  $90^\circ$ , одна из 40 000 — на угол больше  $120^\circ$ , а одна из 70 000 — на угол больше  $150^\circ$ .

Из результатов экспериментов следовало, что внутри атома имеется очень сильное электрическое поле, которое создается положительным зарядом, сконцентрированным в очень малом объеме. Резерфорд предложил для этого заряда термин «ядро». Размер ядра мал, но в нем сосредоточена практически вся масса атома. При приближении положительно заряженной  $\alpha$ -частицы к ядру, в соответствии с законом Кулона, возникает большая сила отталкивания, которая существенно изменяет траекторию  $\alpha$ -частиц (рис. 190, а).

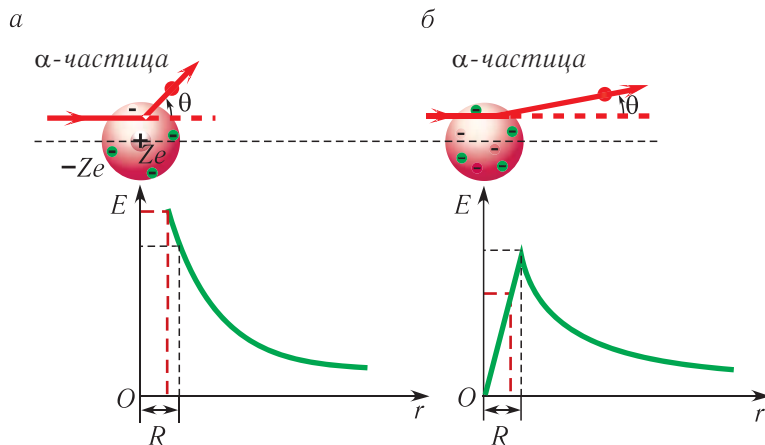


Рис. 190. Модели атома и зависимости модуля напряженности электрического поля от расстояния: *а* — ядерная модель; *б* — модель атома Томсона

В модели атома Томсона электрическое поле соответствует электрическому полю равномерно заряженного по объему шара (рис. 190, *б*), и при приближении к центру атома модуль его напряженности стремится к нулю. Таким образом, в этом случае не было бы  $\alpha$ -частиц, рассеянных на большие углы.

На основании анализа результатов проведенных экспериментов Резерфорд в 1911 г. предложил **ядерную модель атома** (рис. 191, *а, б*), основные положения которой следующие:

1) в центре атома расположено ядро размером  $d \leq 10^{-14}$  м, его заряд  $q = +Ze$ , где  $Z$  — порядковый номер элемента в периодической системе элементов Менделеева (рис. 191, *а*);

2) почти вся масса атома (99,96 %) сосредоточена в положительно заряженном ядре (рис. 191, *б*);

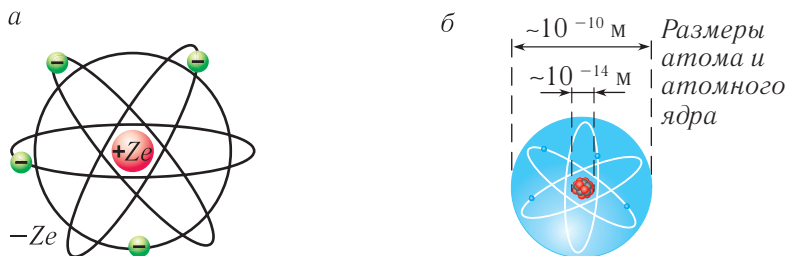


Рис. 191. Модель атома Резерфорда (ядерная модель атома)

3) ядро окружают  $Z$  движущихся электронов, образующих электронную оболочку атома. Суммарный заряд электронов  $q = Z(-e)$ , поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Подчеркнем, что электроны не могут покоиться внутри атома, так как в этом случае под действием сил притяжения Кулона к ядру они упали бы на него. Отсюда следует, что электроны вращаются вокруг ядра по определенным орбитам.

Модель атома Резерфорда называют также планетарной, поскольку она напоминает нашу Солнечную систему, в которой планеты вращаются по определенным орбитам вокруг массивного центра — Солнца.

Прогрессивность ядерной модели атома заключалась в том, что на ее основании были объяснены экспериментальные данные, полученные при изучении рассеяния  $\alpha$ -частиц. Однако дальнейший анализ показал, что она противоречила законам классической механики и электродинамики, так как не позволяла объяснить факт стабильности существования атома.

Действительно, во-первых, в соответствии с законами классической электродинамики Максвелла при ускоренном движении электронов по орбитам они должны непрерывно излучать электромагнитные волны, частота которых должна быть равна частоте вращения электронов вокруг ядра.

Во-вторых, при излучении электроны должны были терять энергию и «упасть» на ядро за промежуток времени порядка  $10^{-13}$  с (рис. 192). В таком случае атомы должны были быть неустойчивыми и иметь очень короткое время жизни.

В-третьих, частота обращения электрона вокруг ядра (по мере приближения к ядру) должна была изменяться плавно, непрерывно, поскольку частота излучения всегда равна частоте колебаний источника. Однако в проведенных экспериментах наблюдалось скачкообразное изменение частоты излучения, т. е. набор отдельных спектральных линий, разделенных темными промежутками.

Таким образом, объяснение строения и свойств атома на основании механики Ньютона и электродинамики Максвелла не являлось полным, поскольку частично приводило к противоречиям с экспериментом.

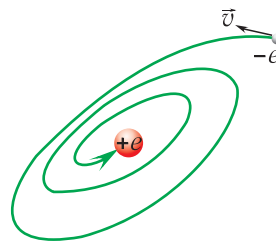


Рис. 192. Траектория «падения» электрона на ядро атома водорода

► Назвать наименьший отрицательный заряд электроном предложил в 1891 г. британский физик Джордж Джонстон Стони, а в 1897 г. ирландский физик Джордж Френсис Фицджеральд предложил использовать этот термин для названия самой частицы.

Модель атома Резерфорда с изображением электронных орбит стала популярной эмблемой XX в. Так, на рисунке 193 показана эмблема физического факультета Белорусского государственного университета.



Рис. 193. Эмблема физического факультета БГУ



1. Объясните сущность модели атома Томсона.
2. Объясните схему экспериментов Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц.
3. Почему фольга в экспериментах Резерфорда должна быть как можно тоньше?
4. Объясните причину рассеяния  $\alpha$ -частиц атомами вещества.
5. Сформулируйте основные положения ядерной модели атома.
6. Изобразите схематически ядерную модель атома.
7. Почему ядерную модель атома называют также планетарной? Какие элементы модели являются аналогами планет?
8. Какие противоречия возникают при объяснении процессов излучения энергии атомами на основе классической механики и электродинамики при использовании ядерной модели атома?
9. Определите полный заряд всех электронов в атоме: а) углерода; б) кислорода; в) железа.
10. Определите химический элемент, полный заряд ядра атома которого равен: а)  $q = 4,80 \cdot 10^{-19}$  Кл; б)  $q = 9,60 \cdot 10^{-19}$  Кл; в)  $q = 15,2 \cdot 10^{-19}$  Кл.

## § 31. Квантовые постулаты Бора

- Долгое время атом считался мельчайшей неделимой частицей вещества, являющейся носителем его физических свойств. Однако открытие радиоактивности и первой элементарной частицы (электрона) поставило под сомнение факт его неделимости. Почему атом устойчив? Какие физические процессы происходят в атомах? Как атом излучает свет?

Для преодоления противоречий, возникающих при описании строения атома на основе законов классической механики и электродинамики с экспериментальными данными, датский физик Нильс Бор в 1913 г.



в работе «О строении атомов и молекул» предложил квантовую модель атома, основанную на двух постулатах. В современном виде они формулируются следующим образом.

**I постулат Бора (постулат стационарных состояний):**

**атом может находиться в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.**

Стационарные состояния можно пронумеровать, присвоив им порядковые номера  $n = 1, 2, 3, \dots$ , причём каждому состоянию соответствует определенное дискретное значение энергии  $E_n$ .

Согласно модели Бора стационарным состояниям атома соответствуют определенные (разрешенные) орбиты, по которым электроны движутся вокруг ядра. Бор для простоты полагал, что эти орбиты представляют собой окружности, хотя в общем случае орбиты могут иметь форму эллипса, причём ядро располагается в одном из его фокусов (рис. 194).

Первый постулат противоречит как законам классической механики (энергия движущихся электронов может быть любой), так и законам классической электродинамики (ускоренно движущиеся электроны всегда излучают электромагнитные волны).

**II постулат Бора (правило частот):**

**атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:**

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}, \quad (1)$$

где  $\nu_{kn}$  — частота поглощенного или испущенного кванта излучения,  $E_k, E_n$  — энергия атома в  $k$ -м и  $n$ -м стационарном состоянии,  $h$  — постоянная Планка.

Если  $E_k > E_n$ , то при переходе происходит излучение энергии, если  $E_k < E_n$ , то — ее поглощение.

Состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия, называется **основным**, а состояния, которым соответствуют большие значения

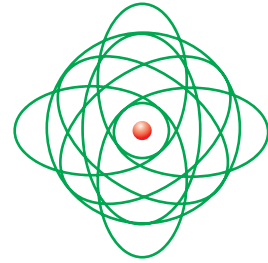


Рис. 194. Электронные орбиты в атоме по теории Бора — Зоммерфельда

энергии, — **возбужденными**. В основном энергетическом состоянии атом может находиться неограниченно долго, а в остальных стационарных состояниях  $\sim 10^{-8}$  с. Это так называемое *время жизни атома* в возбужденном состоянии.

Как следует из II постулата Бора, частота излучения атома не связана с частотой вращения электрона по орбите, она определяется разностью значений энергии атома  $E_k$  и  $E_n$  в начальном и конечном состояниях. Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается электромагнитным излучением с длиной волны

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \quad (2)$$

Таким образом, первый постулат Бора позволил объяснить дискретность значений энергии атома, а первый и второй постулаты — линейчатую структуру атомных спектров.

Бор предложил также количественное *условие квантования* для нахождения радиусов стационарных (разрешенных) круговых орбит электронов:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (3)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ , — номер орбиты,  $m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — модуль скорости электрона на  $n$ -й орбите,  $r$  — радиус  $n$ -й орбиты,  $h$  — постоянная Планка.

Таким образом, постулаты Бора основывались на трех экспериментальных предположениях — результатах исследования атомных спектров, квантовой теории излучения, развитой Планком и Эйнштейном, и ядерной (планетарной) модели атома Резерфорда.

Исходя из постулатов Бора и условия квантования орбит, можно объяснить структуру энергетических уровней простейшего атома — атома водорода, состоящего из ядра (протона) и одного электрона, вращающегося вокруг него.



Бор получил выражение для энергии атома водорода:

$$E_n = -R \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

Поэтому энергия атома водорода (4) фактически определяется только номером орбиты  $n$  электрона, так как величина  $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3}$  является постоянной, вследствие того что выражается через фундаментальные

постоянные (заряд электрона  $e$ , массу электрона  $m_e$ , постоянную Планка  $h$ , электрическая постоянная  $\epsilon_0$ ).

Согласно формуле (4) энергия атома водорода в *основном состоянии* ( $n = 1$ ) получается равной  $E_1 = -13,6$  эВ, а его энергия в *ионизированном* состоянии, когда электрон бесконечно далек от ядра ( $n = \infty$ ), равной  $E_\infty = 0$  эВ. Во втором состоянии ( $n = 2$ ) энергия  $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,40$  эВ, в третьем ( $n = 3$ ) —  $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,51$  эВ и т. д. Энергию атома водорода в любом состоянии можно рассчитать по формуле:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (5)$$

Так как энергия атома водорода может принимать только дискретный набор значений, то говорят, что она **квантована**.

Для наглядного представления стационарных энергетических состояний атома используется **энергетическая диаграмма** (рис. 195). Графически возможные значения энергии атома изображают в виде схемы уровней энергии (**энергетических уровней**) — горизонтальных прямых, проведенных на расстояниях в определенном масштабе, соответствующем разностям разрешенных значений энергии. Переходы атома из одного состояния в другое изображаются на диаграмме вертикальными линиями между соответствующими уровнями. Направление перехода обозначается стрелками.

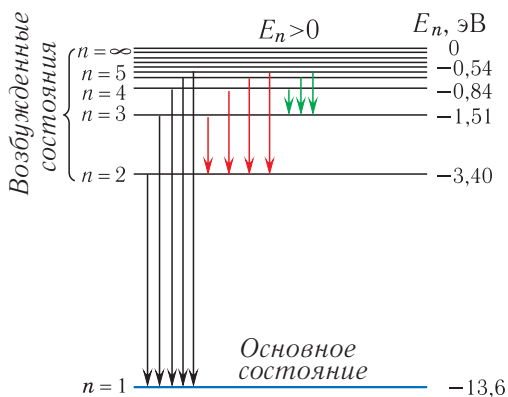


Рис. 195. Энергетическая диаграмма стационарных состояний атома водорода

Энергетическую диаграмму можно считать своеобразной «лестницей» с «нижней площадкой» (основным состоянием) и поднимающимися вверх «ступенями» (возбужденными состояниями). Формула для энергетических уровней энергии  $E_n$  атома показывает важную закономерность: чем выше поднимается над основным (первым) уровнем энергетическая «лестница», тем менее «крутыми» становятся ее ступени (на рисунке 196 это хорошо видно при  $n > 4$ ).

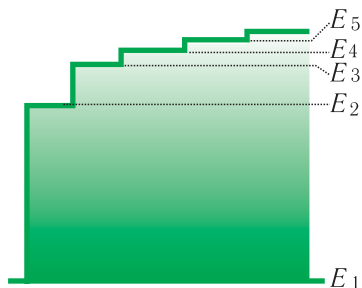


Рис. 196. Энергетическая «лестница» состояний атома водорода

Следовательно, чем дальше электрон от ядра ( $n \rightarrow \infty$ ), тем на меньшую величину отличаются соседние уровни энергии, т. е. густота энергетических уровней растет. Квантовые скачки при этом уменьшаются, вследствие чего переходы между стационарными состояниями атома все больше и больше становятся «похожими» на непрерывное изменение энергии. Энергетическая «лестница» постепенно превращается в плавный «подъем» (см. рис. 196), т. е. энергия становится почти непрерывно

меняющейся величиной, как это и было в классической теории.

Процесс удаления электрона из атома называется **ионизацией**. Для удаления электрона из атома водорода, находящегося в основном состоянии, атому необходимо сообщить энергию  $E_{\text{и}} = E_{\infty} - E_1 = 13,6$  эВ. Поэтому эту энергию  $E_{\text{и}}$  называют *энергией ионизации* атома водорода. Следовательно, **энергия ионизации** равна работе, которую необходимо совершить внешним силам для удаления электрона на «бесконечное» расстояние из атома, находящегося в основном состоянии. Здесь под «бесконечностью» понимается такое расстояние, при котором взаимодействием электрона и ядра можно пренебречь.

Отметим, что выше уровня  $n = \infty$  (при  $E > 0$ ) электрон является свободным и может иметь любую энергию.

Энергия

$$E_{\text{св}} = E_1 - E_{\infty} = -13,6 \text{ эВ}$$

называется **энергией связи** электрона в атоме водорода.

Энергия связи определяется электромагнитным взаимодействием частиц и является *отрицательной величиной*, вследствие того, что при образовании атома энергия выделяется. Абсолютное значение энергии связи характеризует *прочность связи* и *устойчивость* атома.

Энергия связи по абсолютной величине равна энергии ионизации электрона в атоме:

$$E_{\text{и}} = E_{\text{св}}.$$



► Ионизация сложных атомов может быть однократной (атом теряет один электрон), двукратной (два электрона) и т. д.

Поскольку при возбуждении атома радиус орбиты электрона возрастает, то испускание излучения атомом происходит при переходах электронов в атоме с внешних орбит на внутренние (рис. 197).

Модель атома Бора позволяет описать не только атом водорода, но и ионизированные атомы (ионы) других элементов, вокруг ядер которых, как и в атоме водорода, движется только один электрон. Такие ионы называются *водородоподобными*. Примерами таких ионов являются однократно ионизированный атом гелия ( $\text{He}^+$ ), двукратно ионизированный атом лития ( $\text{Li}^{++}$ ) и т. д.

Необходимо отметить, что энергия атома может изменяться не только при испускании или поглощении энергии, но и при столкновении атомов. При неупругом столкновении изменяется внутренняя энергия сталкивающихся атомов, и электроны в них переходят на другие уровни энергии.

Таким образом, с помощью модели атома Бора удалось:

во-первых, вычислить энергию ионизации атома водорода, хорошо согласующуюся с экспериментом. Как теория, так и эксперимент дали значение  $E_{\text{и}} = 13,6$  эВ;

во-вторых, значительно продвинуться в объяснении закономерностей периодической системы химических элементов Менделеева. Согласно модели атома Бора электроны движутся по определенным орбитам, образующим различные группы — электронные оболочки. Структура электронных оболочек определяет химические свойства элементов, которые периодически повторяются по мере заполнения оболочек электронами. Это позволило «предсказывать» свойства неизвестных элементов; так, например, был открыт элемент с порядковым номером  $Z = 72$  — гафний, по своим свойствам аналогичный цирконию ( $Z = 40$ ).

Модель атома Бора объяснила основные закономерности спектра атома водорода, хотя частично сохранила классический характер, поскольку в ней предполагалось, что электроны движутся по орбитам вокруг ядра. Однако на основе данной модели не удалось построить теорию более сложных атомов, например объяснить спектр излучения следующего за водородом атома гелия, который содержит всего два электрона. Соответ-

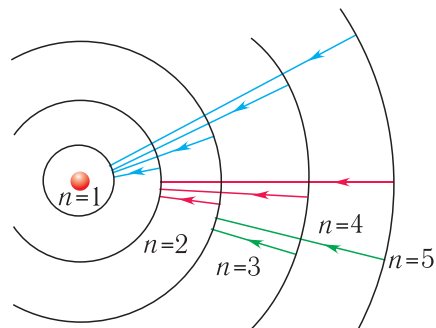


Рис. 197. Переходы электронов в атоме при испускании излучения

ственно, не могло быть и речи об объяснении на основании данной модели строения молекул, так как в них картина движения и взаимодействия электронов и атомных ядер намного сложнее, чем в атомах.

Теория атома Бора явилась важнейшим этапом на пути создания последовательной теории микроскопических явлений — квантовой механики.

▶ Планеты Солнечной системы также движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Это обстоятельство делает аналогию между ядерной моделью атома (см. рис. 194) и Солнечной системой еще более тесной.



В 1922 г. Нильсу Бору была присуждена Нобелевская премия по физике «за заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения».



1. Что предложил Бор для объяснения стабильности атома?
2. Сформулируйте первый постулат Бора — постулат стационарных состояний.
3. Сформулируйте и запишите правило частот — второй постулат Бора.
4. Запишите условие квантования стационарных круговых орбит электронов.
5. Чем отличается атом, находящийся в основном состоянии, от атома, находящегося в возбужденном состоянии?
6. Куда «исчезает» энергия при переходе электрона из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией?
7. Неподвижен ли электрон в основном состоянии атома водорода в модели Бора?
8. Какая сила удерживает электроны на орбитах в ядерной модели атома?
9. Почему при наличии в атоме водорода всего одного электрона в спектре атома водорода наблюдается много линий?

### Упражнение 20

1. Сколько различных квантов света  $N$  может испустить возбужденный атом водорода, если он находится на четвертом энергетическом уровне?
2. Атом водорода перешел с четвертого энергетического уровня ( $n = 4$ ) на второй ( $k = 2$ ). Как при этом изменилась энергия атома?
3. Определите, исходя из представленной энергетической диаграммы (рис. 198), какой из переходов соответствует: а) излучению фотона максимальной энергии; б) поглощению фотона максимальной энергии.

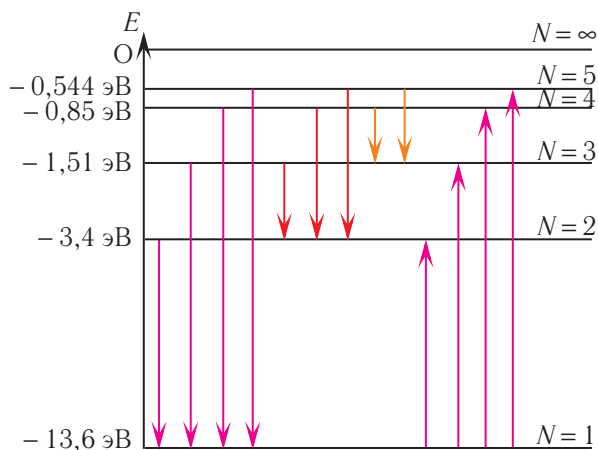


Рис. 198. Энергетическая диаграмма

4. Определите изменение энергии электрона в атоме водорода, если атом излучает фотон, длина волны которого  $\lambda = 486$  нм.
5. Определите минимальную энергию, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся в основном состоянии в атоме водорода, чтобы его спектр излучения содержал только три спектральные линии.
6. Определите длину волны излучения, которое может вызвать ионизацию атома: а) лития ( $E_{\text{и}} = 5,4$  эВ); б) серебра ( $E_{\text{и}} = 7,6$  эВ); в) калия ( $E_{\text{и}} = 4,3$  эВ).



## § 32. Излучение и поглощение света атомом. Спектры испускания и поглощения

- Модель атома Бора позволяет описать процессы излучения и поглощения света атомом. Как это происходит? Как фотон «появляется на свет»? Что меняется в атоме после поглощения фотона?

Вследствие того что энергия атома квантована, она характеризуется определенным набором энергетических уровней  $E_n$ . Испускание излучения происходит при самопроизвольном переходе атома с высших энергетических уровней  $E_k$  на один из низших энергетических уровней  $E_n$  ( $E_k > E_n$ ). Атом излучает фотон (квант электромагнитной энергии) с энергией  $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ . Частота излучения при этом:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (1)$$

Подчеркнем, что наряду с прямым переходом атом может переходить из возбужденного состояния в основное поэтапно, через промежуточные состояния. При этом излучаются соответствующие промежуточным переходам кванты света. Набор таких частот образует **линейчатый спектр излучения** атома.

Поглощение света — процесс, обратный испусканию. Атом, поглощая фотон  $h\nu_{kn} = E_n - E_k$ , переходит из низшего  $k$  состояния в более высокое  $n$  ( $E_k < E_n$ ) состояние. Частота поглощенного фотона:

$$\nu_{kn} = \frac{E_n - E_k}{h}. \quad (2)$$

Подобные переходы дают **линейчатый спектр поглощения** атома.

Подчеркнем, что частоты переходов с испусканием и поглощением, происходящие между одними и теми же энергетическими уровнями, совпадают.

Таким образом, спектры атомов позволяют определять изменения энергии атома при испускании или поглощении ими излучения.

Спектры, полученные от самосветящихся тел, называются **спектрами испускания**. Они бывают трех типов: *линейчатые*, *полосатые* и *сплошные*.

**Линейчатые спектры** имеют все вещества в газообразном атомарном состоянии. Обычно (например, при нормальных условиях) атомы газа находятся в основном состоянии и не излучают света. Если такой газ нагревается, некоторые атомы переходят на более высокие энергетические уровни. Именно эти атомы при переходе в более низкие энергетические состояния и испускают фотоны. В результате атомарные спектры состоят из отдельных узких линий различного цвета, разделенных темными промежутками (рис. 199).

Изучение линейчатых спектров показало, что каждый химический элемент обладает своим строго индивидуальным спектром. Такие спек-

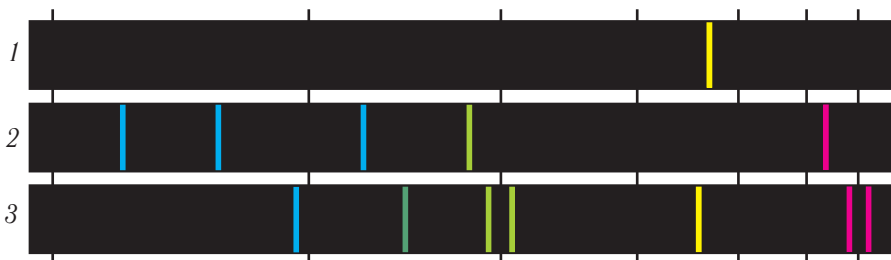


Рис. 199. Линейчатые спектры испускания: 1 — натрия; 2 — водорода; 3 — гелия





Рис. 200. Полосатые спектры испускания угольной дуги (1) и молекул йода (2)

тры отличаются друг от друга цветом отдельных светящихся линий, их положением и числом.

**Полосатые спектры** имеют газы, состоящие из молекул. Для объяснения молекулярных спектров необходимо принимать во внимание большую сложность структуры молекул. В таких спектрах, в отличие от атомных спектров, совокупности тесно расположенных спектральных линий образуют полосы, разделенные темными промежутками (рис. 200). Спектры молекул можно использовать для идентификации молекул и их структуры.

**Непрерывные (сплошные) спектры** имеют нагретые тела, находящиеся в твердом и жидком состоянии, а также газы при высоком давлении и плазма. Вследствие интенсивного взаимодействия между молекулами индивидуальные черты, присущие отдельным частицам, в таких спектрах неразличимы. В них представлены все длины волн, нет темных промежутков и на экране видна сплошная разноцветная полоса (рис. 201).

Прозрачные вещества поглощают часть падающего на них излучения, и в спектре, полученном после прохождения белого света через такие вещества, появляются темные линии, или полосы поглощения. Такой спектр называется **спектром поглощения** (рис. 202).



Рис. 201. Сплошной спектр излучения Солнца

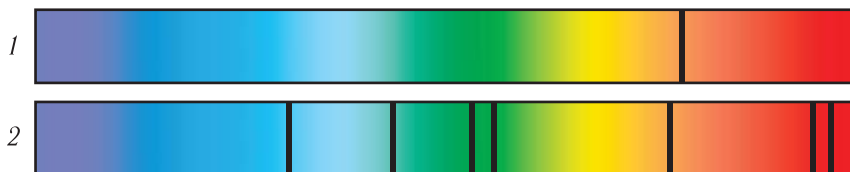


Рис. 202. Спектры поглощения различных веществ: 1 — натрия; 2 — гелия

Так, вещество в газообразном состоянии поглощает наиболее сильно свет тех длин волн, которые оно испускает в нагретом состоянии.

Это означает, что темные линии в спектре поглощения будут находиться как раз в тех местах, где находятся светящиеся линии в спектре испускания данного химического элемента. Эти строго установленные закономерности в линейчатых спектрах дают возможность обнаружить те или иные элементы в данном веществе.

Для определения качественного и количественного состава вещества применяется метод, основанный на получении и исследовании его спектров. Этот метод называется *спектральным анализом*. Это самый быстрый и простой способ определения состава различных химических соединений.

► Спектр поглощения атома водорода при нормальных условиях содержит только одну серию линий, частоты которых находятся в ультрафиолетовой области.

Наиболее изученным спектром поглощения является спектр Солнца. Его сплошной спектр содержит значительное количество черных линий. Эти линии являются линиями поглощения, возникающими при прохождении света через газовую оболочку Солнца и атмосферу Земли. Они получили название фраунгоферовых линий, так как Фраунгофер впервые наблюдал спектр Солнца и установил, что закономерность их расположения не случайна и линии поглощения (темные линии) появляются всегда только на определенных местах. Основатели спектрального анализа немецкие физики Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф, исследуя спектры паров соединений щелочных металлов лития, натрия и калия, обнаружили новые элементы — рубидий и цезий, названные так по цвету наиболее ярких линий в их спектрах. У рубидия — красная линия, у цезия — синяя.

Спектральный анализ базируется на двух основных положениях:

- 1) каждый химический элемент или химическое соединение характеризуется определенным спектром;
- 2) интенсивность линий и полос в спектре зависит от концентрации того или иного элемента в веществе.

К достоинствам спектрального анализа исследования можно отнести: высокую чувствительность (обнаруживает элементы с относительной концентрацией  $10^{-7}$ — $10^{-8}$ , т. е. один атом вещества на сто миллионов других атомов); малое время измерения; малые количества исследуемого вещества (достаточно  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  г и даже до  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  г) вплоть до возможности детектирования отдельных молекул; дистанционность измерений (можно проводить исследования, например, состава атмосфер далеких планет).

► По спектрам определяют, из каких химических элементов состоит вещество и в каких количествах.

Белорусский физик академик Михаил Александрович Ельяшевич разработал основы теории колебаний многоатомных молекул и их колебательных спектров. Он внес значительный вклад в теорию спектров редкоземельных элементов и низкотемпературной плазмы.



1. Что называют спектром? Какие виды спектров вы знаете?
2. Какие виды спектров излучения вы знаете?
3. Что называют спектром поглощения?



## § 33. Спонтанное и индуцированное излучение

■ Как оказалось, закономерности излучения света атомами определяются не только «самим» атомом, но и внешними условиями, которые могут повлиять на данный процесс. Какие виды излучения существуют? В чем их сходство и в чем различия? Где их можно использовать практически?



Излучение, происходящее с неизменной частотой, называется монохроматическим.

Напомним, что атом может находиться в одном из стационарных состояний, энергия которых квантована, т. е. имеет дискретный ряд значений  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Соответственно, при переходах между этими состояниями атом излучает или поглощает кванты энергии электромагнитного поля. Существуют два вида переходов: *спонтанные* и *вынужденные*.

Если атом, находящийся в возбужденном состоянии на верхнем энергетическом уровне  $E_m$ , переходит на более низкий уровень  $E_n$  самопроизвольно без каких-либо внешних воздействий, то происходит так называемый **спонтанный** переход (рис. 203, а). При таком переходе излучается фотон, частота которого определяется соотношением:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (1)$$

Переход такого рода является случайным (вероятностным) процессом, происходящим в принципиально непредска-

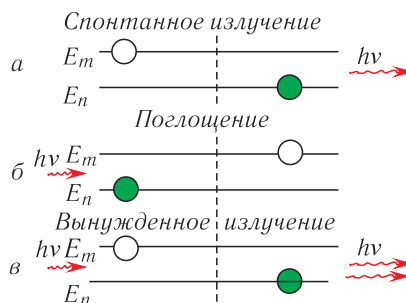


Рис. 203. Переходы в атоме

зуемый момент времени. Таким переходам соответствует спонтанное излучение. Такие процессы происходят в нагретых телах и светящихся газах. При нагревании или электрическом разряде часть атомов переходит в возбужденное состояние. Затем они излучают свет, переходя в основное состояние.

Случайность спонтанных переходов в атомах и молекулах различных веществ означает то, что они происходят не одновременно и независимо друг от друга, поэтому фазы излучаемых при переходах электромагнитных волн не согласованы. Случайным является не только момент испускания фотонов, но и направление их распространения, а также направление  $\vec{E}$  электрического поля и  $\vec{B}$  магнитного поля в электромагнитной волне, т. е. их поляризация. Вследствие этого спонтанное излучение вещества не направлено, не когерентно, а направления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  хаотически изменяются (не поляризовано). Примером такого излучения является свет ламп накаливания.

Переход атома из одного состояния в другое может происходить также и *безызлучательным* путем. В этом случае избыток энергии выделяется в какой-либо иной форме. Например, он может перейти в кинетическую энергию окружающих молекул.

Атом, находящийся в возбужденном состоянии, может перейти с верхнего уровня  $E_m$  на нижний  $E_n$  не только спонтанно, но и под действием электромагнитного излучения, частота которого  $\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$  совпадает с частотой (1) (рис. 203, в). Переходы, происходящие под действием внешнего электромагнитного излучения, называются **индуцированными** или **вынужденными**. При таком переходе излучается квант энергии  $h\nu_{mn}$ , который добавляется к исходящему от внешнего источника излучению. Отличительной особенностью индуцированного излучения является тождественность излученного фотона и фотона, индуцировавшего данный переход. Оба фотона при этом имеют одинаковые частоту, фазу, направление распространения, т. е. образно говоря, «клонировать» друг друга. Именно поэтому индуцированное излучение приобретает свойство *монохроматичности, когерентности, направленности*.

Кроме рассмотренного индуцированного перехода «сверху вниз», могут происходить и вынужденные переходы «снизу вверх» (рис. 203, б). Если атом находится на нижнем уровне  $E_n$ , то он может перейти на верхний уровень  $E_m$  под действием внешнего электромагнитного излучения частотой (1). Атом при этом поглощает фотон, энергия которого  $h\nu_{mn} = E_m - E_n$ .

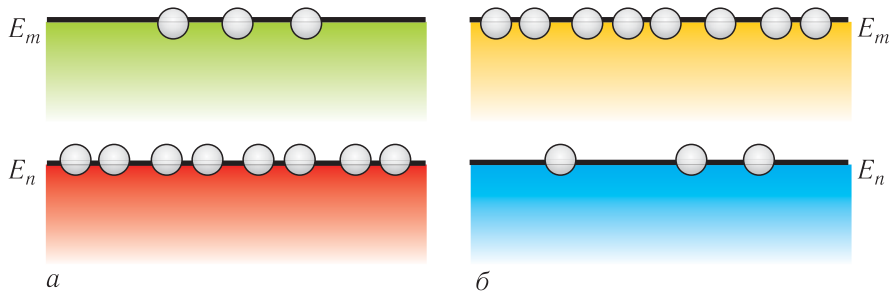


Рис. 204. Населенность энергетических уровней:  
 а — при тепловом равновесии; б — инверсная населенность

Дискретность энергетического спектра характерна не только для атомов, но и для любой системы взаимодействующих микрочастиц — молекул, ионов, твердых тел. Число атомов в единице объема вещества, находящихся на данном энергетическом уровне, называют *населенностью* этого уровня. В естественных условиях (в условиях теплового равновесия) в веществе число атомов  $N_m$  в возбужденном состоянии с большей энергией  $E_m$  меньше, чем число атомов  $N_n$  в состоянии с меньшей энергией  $E_n$ , т. е. при  $E_m > E_n$  населенность уровня  $E_m$  меньше, чем уровня с энергией  $E_n$  ( $N_m < N_n$ ) (рис. 204, а).

Для усиления излучения необходимо искусственно изменить населенности уровней в веществе. Рассмотрим два энергетических уровня атома  $E_m$  и  $E_n$ . Если при падении на такое вещество электромагнитного излучения частотой  $\nu_{mn}$  (1) достигнуто неравновесное состояние вещества, для которого на верхнем энергетическом уровне находится большее количество атомов, чем на нижнем ( $N_m > N_n$ ), то излучаться будет большее число квантов, чем поглощаться. В этом случае будет происходить усиление падающего излучения, и вещество будет действовать как *усилитель*.

Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего больше, чем нижнего, получило название состояния с *инверсной населенностью* (рис. 204, б). Процесс создания инверсной населенности получил название *накачки*. Вещество, в котором осуществлена инверсия населенностей, называется *активным*.

Для того чтобы усилитель превратить в генератор, необходимо ввести подходящую «обратную связь». Смысл обратной связи заключается в том, что часть усиленного излучения остается в активном веществе и подвергается повторному когерентному усилению.

Явление индуцированного излучения позволяет управлять излучением атомов, усиливать и генерировать когерентное излучение.

Основная трудность в практическом осуществлении данной идеи — создание инверсной населенности. Советскими физиками Николаем Геннадьевичем Басовым и Александром Михайловичем Прохоровым в середине 50-х гг. XX в. был предложен универсальный метод создания инверсной населенности посредством воздействия на молекулы внешнего электромагнитного излучения на резонансной частоте. Впоследствии он получил название метода трех уровней.

Вещество, в котором имеются метастабильные уровни, можно эффективно использовать для усиления света. Рассмотрим, как была решена эта проблема на примере трехуровневой системы. Общее число уровней в веществе всегда велико, но в нем существуют три «рабочих» энергетических уровня, которые позволяют создать инверсию населенностей. У некоторых атомов имеются долгоживущие промежуточные возбужденные состояния (их называют метастабильными), время жизни в которых может достигать до нескольких секунд, в то время как в обычных возбужденных состояниях время жизни  $\sim 10^{-8}$  с.

В этом случае, если накачка производится на частоте перехода между нижним и верхним уровнями, то можно перевести часть атомов из основного 1 в возбужденное состояние 3 (рис. 205). За короткое время (время жизни порядка  $10^{-8}$  с) большая часть этих атомов самопроизвольно перейдет в метастабильное долгоживущее возбужденное состояние 2 без излучения. Избыточная энергия передается веществу, вследствие чего оно нагревается.

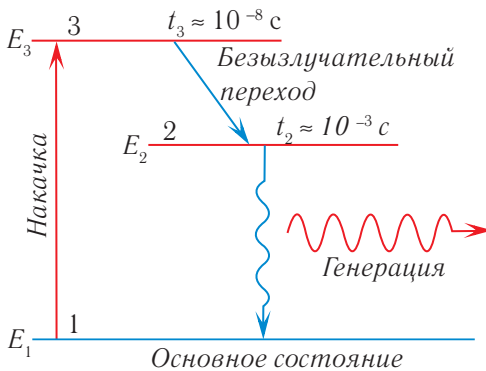


Рис. 205. Трехуровневая схема генерации вынужденного излучения

Населенность промежуточного (метастабильного) уровня, увеличиваясь за счет спонтанных переходов с верхнего уровня на промежуточный, может превысить населенность нижнего уровня. Пропустив излучение с частотой  $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$  через эту систему находящихся в метастабильном состоянии атомов, получаем дополнительно к исходным фотонам еще и индуцированно испущенные фотоны (см. рис. 205). Вследствие этого результирующий поток фотонов будет превышать ис-

ходный. Таким образом, на частоте перехода с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 будет происходить усиление и генерация излучения.



► Понятие индуцированного излучения было введено А. Эйнштейном в 1916 г.



1. Что такое спонтанное и индуцированное излучения?
2. Какие характеристики имеет спонтанное излучение?
3. Какие характеристики имеет индуцированное излучение?
4. Объясните процесс возбуждения индуцированного излучения.
5. Что такое активная среда?
6. Какой процесс называется накачкой?
7. Объясните принцип работы трехуровневой системы генерации излучения.

## § 34. Лазеры

■ Обычные источники света (свеча, лампа накаливания), окружающие человека в быту, испускают некогерентное излучение. А что произойдет, если согласовать (синхронизировать) излучения возбужденных атомов между собой? Какие новые свойства излучения при этом появятся?

При взаимодействии с активным веществом (средой) внешнее излучение усилится, поскольку к исходным фотонам добавятся индуцированные фотоны с тождественными характеристиками. Тождественность фотонов приводит к тому, что при их взаимодействии с новым возбужденным атомом получается вместо 2 уже 4 фотона, затем 8, 16 и т. д. Это позволяет использовать вынужденное излучение для усиления электромагнитных волн и создания генераторов монохроматического когерентного излучения — *лазеров*.

Слово **лазер** является сокращенной записью английской фразы — *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (laser)*, которая переводится так: *усиление света путем вынужденного испускания излучения*.

Рассмотрим принципиальную схему работы лазера (рис. 206). Для реализации обратной связи в лазере активное вещество 1 размещается в *оптическом резонаторе* (рис. 206, а). Резонатор состоит из двух параллельных плоских зеркал, одно из которых — полностью отражающее

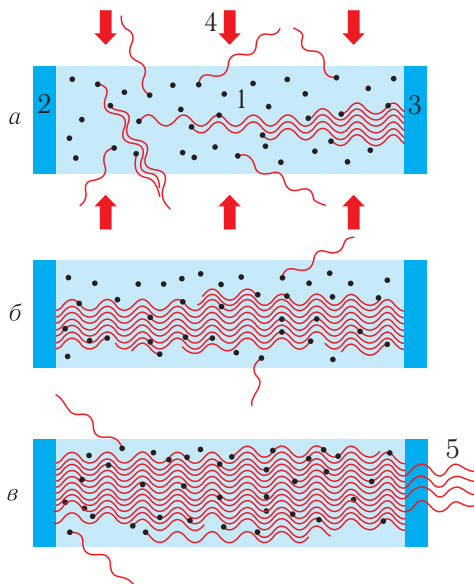


Рис. 206. Принципиальная схема лазера на рубине: 1 — активная среда; 2 — полностью отражающее зеркало; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — накачка; 5 — генерируемое излучение

(«глухое») 2, другое — полупрозрачное 3, предназначенное для выхода излучения 5 (см. рис. 206, в) из резонатора.

Накачка 4 создает инверсию населенностей уровней в активной среде. На начальной стадии генерации фотоны, спонтанно испущенные атомами активной среды, распространяются в различных направлениях (см. рис. 206, а, б). Но только фотоны, которые распространяются перпендикулярно зеркалам, многократно проходят через активную среду в результате отражений от зеркал резонатора (см. рис. 206, в).

Излученная атомами энергия накапливается в резонаторе и, воздействуя на активную среду, вызывает новые индуцированные переходы. Происходит лавинообразное «размножение» фотонов в веществе. Далее пучок монохроматического лазерного излучения выходит наружу через полупрозрачное зеркало.



▶ Днем рождения лазера следует считать 16 мая 1960 г. Эта дата стоит в рабочей тетради американского физика Т. Н. Меймана. В созданном им приборе содержались все три необходимых и достаточных компонента для получения эффекта генерации оптического когерентного излучения.

**Основными характеристиками лазерного излучения** являются когерентность, малая расходимость (узкая направленность), монохроматичность, возможность получать сверхкороткие импульсы, большая мощность.



По типу активной среды лазеры можно разделить на газовые, твердотельные, полупроводниковые, жидкостные, химические, газодинамические. А по способу накачки — на оптические, электрические, химические, ядерные, газодинамические.



Лазеры находят широкое применение в голографии, передаче оптической информации, обработке материалов (сварка, резка, сверление и т. п.), медицине, локации, рекламе.

При работе с лазерами необходимо быть внимательными и осторожными. Наибольшую опасность лазерное излучение представляет для глаз и кожи. При попадании в глаз луч лазера фокусируется в пятно очень малых размеров, что может за доли секунды привести к ожогам сетчатки глаза, частичной или полной необратимой потере зрения. Прямое, а в некоторых случаях и рассеянное излучение лазеров большой мощности способно вызывать ожоги кожи. Оно представляет также пожарную опасность.

Знак опасности, предупреждающий о лазерном излучении, приведен на рисунке 207.



Рис. 207. Знак опасности лазерного излучения

► Белорусский физик, академик Николай Александрович Борисевич в 1978 г. открыл явление «стабилизации» электронно-возбужденных многоатомных молекул. Он впервые получил генерацию излучения многоатомных молекул в газовой фазе. Разработал газовые и одночастотные гелий-неоновые лазеры со значительной выходной мощностью.

В 1957 г. белорусский физик, академик Борис Иванович Степанов вывел универсальное соотношение между спектрами поглощения и испускания сложных молекул и полупроводников, которое получило название соотношения Степанова. Он совместно с А. Н. Рубиновым и В. А. Мостовниковым открыл новый класс генерирующих соединений — органические красители.



В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и Ч. Таунсу «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию лазера».



1. Объясните принцип действия лазера.
2. В чем заключается роль метастабильных состояний в генерации лазерного излучения?
3. Для чего в лазере необходим оптический резонатор?
4. Чем отличается лазерное излучение от излучений, создаваемых другими источниками света?
5. Где применяются лазеры?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 6

К числу первых моделей атомов относятся модель атома Томсона и ядерная (планетарная) модель атома Резерфорда.

Постулаты Бора.

**I постулат Бора (постулат стационарных состояний):**

атом может находиться в особых стационарных **квантовых** состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.

**II постулат Бора (правило частот):**

атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},$$

где  $\nu_{kn}$  — частота поглощенного или испущенного кванта излучения,  $E_k, E_n$  — энергия атома в  $k$ -м и  $n$ -м стационарном состоянии,  $h$  — постоянная Планка.

**Условие квантования орбит** в атоме:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ , — номер орбиты,  $m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — модуль скорости электрона на  $n$ -й орбите,  $r$  — радиус  $n$ -й орбиты,  $h$  — постоянная Планка.

Переходы, происходящие под действием внешнего электромагнитного излучения, называются **индуцированными** или **вынужденными**.



Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего больше, чем нижнего, получило название состояния с **инверсной населенностью**.

Среда с инверсной населенностью уровней энергии — **активная среда**.

Процесс перевода атомов из основного состояния в возбужденное называют **накачкой**.

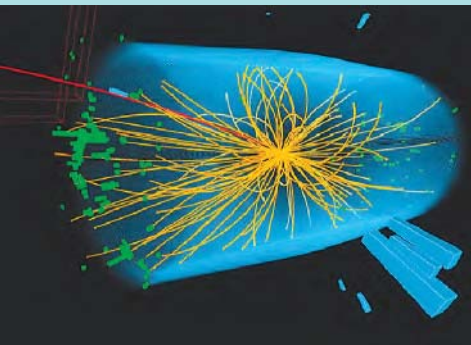
**Принцип работы лазеров** заключается в использовании вынужденных излучательных переходов в системах с инверсией населенности для генерации когерентных световых волн.

**Основные характеристики лазерного излучения:** когерентность; малая расходимость (узкая направленность); монохроматичность; реализация сверхкоротких импульсов; большая мощность излучения.

### **Задания для самостоятельных исследований**

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Томсон, Бор, Басов, Прохоров, Таунс).

2. Подготовьте рефераты на темы: «Применение лазеров: в промышленности (сварка, резание, сверление), в медицине (хирургия, офтальмология, терапия), голографии, термоядерном синтезе, химии, биологии, связи (кабельной, телевизионной, телефонной), технике, локации».



# Глава 7

## Ядерная физика и элементарные частицы

Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны.  
И память сорока веков!

*В. Брюсов*

### § 35. Протонно-нейтронная модель строения ядра атома

- Вы уже знаете, что вещества состоят из мельчайших частиц — атомов, взаимодействующих между собой. Изучая строение и свойства атома, можно создавать новые источники энергии, вещества с заранее заданными свойствами, использовать новые возможности в медицине, технологии производства. В этой связи необходимо ответить на вопросы: как устроен атом? Каким закономерностям он подчиняется?



В физике за атомную единицу массы (1 а.е.м.) принимается величина, равная  $\frac{1}{12}$  массы изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ :

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_{\text{OC}} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В экспериментах Резерфорда по изучению рассеяния  $\alpha$ -частиц веществом было установлено, что в центральной части атома, размеры которого  $\sim 10^{-10}$  м, находится положительно заряженное ядро, имеющее размер  $\sim (10^{-14} - 10^{-15})$  м, в котором сосредоточено 99,96 % от массы атома (рис. 208).

Для завершения построения модели атома необходимо было ответить на вопрос: обладает ли атомное ядро структурой, и если обладает, то какой?

Наличие в ядре положительно заряженных частиц — протонов было экспериментально доказано Резерфордом с его учениками в 1919 г.

Протон, обозначаемый латинской буквой  $p$ , представляет собой ядро атома водорода. Он обладает массой  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг и зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

В 1930 г. немецкие ученые Вальтер Боте и Ганс Беккер, изучая реакции, происходящие при облучении бериллия  $\alpha$ -частицами, обнаружили новое излучение, обладающее очень большой проникающей способностью, первоначально названное бериллиевыми лучами. В 1932 г. английский физик Джеймс Чедвик провел эксперименты по изучению свойств этого излучения и установил, что бериллиевые лучи состоят из электрически нейтральных частиц с массой, сравнимой с массой протона. Эти частицы он назвал *нейтронами* (от англ. *neutral* — нейтральный).

**Нейтрон** — еще одна частица наряду с электроном, протоном и фотоном. Эта частица обозначается латинской буквой  $n$ . Она имеет массу  $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$  кг, почти совпадающую с массой протона, электрически нейтральна. Из-за отсутствия электрического заряда у нейтрона взаимодействие с веществом очень слабо. Вследствие этого нейтрон движется в веществе прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с каким-либо атомным ядром. При столкновениях с тяжелыми атомами нейтрон почти не теряет энергию, как упругий мячик, отскакивающий от стены. При столкновении же с легкими атомами (водород, бериллий, углерод) нейтрон передает им часть своей энергии и начинает двигаться медленнее. Вещества, содержащие легкие атомы, называют *замедлителями нейтронов*. Наиболее эффективными замедлителями нейтронов являются вещества, содержащие водород (например, вода), вследствие того, что масса атома водорода близка к массе нейтрона. Со временем кинетическая энергия нейтрона становится такой же, как кинетическая энергия теплового движения частиц окружающей среды. Такие относительно медленно движущиеся нейтроны называются **тепловыми**.

Нейтроны устойчивы только в составе стабильных ядер. Нейтрон в свободном состоянии, т. е. находящийся вне ядра, является нестабильной частицей. Его среднее время жизни  $t = 886$  с.

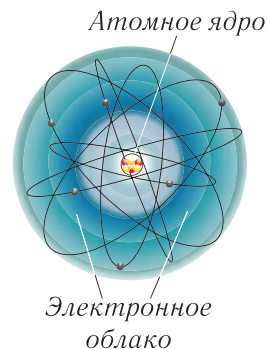


Рис. 208. Строение атома

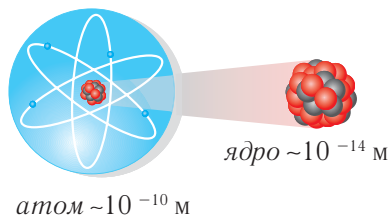


Рис. 209. Строение и размеры атома и ядра

После открытия нейтронов в 1932 г. физики — советский Дмитрий Дмитриевич Иваненко и немецкий Вернер Гейзенберг — предложили **протонно-нейтронную модель** строения ядра. Согласно этой модели ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтронов (рис. 209).

В соответствии с современными физическими представлениями протон и нейтрон являются двумя разными зарядовыми состояниями одной и той же частицы — **нуклона** (от лат. *nucleus* — ядро). В состоянии без электрического заряда ( $q = 0$ ) нуклон является нейтроном, а в состоянии с положительным электрическим зарядом ( $q = e$ ) — протоном.

Число протонов в ядре называется **зарядовым числом** (атомным номером) и обозначается буквой  $Z$  (число протонов в ядре равно количеству электронов в нейтральном атоме). Зарядовое число совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Общее число нуклонов называется **массовым числом** и обозначается буквой  $A$ . Массовое число совпадает с округленной до целого числа атомной массой элемента. Протон и нейтрон имеют массовое число  $A = 1$ , а электрон  $A = 0$ . Число нейтронов в ядре равно  $N = A - Z$ .

Для характеристики ядра достаточно знать зарядовое  $Z$  и массовое  $A$  числа. Для обозначения атомного ядра  ${}^A_Z X$  применяется такой же символ, как для соответствующего химического элемента. Слева внизу символа ставится зарядовое число ядра  $Z$ , а сверху — массовое число  $A$ . Например, символ  ${}^{12}_6 C$  обозначает ядро углерода, содержащего 12 нуклонов, 6 из которых протоны, а 6 других — нейтроны.

Атом с определенными значениями зарядового числа  $Z$  и массового числа  $A$  называется **нуклидом**.

В ядрах одного химического элемента всегда содержится одно и то же количество протонов, а число нейтронов может быть различным. Например, в ядрах углерода число протонов всегда 6, а число нейтронов может быть 5, 6, 7, 8, 9 или 10.

Атомы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются **изотопами** (от греч. *ἰσότος* (изос) — одинаковый и *τόπος* (топос) — место) данного химического элемента. На-

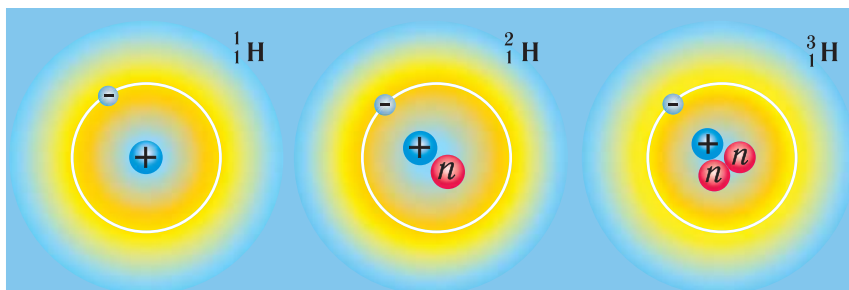


Рис. 210. Три изотопа водорода

пример, хорошо известны изотопы водорода — дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$ , которые содержат, соответственно, один и два нейтрона в ядре (рис. 210).

Массы некоторых атомов приведены в таблице 10.



Таблица 10. Массы атомов химических элементов

| Элемент  | Изотоп              | Масса атома, а.е.м. | Элемент  | Изотоп                   | Масса атома, а.е.м. |
|----------|---------------------|---------------------|----------|--------------------------|---------------------|
| Водород  | ${}^1_1\text{H}$    | 1,00783             | Углерод  | ${}^{11}_6\text{C}$      | 11,01143            |
| Водород  | ${}^2_1\text{H}$    | 2,01410             | Углерод  | ${}^{12}_6\text{C}$      | 12,00000            |
| Водород  | ${}^3_1\text{H}$    | 3,01605             | Азот     | ${}^{14}_7\text{N}$      | 14,00307            |
| Гелий    | ${}^4_2\text{He}$   | 4,00260             | Кислород | ${}^{16}_8\text{O}$      | 15,99491            |
| Литий    | ${}^6_3\text{Li}$   | 6,01513             | Фтор     | ${}^{19}_9\text{F}$      | 18,99840            |
| Литий    | ${}^7_3\text{Li}$   | 7,01601             | Алюминий | ${}^{27}_{13}\text{Al}$  | 26,98146            |
| Бериллий | ${}^8_4\text{Be}$   | 8,00531             | Кремний  | ${}^{28}_{14}\text{Si}$  | 27,98154            |
| Бериллий | ${}^9_4\text{Be}$   | 9,01218             | Уран     | ${}^{235}_{92}\text{U}$  | 235,04393           |
| Бор      | ${}^{10}_5\text{B}$ | 10,01294            | Уран     | ${}^{238}_{92}\text{U}$  | 238,05079           |
| Бор      | ${}^{11}_5\text{B}$ | 11,00931            | Плутоний | ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ | 239,05216           |

Химические свойства элементов определяются не атомной массой, а зарядовым числом ядра, т. е. числом электронов в электрически ней-

тральном атоме элемента и их распределением по энергетическим уровням. Действительно, атомные массы изотопов различаются, а их химические свойства одинаковы. Например, атомы нуклидов водорода  ${}^1_1\text{H}$  и гелия  ${}^3_2\text{He}$  имеют близкие по величине атомные массы, но принципиально разные химические свойства.

В рамках протонно-нейтронной модели ядра возникает вопрос о его устойчивости. Действительно, между протонами, находящимися в ядре, действуют силы электростатического отталкивания огромной величины. Если считать расстояние между протонами  $r \sim 10^{-14}$  м, то модуль силы отталкивания  $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 2,30$  Н, а гравитационная сила их притяжения составляет всего  $F = G \frac{m_p^2}{r^2} \approx 1,9 \cdot 10^{-36}$  Н.

Чем же объясняется устойчивость ядра, если внутри него действуют такие огромные силы кулоновского отталкивания между протонами?

Причина устойчивости ядра кроется в существовании, кроме сил электростатического отталкивания между протонами (нуклонами), *ядерных сил притяжения* между нуклонами. Ядерные силы отличаются по своей природе как от сил электромагнитных, так и сил гравитационных. Они представляют новый вид взаимодействия между нуклонами, который называют **сильным взаимодействием**.

**Ядерные силы** обладают рядом отличительных свойств:

- 1) являются силами притяжения и отталкивания;
- 2) на расстояниях порядка размера ядра примерно в 100 раз превосходят по величине кулоновские силы отталкивания в ядре;
- 3) проявляются только на расстояниях между частицами порядка размера ядра ( $10^{-14} - 10^{-15}$ ) м, т. е. являются короткодействующими силами. На расстояниях, больших  $(2 - 7) \cdot 10^{-15}$  м, они не проявляются;
- 4) не зависят от электрического заряда взаимодействующих нуклонов (ядерные силы между двумя протонами, нейтронами или протоном и нейтроном одинаковы). Это свойство называется *зарядовой независимостью*;
- 5) обладают свойством насыщения. Это означает, что находящиеся внутри ядра нуклоны могут взаимодействовать только со своими ближайшими соседями;
- 6) не являются центральными, т. е. они не направлены по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Все ядра имеют плотность  $\rho \sim 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а один кубический сантиметр



ядерного вещества имеет массу 180 млн тонн.





Так как массы и энергии ядерных величин в единицах СИ имеют очень малые значения, для удобства вычислений все массы в ядерной физике выражают в атомных единицах массы (а.е.м.), а энергии — в электронвольтах (эВ). Используя формулу Эйнштейна  $E = mc^2$ , массу также можно выразить в единицах энергии — **электронвольтах**:  $m = \frac{E}{c^2}$ . Например, в атомных единицах массы масса электрона  $m_e = 0,00054858$  а.е.м, масса протона  $m_p = 1,007276$  а.е.м, масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  а.е.м, масса атома водорода  $m_p = 1,007825$  а.е.м, а в энергетических единицах  $m_e = 0,511$  МэВ,  $m_p = 938,281$  МэВ,  $m_n = 939,567$  МэВ ( $1 \text{ МэВ} = 1 \cdot 10^6 \text{ В}$ ).

Связь между различными единицами массы определяется следующими соотношениями:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,492 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Дж}}{c^2} = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{c^2},$$

$$1,000 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

► Изотопы применяются в биологии для изучения процесса фотосинтеза, для исследования использования растениями фосфора, азота, калия и микроэлементов, при исследовании процессов обмена веществ и биосинтеза; в медицине — при диагностике заболеваний, для радиоиммунного анализа и томографии; в экологии — для исследования переноса, накопления и распада различных загрязнителей в воздухе, воде и почве.



Дж. Чедвик за открытие нейтрона получил Нобелевскую премию по физике в 1935 г.



1. Когда и кем были открыты протон и нейтрон?
2. В чем сущность протонно-нейтронной модели атомного ядра?
3. Чему равен заряд и масса протона?
4. Что определяет атомный номер химического элемента в периодической системе элементов Менделеева?
5. Что определяет массовое число атомного ядра? Зарядовое число?
6. Как в ядерной физике обозначается любой химический элемент?
7. Какие нуклиды обозначены символами X:
  - а)  ${}_{7}^{18}\text{X}$ ; б)  ${}_{38}^{82}\text{X}$ ; в)  ${}_{97}^{247}\text{X}$ ?
8. Что называют изотопами химического элемента? Что общего у различных изотопов одного и того же химического элемента? Чем они различаются?
9. Как называется число нуклонов в ядре?
10. Какие силы действуют между нуклонами в атомных ядрах?
11. Какими свойствами обладают ядерные силы?

### Упражнение 21

1. Определите количество нуклонов в изотопах:  
а) актиния  ${}_{89}^{225}\text{Ac}$ ; б) ксенона  ${}_{54}^{131}\text{Xe}$ ; в) циркония  ${}_{40}^{91}\text{Zr}$ .
2. Определите состав ядер атомов бора, кремния, брома.
3. Сколько нуклонов, нейтронов, протонов содержат нейтральные атомы:  
а)  ${}_{6}^{11}\text{C}$ ; б)  ${}_{9}^{19}\text{F}$ ; в)  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ ; г)  ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ ; д)  ${}_{25}^{55}\text{Mn}$ ?
4. Определите элемент, в ядре которого содержится: а) 20 протонов и 20 нейтронов; б) 12 протонов и 14 нейтронов; в) 10 протонов и 12 нейтронов; г) 104 протона и 156 нейтронов.
5. Ядра каких элементов получатся, если заменить нейтроны протонами, а протоны нейтронами в ядрах:  
а)  ${}_{8}^{15}\text{O}$ ; б)  ${}_{12}^{25}\text{Mg}$ ; в)  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ ?



## § 36. Ядерные реакции.

### Законы сохранения в ядерных реакциях

- Подобно тому, как в химических реакциях получаются новые вещества, так и при взаимодействиях различных ядер могут образовываться новые ядра. Таким образом, можно синтезировать новые химические элементы, получать энергию, исследовать мельчайшие объекты микромира. Каким закономерностям подчиняются ядерные реакции? При всем разнообразии подобных реакций есть ли в них общие закономерности? Как их можно использовать на благо цивилизации?



Из курса химии: *Закон сохранения массы — масса веществ, вступающих в химическую реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции.*

**Ядерная реакция** — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, который может сопровождаться изменением состава и строения ядра. Для осуществления ядерных реакций необходимо сближение частиц на расстояние действия ядерных сил.

Символически (двухчастичные) ядерные реакции записываются в следующем виде:



Здесь  $A$  — исходное ядро,  $a$  — бомбардирующая частица,  $B$  — конечное ядро,  $b$  — испускаемая частица,  $Q$  — энергия реакции.

Ядерные реакции могут происходить как при столкновениях различных частиц с атомными ядрами, так и при столкновениях ядер друг с другом. В качестве частиц, вызывающих ядерные реакции, обычно

используют протоны, нейтроны, фотоны,  $\alpha$ -частицы, дейтроны. Незаряженные частицы (нейтроны) могут проникать в атомные ядра и вызывать разнообразные ядерные превращения, обладая сколько угодно малой кинетической энергией. Ядерные реакции с участием нейтронов происходят при энергиях  $\sim 1$  эВ. Так как заряженным частицам для проникновения в ядра необходимо преодолеть действие сил электрического отталкивания, то ядерные реакции с участием протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц возможны при энергиях несколько МэВ. Более тяжелые ядра используются значительно реже, потому что с увеличением заряда ядра возрастают силы электростатического отталкивания. Для проникновения заряженных частиц в любое ядро созданы ускорители заряженных частиц, в которых ядра атомов и электроны разгоняются до энергий от 10 МэВ до 100 ГэВ.

В любых ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, заряда. Именно действие законов сохранения ограничивает возможные варианты ядерных реакций и позволяет предсказать возможные пути (механизмы) ядерных превращений.

Сумма зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, получающихся в результате реакции.

Рассмотрим энергетический баланс на примере двухчастичной ядерной реакции (1). Поскольку как в начальном, так и в конечном состоянии частицы считаются невзаимодействующими друг с другом, то их полная энергия складывается из кинетической энергии и энергии покоя.

С учетом закона сохранения энергии можно записать:

$$E_a + E_A = E_b + E_B + Q, \quad (2)$$

где  $E_A, E_a, E_B, E_b$ , — полные энергии частиц до и после реакции.

Так как полная энергия частицы  $E = E_k + mc^2$  равна кинетической энергии  $E_k$  и энергии покоя  $mc^2$ , то соотношение (2) можно записать в виде:

$$m_a c^2 + E_{ka} + m_A c^2 + E_{KA} = m_b c^2 + E_{kb} + m_B c^2 + E_{KB} + Q,$$

где  $m_a, m_A, m_b, m_B$  — массы частиц, а  $E_{ka}, E_{KA}, E_{kb}, E_{KB}$  — их кинетические энергии в начальном и конечном состояниях.

Тогда из соотношения (1) получаем выражение для энергии реакции:

$$Q = E_k^0 - E_k + (m_A + m_a - (m_B + m_b))c^2, \quad (3)$$

где  $E_k^0 = E_{ka} + E_{KA}$ ,  $E_k = E_{kb} + E_{KB}$  — кинетические энергии системы в начальном и конечном состояниях.

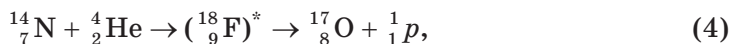
Следовательно, энергией реакции  $Q$  (при малых скоростях частиц) называется разность энергий покоя начального и конечного состояний частиц, участвующих в реакции.

Так как энергия реакции может быть как положительной, так и отрицательной, то ядерные реакции могут происходить как с выделением энергии, так и с поглощением энергии. Ядерные реакции, происходящие с выделением энергии ( $Q > 0$ ), называются *экзоэнергетическими*, а поглощением энергии ( $Q < 0$ ), — *эндоэнергетическими*. Чтобы произошла эндоэнергетическая реакция, частицам, участвующим в ней, необходимо предварительно сообщить добавочную кинетическую энергию.

Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется **энергетическим выходом** ядерной реакции. Подчеркнем, что энергетический выход различных ядерных реакций может достигать сотен мегаэлектрон-вольт, что в миллионы раз превышает энергетический выход при химических реакциях.

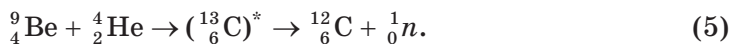


Исторически первой ядерной реакцией под действием  $\alpha$ -частиц считается реакция, в результате которой в 1919 г. Резерфордом был открыт протон  ${}^1_1p$ :



где \* означает составное ядро в возбужденном состоянии.

Нейтрон  ${}^1_0n$  был открыт Чедвиком в 1932 г. в реакции радиоактивного превращения ядер бериллия в изотоп углерода при бомбардировке  $\alpha$ -частицами:

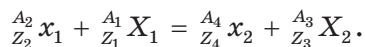


Ядерные реакции можно *классифицировать* по следующим признакам:

- по роду участвующих в них частиц (нейтронов, заряженных частиц);
- по признаку выделения или поглощения энергии (экзоэнергетические ( $Q > 0$ ), эндоэнергетические ( $Q < 0$ ));
- по энергии вызывающих их частиц (малых энергиях ( $< 1$  МэВ), средних энергиях (1 МэВ — 10 МэВ), высоких энергиях ( $> 10$  МэВ));
- по массе бомбардируемых ядер (легких ( $A < 50$ ), средних ( $50 < A < 100$ ), тяжелых ( $A > 100$ ));
- по виду бомбардирующих частиц (на заряженных частицах, на нейтронах);

• по характеру происходящих ядерных превращений (с испусканием нейтронов, заряженных частиц,  $\gamma$ -квантов (излучения)).

Вид записи ядерных реакций (см. уравнения (4)—(5)) аналогичен записи формул химических реакций — слева записывается сумма исходных частиц, справа — получившихся:



При любых ядерных реакциях выполняются законы сохранения электрического заряда (зарядового числа), массы (числа нуклонов (массового числа)), энергии и импульса.

Рассмотрим законы сохранения массовых и зарядовых чисел на примере ядерной реакции (4). Суммы массовых чисел частиц, вступивших в реакцию и образовавшихся в ней, равны:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \Rightarrow 14 + 4 = 17 + 1.$$

Суммы зарядовых чисел вступивших в реакцию и образовавшихся частиц также равны:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \Rightarrow 7 + 2 = 8 + 1.$$

Таким образом, действие законов сохранения с одной стороны ограничивает возможные варианты ядерных реакций, а с другой позволяет предсказывать возможные ядерные превращения.

Величина, равная разности масс частиц после и до реакции:

$$\Delta m = m_b + m_B - (m_a + m_A),$$

называется **дефектом масс** ядерной реакции.

Если  $\Delta m < 0$ , то  $Q = -\Delta mc^2 = (m_a + m_A - (m_b + m_B))c^2 > 0$ , то энергия в ходе реакции выделяется, если  $\Delta m > 0$ , то  $Q = -\Delta mc^2 < 0$ , то энергия поглощается.



1. Что называют ядерными реакциями?
2. В каком виде записываются ядерные реакции?
3. В чем основное отличие ядерных реакций на заряженных частицах от ядерных реакций на нейтронах?
4. Что называют энергией ядерной реакции?
5. При каком условии реакция идет с поглощением энергии, а при каком — с выделением?
6. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
7. По каким признакам производится классификация ядерных реакций?
8. Что называется дефектом масс ядерной реакции?

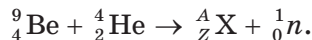


### Примеры решения задач

1. Запишите уравнение ядерной реакции, происходящей при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами и сопровождающейся испусканием нейтронов.

Решение

Для записи ядерных реакций необходимо знать законы сохранения массового  $A$  и зарядового  $Z$  чисел:



Сумма массовых чисел частиц, вступивших в реакцию, равна сумме массовых чисел образовавшихся частиц:

$$9 + 4 = A + 1.$$

Отсюда  $A = 12$ .

Сумма зарядовых чисел частиц, вступивших в реакцию, равна сумме зарядовых чисел образовавшихся частиц:

$$4 + 2 = Z + 0.$$

Откуда  $Z = 6$ .

Из периодической системы химических элементов Менделеева находим, что искомым элементом является углерод  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Ответ:  ${}^{12}_6\text{C}$ .

2. Вычислите энергию ядерной реакции:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$ . Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

Решение

Массы частиц (в атомных единицах массы (а.е.м.)), вступивших в реакцию и после нее:  ${}^7_3\text{Li} — 7,01601$  а.е.м.,  ${}^1_1\text{H} — 1,00783$  а.е.м.,  ${}^4_2\text{He} — 4,00260$  а.е.м.

Масса частиц, вступивших в реакцию:

$$m_1 = 7,01601 \text{ а.е.м.} + 1,00783 \text{ а.е.м.} = 8,02384 \text{ а.е.м.}$$

Масса частиц после реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00260 \text{ а.е.м.} = 8,00520 \text{ а.е.м.}$$

Дефект масс реакции:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -0,01864 \text{ а.е.м.}$$

Так как  $\Delta m < 0$ , то энергия реакции  $Q = -\Delta mc^2 > 0$ . Следовательно, ядерная реакция происходит с выделением энергии, т. е. энергетический выход реакции:

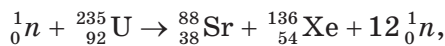
$$Q = -\Delta mc^2,$$

$$\Delta E = 0,01864 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

Ответ: выделяется энергия  $\Delta E = 2,8 \cdot 10^{-12}$  Дж.

## Упражнение 22

1. Определите, какая частица образуется в результате ядерной реакции  ${}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{14}^{27}\text{Si} + \dots$ .
2. Запишите уравнения ядерных реакций, в результате которых при облучении протонами ядра лития  ${}^7_3\text{Li}$  образуются: а) ядро и нейтрон; б) два одинаковых ядра; в) два ядра с числами нуклонов, отличающимися на две единицы и протон; г) ядро и  $\gamma$ -квант.
3. Вычислите энергию, выделяющуюся в реакции деления



предполагая, что кинетическая энергия налетающего нейтрона очень мала. Массы соответствующих частиц и ядер равны:

$$m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}, m_{\text{U}} = 235,04393 \text{ а.е.м.},$$

$$m_{\text{Xe}} = 135,9072 \text{ а.е.м.}, m_{\text{Sr}} = 87,9056 \text{ а.е.м.}$$

4. При каких условиях возможна ядерная реакция  ${}^{18}_8\text{O} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + {}^1_0\text{n}$ ?
5. Ядро изотопа магния  ${}^{25}_{12}\text{Mg}$  подвергается бомбардировке протонами. Запишите уравнение реакции, если она сопровождается испусканием  $\alpha$ -частицы.
6. Определите дефект масс ядерной реакции, в которой два дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  объединятся в один нуклид гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Какая энергия выделяется в этой реакции?
7. Определите дефект масс ядерной реакции, в которой четыре атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  объединятся в один атом кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$ . Какая энергия выделяется (поглощается) в этой реакции? Какая энергия необходима, чтобы разделить один атом кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$  на четыре атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ?



## § 37. Энергия связи ядра атома

- До сих пор мы рассматривали двухчастичные ядерные реакции, когда частица налетала на ядро. А возможна ли реакция распада самого ядра? Какие условия для этого необходимы? Как это явление можно использовать на практике?

Рассмотрим реакцию разделения ядра на нуклоны. Так как ядра состоят из протонов и нейтронов, то энергия рассматриваемой реакции:

$$Q = (m_{\text{я}} - (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n)) \cdot c^2.$$

Найдем суммарную (полную) массу свободных частиц, содержащихся, например, внутри ядра углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ , и сравним ее с массой ядра. Так как ядро содержит  $Z = 6$  протонов и  $N = A - Z = 6$  нейтронов, то их суммарная масса:

$$m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n = 6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а.е.м.}$$

Поскольку масса ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  —  $m_{\text{C}} = 12,00000$  а.е.м, то их разность равна:

$$\Delta m = m - m_{\text{C}} = 0,095646 \text{ а.е.м.} > 0.$$

Таким образом, суммарная масса отдельных частиц больше, чем масса образованного ими ядра.

Разность

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$$

называют **дефектом массы ядра**.

Заметим, что относительное изменение массы при образовании ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  составляет:

$$\frac{\Delta m}{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n} \cdot 100 \% = \frac{0,095646}{12,095646} \cdot 100 \% = 0,79 \%$$

Масса тела меняется всегда, когда меняется его внутренняя энергия. Отметим, что в процессах, происходящих на атомно-молекулярном уровне, изменения массы очень малы. Так, при полном превращении льда массой  $m$  в воду относительное изменение массы  $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$ , при химических реакциях, например сгорания метана в кислороде  $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-10}$ , в ядерных реакциях  $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}$ , т. е. в  $\sim 10^7$  раз больше, чем в химических реакциях.





Точные измерения масс ядер показали, что масса любого ядра (за исключением ядра водорода, в ядре которого всего один протон и ни одного нейтрона) меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов. И чем больше нуклонов в ядре элемента, тем больше дефект массы для него.

Куда же исчезла эта масса  $\Delta m$ ?

Согласно закону взаимосвязи массы и энергии  $\Delta E = \Delta mc^2$  избыточная масса превращается в энергию, выделяемую при соединении нуклонов в ядро. Таким образом, при образовании ядра углерода  ${}^12_6\text{C}$  менее 1 % суммарной массы нуклонов переходит в энергию. Следовательно, для разделения ядра углерода  ${}^12_6\text{C}$  на отдельные нуклоны требуется энергия. Именно поэтому ядро углерода не распадается.

Для удаления нуклона (протона или нейтрона) из ядра необходимо совершить работу против ядерных сил притяжения между нуклонами. Вследствие этого энергия системы «удаленный нуклон — оставшееся ядро» возрастет на величину, равную работе внешних сил против действия ядерных сил притяжения между нуклонами.

Минимальная энергия, необходимая для разделения ядра на отдельные нуклоны, называется **энергией связи ядра**:

$$E_{\text{св}} = (Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2 = \Delta mc^2 > 0. \quad (1)$$

Если массу выражать в а.е.м., а энергию связи — в мегаэлектрон-вольтах (МэВ), то выражение (1) записывают в виде:

$$|E_{\text{св}}| = 931,5(Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \text{ (МэВ)}.$$

Состояние атомного ядра с минимальной энергией, равной (по модулю) энергии связи, называется *основным*, состояние с избытком энергии (по сравнению с основным) называется *возбужденным*.

Например, энергия связи нуклонов в ядре атома углерода:

$$|E_{\text{св}}| = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \cdot 0,095646 \text{ а.е.м.} = 89,1 \text{ МэВ}.$$

Эта энергия гораздо больше энергии, «удерживающей» электроны внутри атома. Так, энергия электрона в атоме водорода в основном состоянии равна  $E_1 = -13,6$  эВ. Это означает, что для ионизации атома водорода требуется совершить работу, равную  $A = 13,6$  эВ. Поэтому процессы плавления твердого вещества, разложения химического соединения и ионизации атома требуют значительно меньших энергетических затрат по сравнению с процессом разделения (расщепления) ядра.

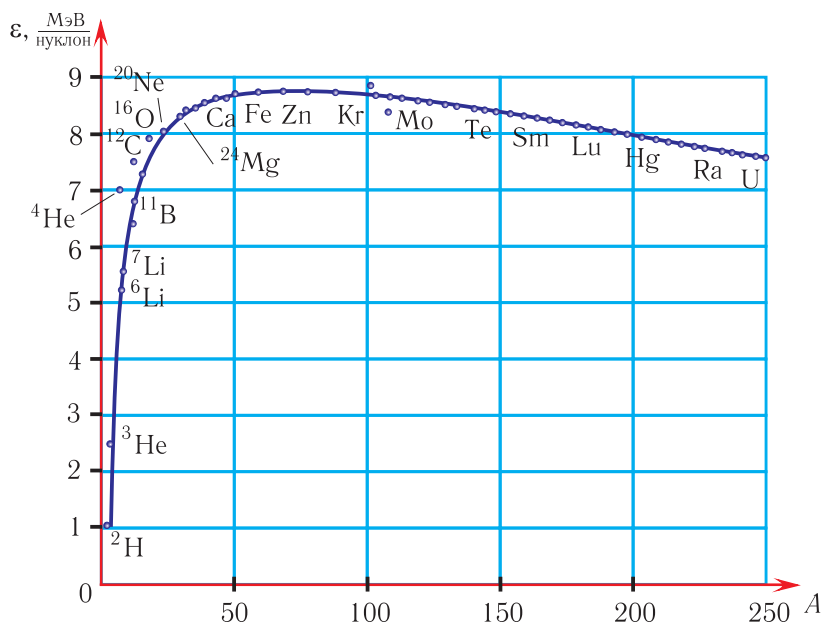


Рис. 211. Зависимость удельной энергии связи ядер от массового числа  $A$

Более важной характеристикой является не энергия связи, а **удельная энергия связи  $\varepsilon$  ядра**, т. е. *энергия связи, приходящаяся на один нуклон*. Она является характеристикой прочности (связанности) ядер и равна отношению энергии связи к массовому числу:  $\varepsilon = \frac{|E_{\text{св}}|}{A}$ .

Соответственно, чем больше значение  $\varepsilon$ , тем сильнее связан каждый нуклон в ядре со своими соседями, следовательно, тем прочнее ядро. График зависимости удельной энергии связи от массовых чисел ядер  $\varepsilon(A)$  приведен на рисунке 211. Из него видно, что кривая имеет заметный максимум, расположенный ближе к началу координат. Причем этот максимум с одной стороны крутой, а с другой — пологий. Соответственно,  $\varepsilon(A)$  быстро возрастает при малых значениях от  $\varepsilon = 1$  МэВ при  $A = 1$  до  $\varepsilon = 8$  МэВ при  $A = 16$ . Максимум удельной энергии связи ядра  $\varepsilon_{\text{max}} = 8,8$  МэВ достигается при  $A \approx 56$  ( ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ). Затем удельная энергия связи ядра постепенно уменьшается до значения  $\varepsilon = 7,6$  МэВ для урана. Поэтому наиболее прочны ядра со средними значениями массовых чисел  $A(12 - 60)$ .

Таким образом, при смещении ядер к центральной части графика удельная энергия связи увеличивается, следовательно, любые ядерные

реакции, приводящие к такому смещению, являются энергетически выгодными (сопровождаются выделением энергии). Из зависимости, приведенной на рисунке 211, следует, что подобное смещение возможно при реакциях синтеза (объединения) легких ядер в области изменения  $A$  примерно  $0 \rightarrow 50$  и при реакциях деления тяжелых ядер в области изменения  $A$  примерно  $250 \rightarrow 50$ . При этом реакции синтеза должны проходить с большим выделением энергии, поскольку подъем графика происходит круче, чем последующее уменьшение удельной энергии связи.

Из графика (см. рис. 211) следует, что при реакции синтеза (объединения) легких ядер и реакции деления тяжелых ядер удельная энергия связи увеличивается, т. е. такие реакции являются энергетически выгодными, так как сопровождаются выделением энергии.



1. Почему атомная масса химических элементов не выражается целым числом?
2. Что называется дефектом масс ядра? Объясните причину его возникновения.
3. Что такое энергия связи ядра? Как она определяется?
4. Что определяет удельная энергия связи ядра?
5. У каких элементов ядра обладают максимальной удельной энергией связи?
6. Какие ядерные реакции являются энергетически выгодными? Почему?
7. Почему реакции синтеза ядер являются энергетически более выгодными по сравнению с реакциями деления тяжелых ядер?

### Пример решения задачи

Определите энергию связи нуклонов в ядре бериллия  ${}^8_4\text{Be}$ .

#### Решение

Ядро бериллия состоит из  $Z = 4$  протонов и  $N = A - Z = 8 - 4 = 4$  нейтронов. Масса протона  $m_p = 938,281$  МэВ, нейтрона —  $m_n = 939,567$  МэВ.

Суммарная масса всех частиц, входящих в состав ядра:

$$E_0 = 4 \cdot 938,281 \text{ МэВ} + 4 \cdot 939,567 \text{ МэВ} = 7511,4 \text{ МэВ.}$$

Масса ядра  ${}^8_4\text{Be}$  —  $m_{\text{Be}} = 7454,7$  МэВ.

Откуда модуль энергии связи ядра бериллия:

$$E_{\text{св}} = E_0 - E_{\text{я}} = 7511,4 \text{ МэВ} - 7454,7 \text{ МэВ} = 56,7 \text{ МэВ.}$$

Эта энергия распределена между 8 нуклонами ядра бериллия.

Следовательно, на каждый нуклон приходится удельная энергия связи ядра бериллия  $\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{N} = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ , что подтверждается экспериментальными данными.

Ответ:  $E_{\text{св}} = 56,7 \text{ МэВ}$ ;  $\varepsilon = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .

### Упражнение 23

1. Определите дефект массы ядра алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ . Масса ядра алюминия равна  $m_{\text{Al}} = 26,97431$  а.е.м., масса нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м. и масса протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м.
2. Определите массу ядра атома лития  ${}_{3}^7\text{Li}$ , если дефект массы ядра атома лития  $\Delta m = 7,030 \cdot 10^{-30}$  кг, масса протона  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг, масса нейтрона  $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$  кг.
3. Определите удельную энергию связи  $\varepsilon$  ядра атома ртути  ${}_{80}^{200}\text{Hg}$ , если массы нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м., протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м., ядра ртути  $m_{\text{Hg}} = 200,028$  а.е.м.
4. Вычислите удельную энергию связи  $\varepsilon$  для ядра гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ .
5. Определите дефект массы  $\Delta m$  изотопа азота  ${}_{7}^{14}\text{N}$ , масса ядра которого  $m_{\text{N}} = 14,00307$  а.е.м. Найдите удельную энергию связи  $\varepsilon$  ядра данного изотопа, если масса нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м. и масса протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м.
6. Дана ядерная реакция  ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^4\text{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^1\text{p}$ . Определите энергию связи  $E_{\text{св}}$  данных ядер, если их удельные энергии связи  $\varepsilon_{\text{N}} = 7,48 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ,  $\varepsilon_{\text{He}} = 7,075 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ,  $\varepsilon_{\text{O}} = 7,751 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .



## § 38. Радиоактивность

- Некоторые ядра обладают способностью к самопроизвольному распаду, сопровождающемуся изменением физической структуры ядра, а следовательно, и химических свойств атома. Каковы же основные закономерности самопроизвольного распада атомов? Почему он происходит? Представляет ли он опасность для здоровья человека?

Историю ядерной физики принято отсчитывать с 1896 г. Именно в этом году французский физик Антуан Анри Беккерель обнаружил, что соли урана обладают способностью засвечивать фотопластинку, испуская самопроизвольно какое-то неизвестное излучение. Это новое явление получило название *радиоактивности* (от лат. *radio* — испускаю лучи, *action* — действенный).

**Радиоактивность** — явление самопроизвольного превращения ядер, сопровождающееся испусканием частиц или ядер и коротковолнового электромагнитного излучения.

В 1898 г. Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри, исследуя это новое явление, открыли новые радиоактивные химические элементы — радий  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  и полоний  ${}_{84}^{210}\text{Po}$ . Вскоре были открыты и другие радиоактивные элементы. В 1899 г. Э. Резерфорд выделил две составляющие радиоактивного излучения —  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи. Он доказал, что  $\alpha$ -лучи представляют собой ядра гелия, а Беккерель доказал, что  $\beta$ -лучи являются потоком электронов. В 1900 г. французский физик П. Виллард открыл  $\gamma$ -лучи, третью компоненту радиоактивного излучения, при исследовании излучения радия. Впервые такую терминологию использовал Резерфорд в 1903 г.

► Радий по-латыни означает «испускающий лучи», а полоний назвали в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди обнаружили, что явление радиоактивности сопровождается превращением одного химического элемента в другой с выделением энергии, которая уносится излучением. Они выдвинули теорию, согласно которой радиоактивные излучения возникают при распаде ядер.

В 1898 г. Резерфорд обнаружил, что по проникающей способности излучение можно разделить на три различных вида. Излучение первого вида ( $\alpha$ -частицы) не проходило даже сквозь лист бумаги (рис. 212), второго ( $\beta$ -частицы) — не проникало уже через алюминиевую пластинку толщиной несколько миллиметров, а третьего ( $\gamma$ -частицы) — проходило даже сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров.

Эти три вида излучения были названы согласно первым трем буквам греческого алфавита: соответственно  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением. Впослед-

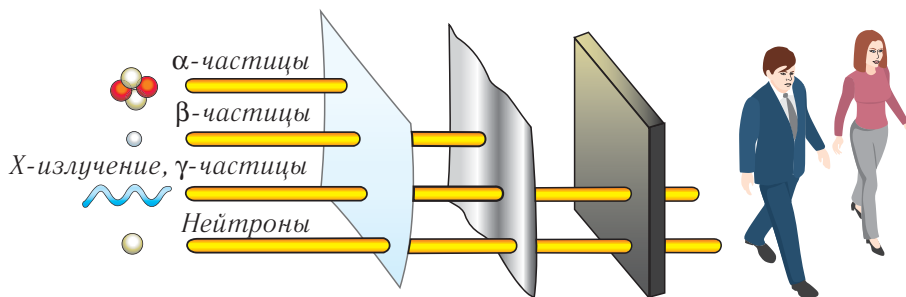


Рис. 212. Проникающая способность различных видов радиоактивных излучений

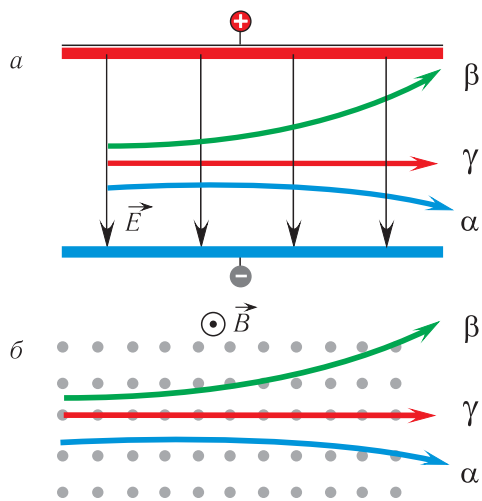


Рис. 213. Поведение радиоактивных излучений в электрическом (а) и магнитном полях (б)

ствии было обнаружено, что все эти виды излучения представляют собой известные частицы:  $\alpha$ -излучение — это ядра атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$  (также обозначается  ${}^4_2\alpha$ ),  $\beta$ -излучение — электроны,  $\gamma$ -излучение — электромагнитное излучение очень большой энергии.

Три составляющие радиоактивного излучения радия по-разному ведут себя в электрических и магнитных полях, отклоняясь в различных направлениях и на разные углы (рис. 213).

При  $\alpha$ -распаде начального (так называемого материнского) ядра  ${}^A_Z\text{X}$  продуктом распада оказывается изотоп  $\text{Y}$  с числом протонов  $Z - 2$  и массовым числом  $A - 4$ :



Отметим основные особенности  $\alpha$ -распада:

1) он наблюдается как у естественных (встречающихся в природе) ядер (при  $Z > 83$ ), так и у искусственных изотопов (при  $Z < 83$ ), поскольку при этом энергетически выгодно испускание  $\alpha$ -частиц;

2) энергия  $\alpha$ -частиц, вылетающих из различных ядер, находится в основном в пределах (1,1—11,8) МэВ;

3) вылетающие  $\alpha$ -частицы имеют дискретный спектр значений энергии (при распаде данного ядра испускается  $\alpha$ -частица с определенной энергией).

Примером  $\alpha$ -распада является реакция  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ , в результате которой получается радон (рис. 214).

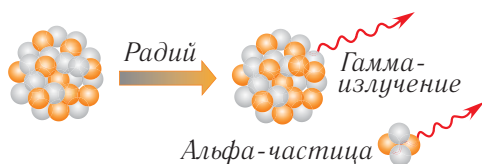


Рис. 214. Схема  $\alpha$ -распада радия

При  $\beta^-$ -распаде ядра  ${}^A_Z\text{X}$  образуется нуклид с атомным номером  $Z + 1$  и таким же массовым числом, как материнское ядро, и испускается электрон. Для электронов в ядерной физике принято обозначение  ${}^0_{-1}e$ . С учетом этого реакцию  $\beta^-$ -распада можно записать следующим образом:



где  $\tilde{\nu}$  — неизвестная в то время частица, зарядовое и массовое числа которой равны нулю ( ${}^0_0 \tilde{\nu}$ ).

Отметим основные особенности  $\beta^-$ -распада:

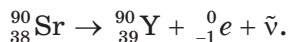
1) наблюдается при радиоактивном распаде ядер с избытком нейтронов;

2) вылетающие электроны имеют непрерывный спектр значений кинетической энергии от 0 до  $E_{\max}$ , значение которой зависит от вида распадающегося ядра.

Общим признаком ядерной реакции является превращение одного атомного ядра в другое. Но радиоактивный распад происходит *самопроизвольно*, без внешнего воздействия, а ядерная реакция вызывается воздействием бомбардирующей частицы.

Закономерности ядерных превращений (1) и (2) при  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадах, установленные в 1913 г. английским ученым Фредериком Содди и польским ученым Казимежем Фаянсом, называются *правилами смещения (сдвига)*.

Приведем пример  $\beta^-$ -распада — излучение электрона нуклидом стронция:



При  $\beta^-$ -распаде ядра, состоящего из нейтронов и протонов, испускаются электроны. Здесь возникает закономерный вопрос: «Откуда же они берутся?» И что это за частица  $\tilde{\nu}$ ?

Согласно квантовой теории  $\beta^-$ -распада, разработанной в 1934 г. итальянским физиком Энрико Ферми, в момент распада ядра внутри него происходит превращение одного из нейтронов в протон, сопровождающееся в соответствии с законами сохранения электрического заряда и энергии возникновением еще двух частиц — электрона и частицы, зарядовое и массовое числа которой равны нулю. Эту частицу по предложению Ферми называли *нейтрино*, что в переводе с итальянского означает «нейтрончик». Нейтрино обозначается греческой буквой  $\nu$ . Именно испускание антинейтрино вместе с электроном приводит к тому, что электрон при  $\beta^-$ -распаде может иметь любую энергию от 0 до  $E_{\max}$ .

► Существование нейтрино было предсказано В. Паули на основании закона сохранения энергии в 1931 г. Экспериментально нейтрино было зарегистрировано в 1956 г. в лаборатории Лос-Аламос (США) американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуном.

► О фантастической проникающей способности нейтрино можно судить по такому примеру. Если бы железная плита имела толщину, равную расстоянию от Земли до Солнца, то она задержала бы лишь одно из ста миллионов нейтрино, образующихся в ядерных реакторах.

Как одну из самых известных ядерных реакций отметим первое искусственное получение Фредериком и Ирен Жюлио-Кюри в 1934 г. радиоактивного изотопа фосфора в ходе ядерной реакции (рис. 215):

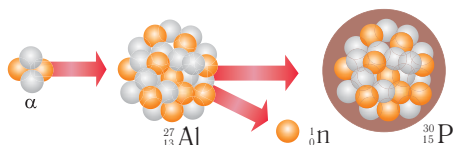
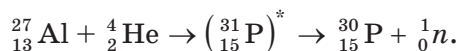
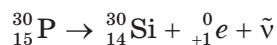


Рис. 215. Превращение алюминия в радиоактивный изотоп фосфора



Далее изотоп  ${}_{15}^{30}\text{P}$  превращается в изотоп  ${}_{14}^{30}\text{Si}$ :



с испусканием позитрона  ${}_{+1}^0e$  (рис. 216). Эта частица имеет все свойства (массу, спин, заряд) электрона, но отличается знаком заряда.

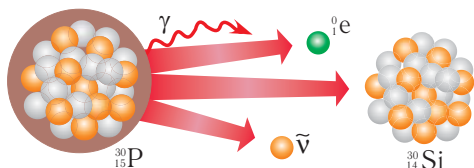


Рис. 216. Распад радиоактивного изотопа фосфора с образованием кремния и испусканием позитрона

Свойства нейтрино оказались удивительными. Из-за отсутствия электрического заряда и очень малой массы нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом, и поэтому оно было экспериментально обнаружено

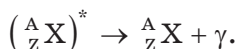
только в 1952—1956 гг. Фактически в любом веществе нейтрино ведет себя так, как будто вещества нет. Например, в свинце средняя длина пробега между взаимодействиями (проникающая способность) составляет величину порядка  $10^{18}$  м. Поэтому нейтрино свободно пронизывают космическое пространство, пролетая сквозь Землю, Солнце и другие небесные тела.

Реакция  $\beta^-$ -распада нейтрона имеет вид:



где  $\tilde{\nu}$  обозначено антинейтрино. Эта  $\beta^-$ -реакция схематично изображена на рисунке 217.

Испускание  $\gamma$ -излучения, в отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов ядер, не приводит к превращениям элементов:





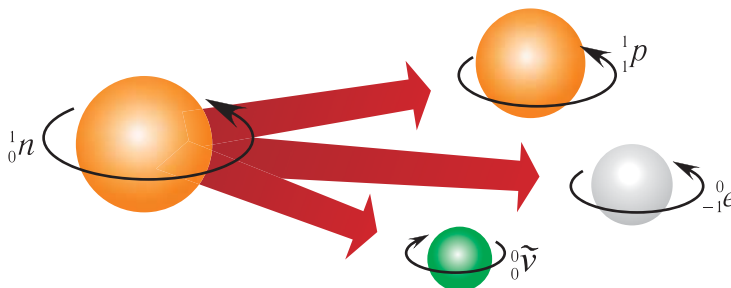


Рис. 217. Реакция распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино

Свойства  $\gamma$ -излучения:

- 1) коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda \sim 10^{-10} - 10^{-13}$  м;
- 2) не имеет электрического заряда;
- 3) спектр  $\gamma$ -излучения непрерывный. Энергия излучения находится в пределах от  $\sim 10$  МэВ до  $\sim 1$  МэВ.

Обычно  $\gamma$ -излучение сопровождает радиоактивные превращения ядер при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах. Полученные при ядерных реакциях конечные ядра (их называют дочерними) оказываются в возбужденных состояниях с последующим переходом в основное состояние путем излучения  $\gamma$ -кванта.

Все радиоактивные распады происходят с выделением энергии, т. е. являются экзоэнергетическими, так как масса радиоактивного ядра превышает суммарную массу ядер продуктов распада.

Как объяснить стабильность одних ядер и нестабильность других? Для стабильности ядер необходим баланс между протонами и нейтронами. Среди элементов с маленькими номерами стабильные ядра состоят из равного или почти равного количества протонов и нейтронов. Так, например, ядро водорода  ${}^1_1\text{H}$  содержит 1 протон, ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  — 2 протона и 2 нейтрона, ядро кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$  — 8 нейтронов и 8 протонов, ядро кальция  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  — 20 протонов и 20 нейтронов. Число нейтронов в них равно числу протонов и их соотношение  $N/Z = 1$ . В них ядерные силы притяжения компенсируют кулоновские силы отталкивания.

Стабильные ядра всех элементов тяжелее кальция содержат уже больше нейтронов, чем протонов. С увеличением атомного номера  $Z$  рост количества протонов уменьшает энергию связи вследствие увеличения силы их кулоновского отталкивания. Поэтому для стабильности ядер

вследствие короткодействия ядерных сил ( $\sim 10^{-14}$  м) требуется больше нейтронов, чем протонов. Так, например, ядро самого распространенного изотопа железа  ${}_{30}^{56}\text{Fe}$  состоит из 26 протонов и 30 нейтронов, т. е.  $N/Z = 1,15$ . Ядро изотопа висмута  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$  состоит из 126 нейтронов и 83 протонов, т. е.  $N/Z = 1,52$ . У ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  —  $N/Z = 1,59$ . Таким образом, чем больше протонов содержится в ядре, тем больше избыточных нейтронов необходимо для поддержания стабильности ядра. В то же время избыток нейтронов приводит к увеличению размеров ядра и в результате к уменьшению энергии связи. Поэтому для элементов с номером большим 83 ( $Z > 83$ ), сколько бы нейтронов не было, стабильности добиться невозможно, так как увеличение количества нейтронов не может компенсировать возросшую силу отталкивания.

До урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  радиоактивные ядра существуют в природе, а с номерами  $Z > 92$  получены искусственно.

Неустойчивыми являются как ядра, у которых протонов намного больше, чем нейтронов, так и ядра, у которых число нейтронов намного больше числа протонов. Ядра с избыточным содержанием нейтронов часто оказываются  $\beta^-$ -радиоактивными.

Стабильность определенного нуклида зависит также от энергии этого нуклида по отношению к другим нуклидам с таким же количеством нуклонов. Например, нуклиды  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  и  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$  содержат одинаковое количество нуклонов, но соотношение нейтронов и протонов разное  $N/Z=1$  и  $N/Z=1,18$ . Поэтому атом  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  самопроизвольно испытывает  $\beta^-$ -распад и превращается в атом  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ .

Таким образом, стабильными являются ядра, которые обладают минимальной энергией по сравнению с ядрами, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе. Их радиоактивность называется **естественной радиоактивностью**. Стабильных изотопов известно около 270, искусственных изотопов, получаемых на ускорителях и реакторах, известно около 3000. Их радиоактивность называется **искусственной радиоактивностью**.

Основной способ получения радиоактивных изотопов — бомбардировка стабильных изотопов частицами высокой энергии. Для этой цели используют пучки протонов или электронов, разгоняемых в ускорителях, или нейтроны, получаемые в ядерных реакторах.

► В промышленности радиоактивные изотопы применяют для исследования коррозии и износа, для определения расхода различных материалов, скорости и длительности протекания технологических процессов.

Гамма-излучение находит широкое применение в медицине, как в диагностических целях, так и для лечения заболеваний.

Белорусский физик Владимир Григорьевич Барышевский (Белорусский государственный университет) сделал ряд открытий в ядерной физике, связанных с проявлением спиновых эффектов нейтронов, гамма-квантов, и является одним из основателей ядерной оптики поляризованных сред.



В 1903 г. Анри Беккерель, Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри получили Нобелевскую премию по физике. Беккерель — в «знак признания выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиации». Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри — «в знак признания... их совместных исследований явлений радиации, открытых профессором Анри Беккерелем».

В 1908 г. Э. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ».

В 1911 г. Нобелевскую премию по химии вручили Марии Склодовской-Кюри «за выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента».

В 1921 г. Фредерику Содди была присуждена Нобелевская премия по химии «за вклад в химию радиоактивных веществ». В 1938 г. Энрико Ферми был удостоен Нобелевской премии по физике «за выдающиеся теоретические и экспериментальные открытия в области ядерной физики».

В 1945 г. В. Паули был награжден Нобелевской премией по физике «за открытие принципа запрета».

В 1995 г. Ф. Райнес был удостоен Нобелевской премии по физике за открытие электронного антинейтрино.



1. Что называют радиоактивностью? Какие экспериментальные данные свидетельствуют о том, что радиоактивность — ядерный процесс?
2. Какие нуклиды называют стабильными, а какие — радиоактивными?
3. Перечислите свойства и объясните природу  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.
4. Какое из трех типов излучений ( $\alpha$ ,  $\beta$  или  $\gamma$ ) обладает наибольшей проникающей способностью?
5. Сформулируйте и запишите правила смещения для  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада. Охарактеризуйте их особенности.
6. Охарактеризуйте особенности  $\gamma$ -излучения.



### Упражнение 24

1. Ядро тория  ${}_{90}^{230}\text{Th}$  превратилось в ядро радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ . Какую частицу испустило ядро тория?
2. Покажите, что самопроизвольный распад  ${}_{6}^{11}\text{C} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + {}_{1}^{1}\text{p}$  невозможен, так как в этом случае нарушался бы закон сохранения энергии.
3. Покажите, что ядро нуклида бериллия  ${}_{4}^{8}\text{Be}$  ( $m_{\text{Be}} = 8,005308$  а.е.м.) нестабильно и может распасться на две  $\alpha$ -частицы.
4. При бомбардировке нуклида алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$   $\alpha$ -частицами получается радиоактивный нуклид фосфора  ${}_{15}^{30}\text{P}$ , ядро которого затем распадается с выделением позитрона ( ${}_{+1}^{0}\text{e}$ ). Напишите уравнения обеих реакций.
5. Ядро кислорода  ${}_{8}^{19}\text{O}$  испытывает  $\beta^{-}$ -распад. Напишите уравнение реакции.
6. Ядро полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  испытывает  $\alpha$ -распад. Напишите уравнение реакции.



## § 39. Закон радиоактивного распада

- При всем разнообразии реакций самопроизвольного (спонтанного) распада ядер в этом процессе наблюдается общая закономерность, которую можно описать математически. Интересно, что зависимость количества распавшихся ядер от времени задается одной и той же функцией для различных ядер, участвующих в распаде. Перейдем к количественному описанию процессов радиоактивного распада.

Большинство изотопов любого химического элемента превращается в более устойчивые изотопы путем радиоактивного распада. Каждый радиоактивный элемент распадается со своей, присущей только ему «скоростью». При этом для каждого радиоактивного ядра существует характерное время, называемое *периодом полураспада*  $T_{1/2}$ , спустя которое в исходном состоянии остается половина имевшихся ядер. Таким образом, **периодом полураспада**  $T_{1/2}$  называется промежуток времени, за который распадается половина начального количества  $N_0$  радиоактивных ядер. Другая половина ядер превращается в более устойчивые изотопы посредством распада.

Отметим, что период полураспада не зависит от того, в каком состоянии находится вещество: твердом, жидком или газообразном. Кроме того, период полураспада радиоактивного вещества не зависит от его количества, от времени, места и условий, в которых оно находится. Поэтому количество радиоактивных ядер «тогда»  $N_1$  и «сейчас»  $N_2$  непосредственно определяет промежуток времени  $\tau = t_2 - t_1$ , прошед-

ший с момента уменьшения числа ядер от  $N_1$  до  $N_2$ .

Невозможно точно предсказать, когда произойдет распад данного ядра. Однако можно оценить среднее число ядер, которые распадутся за данный промежуток времени. Таким образом, закон радиоактивного распада является статистическим и он справедлив только при достаточно большом количестве радиоактивных ядер.

Для записи закона радиоактивного распада будем считать, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) число радиоактивных ядер  $N_0$ . Через промежуток времени, равный периоду полураспада, это число будет  $\frac{N_0}{2}$ , еще через такой же промежуток времени —  $\frac{N_0}{4}$  (рис. 218). Спустя промежуток времени, равный  $n$  периодам полураспада ( $t = nT_{1/2}$ ), радиоактивных ядер останется:

$$N(t) = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (1)$$

Это соотношение выражает закон радиоактивного распада, который можно сформулировать следующим образом:

**число нераспавшихся радиоактивных ядер убывает с течением времени по закону, представленному соотношением (1).**

Закон радиоактивного распада позволяет найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени. Полученное выражение хорошо описывает распад радиоактивных ядер, если их количество достаточно велико.

Приведем экспериментальные результаты, которые показывают, что при малом количестве радиоактивных ядер это выражение неприменимо. На рисунке 219 изображен график распада

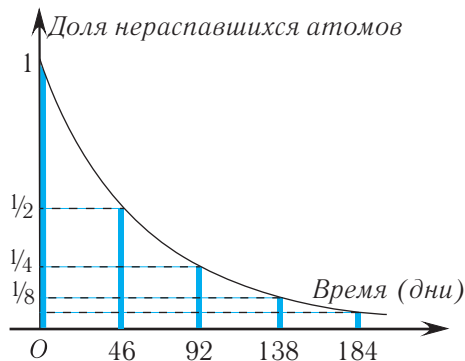


Рис. 218. Радиоактивный распад нуклида железа  $^{59}_{28}\text{Fe}$

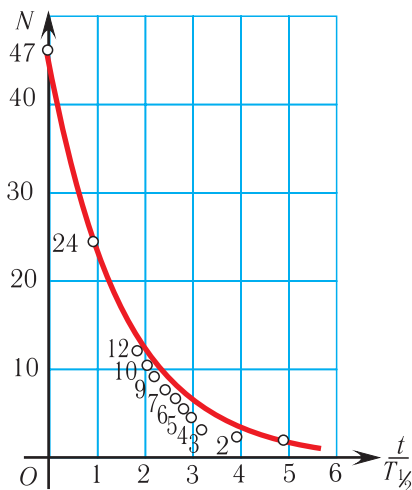


Рис. 219. Число нераспавшихся ядер  $^{256}_{100}\text{Fm}$  в зависимости от времени

47 ядер изотопа фермия  ${}_{100}^{256}\text{Fm}$ , период полураспада которого  $T_{1/2} = 3,5$  ч. Из рисунка 219 видно, что пока ядер было достаточно много — от 47 до 12, то показательная функция хорошо описывала закон распада. Однако при меньшем числе ядер истинная зависимость существенно отличается от показательной функции.

Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов веществ приведены в таблице 11.

Таблица 11. Периоды полураспада радиоактивных изотопов веществ

| Вещество                 | Период полураспада | Вещество                 | Период полураспада |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ | 30,17 лет          | ${}_{86}^{226}\text{Ra}$ | 1600 лет           |
| ${}_{27}^{60}\text{Co}$  | 5,3 года           | ${}_{84}^{222}\text{Rn}$ | 3,8 суток          |
| ${}_{53}^{131}\text{I}$  | 8,04 суток         | ${}_{92}^{235}\text{U}$  | 700 млн лет        |
| ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ | 24 390 лет         | ${}_{92}^{238}\text{U}$  | 4,5 млрд лет       |



► В 1943 г. венгерскому ученому Дьердь фон Хевеши была присуждена Нобелевская премия по химии «за работу по использованию изотопов в качестве меченых атомов при изучении химических процессов».



1. В чем заключается закон радиоактивного распада? Каков характер этого распада?
2. Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества? Что он характеризует?
3. Сколько времени необходимо, чтобы распалась половина атомов радиоактивного вещества?
4. Почему на Земле до сих пор не распались все радиоактивные ядра?

### Упражнение 25

1. За промежуток времени  $t$  начальное количество некоторого радиоактивного изотопа уменьшилось в  $k_1 = 2,0$  раза. Во сколько  $k_2$  раз оно уменьшится за промежуток времени  $t_1 = 2t$ ?

2. Какая доля ядер изотопа германия  ${}^{68}_{32}\text{Ge}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 270$  сут сохранится через промежуток времени  $t = 4,5$  года?
3. Период полураспада стронция  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$   $T_{1/2} = 29$  лет. Сколько времени понадобится для того, чтобы из образца массой  $m = 1,0$  г осталось  $(1/32)$  г?
4. Определите число атомов, содержащихся в свинце  ${}^{210}_{82}\text{Pb}$  массой  $m = 0,632$  г. Сколько атомов останется через  $\Delta t = 95$  лет, если период полураспада  $T_{1/2} = 19$  лет?
5. Определите массу  $m_1$  нераспавшегося радиоактивного вещества по истечении суток, если вначале его масса была  $m = 1,0$  кг. Период полураспада вещества  $T_{1/2} = 12$  часов.



## § 40. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции

Открытие деления урана означало появление нового вида топлива — самой массы материи.

*Д. Юз*

- Особое место среди ядерных реакций занимают цепные ядерные реакции деления, которые привели к созданию, с одной стороны, новых источников энергии, а с другой — к появлению нового типа оружия, обладающего колоссальной мощностью. Выясним основные закономерности данного типа реакций и условия их возникновения.



Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется энергетическим выходом ядерной реакции.

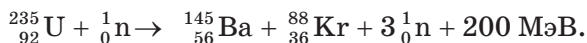
Особый тип ядерных реакций представляют ядерные реакции деления элементов, расположенных в конце периодической системы химических элементов. В результате таких реакций выделяется огромное количество энергии. Почему это происходит?

Обратимся к графику, изображенному на рисунке 211 (§ 37). Для тяжелых ядер, например таких как  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , энергия связи, приходящаяся на нуклон, составляет величину 7,6 МэВ. Если двигаться вдоль кривой на графике зависимости энергии связи от  ${}^{235}_{92}\text{U}$  к месту, где находятся ядра химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева, то видно, что энергия связи возрастает от  $\sim 7,5$  МэВ до  $\sim 8,8$  МэВ на нуклон.

Таким образом, при делении тяжелого ядра на 2—3 более легких осколка, энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличится на величину порядка 1 МэВ. Согласно закону сохранения энергии такое же количество энергии выделится при делении ядра. Следовательно, в ходе ядерной реакции, приводящей к появлению ядер с большей удельной энергией связи, должна выделяться энергия. Число нуклонов в каждом ядре урана равно  $N = 235$ . Таким образом, реакция деления одного ядра приводит к выделению около 200 МэВ энергии. Даже учитывая всевозможные потери, это число несравнимо с энергией  $\sim 1\text{—}5$  эВ, выделяемой в химических реакциях окисления (горения топлива).

Такие выводы нашли свое подтверждение в ходе многочисленных экспериментов в первой половине XX в. Основной вопрос заключался в том, как заставить ядро делиться. Бомбардировка  $\alpha$ -частицами или протонами неэффективна ввиду их сильного отталкивания ядром. Электроны слишком легкие «снаряды». Выбор пал на нейтроны. Они достаточно тяжелые (по сравнению с электронами) и в то же время электрически нейтральны. Вследствие этого нейтроны могут беспрепятственно подлетать к ядру-мишени, двигаясь со сколь угодно малой скоростью. Попав в сферу действия ядерных сил притяжения, нейтрон проникает в ядро.

В 1938 г. немецкие радиохимики Отто Ган, Фриц Штрассман, Лизе Мейтнер, Отто Фриш впервые осуществили реакцию деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  нейтронами:



Отметим, что сама идея деления ядра была столь необычна, что ученый мир вначале не воспринял результаты их экспериментов. И только спустя некоторое время было осознано, что ядро урана распадается главным образом на два осколка. В результате деления могут образоваться различные радиоизотопы. В большинстве случаев ядро делится на неравные осколки (ядра): массовое число большего ядра колеблется в пределах от 135—145, а меньшего — от 90—100. В каждом акте деления ядра урана высвобождаются 2—3 нейтрона. Кинетическая энергия разлетающихся осколков составляет величину  $\sim 165$  МэВ, а остальная часть энергии приходится на нейтроны и гамма-кванты. Данная реакция изображена на рисунке 220.

В 1940 г. советские физики Георгий Флеров и Константин Петржак обнаружили новый вид радиоактивных превращений — спонтанное де-



ление ядер урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . В процессе деления образуются осколки — изотопы элементов середины периодической системы со значениями  $Z$  от 34 (изотоп селена  ${}^{74}_{34}\text{Se}$ ) до 67 (изотоп гольмия  ${}^{162}_{67}\text{Ho}$ ).

Новое явление было названо *делением ядра* из-за сходства с делением клетки в биологии. Наиболее вероятным является деление ядра на два осколка. Отношение их масс составляет примерно 3 : 2. Вероятность деления на три осколка составляет величину  $10^{-2}$ — $10^{-8}$  от вероятности деления на два. Реакции деления ядер обычно являются экзоэнергетическими с выделением энергии  $\sim 200$  МэВ в каждом акте реакции.

При делении ядра урана один нейтрон вызывает деление одного ядра. Два осколка деления, уже не связанные мощными, но короткодействующими ядерными силами, с большими скоростями разлетаются за счет сил электростатического отталкивания. Суммарная кинетическая энергия осколков ( $E \approx 170$  МэВ) составляет основную долю всей энергии, освобождаемой при делении ядра ( $E \approx 200$  МэВ).

Появление осколков — не единственный результат деления ядра. Начальное отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре-осколке заметно больше значения этой величины для стабильных ядер сравнимой массы.

На каждый акт деления ядра образуется в среднем 2—3 новых нейтрона, каждый с энергией в среднем  $E \sim 2$  МэВ ( $v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ). Они испускаются ядром урана сразу после деления и называются *мгновенными*. Образовавшиеся осколки являются  $\beta^-$ -радиоактивными. Поэтому после ряда их  $\beta^-$ -распадов они превращаются в стабильные изотопы. Чаще всего дочернее ядро, образовавшееся после  $\beta^-$ -распада, оказывается возбужденным и переходит в основное энергетическое состояние с испусканием  $\gamma$ -кванта или нейтрона, которые испускаются через несколько минут после деления ядра и называются *запаздывающими*. Такие нейтроны составляют около 0,75 % образующихся нейтронов.

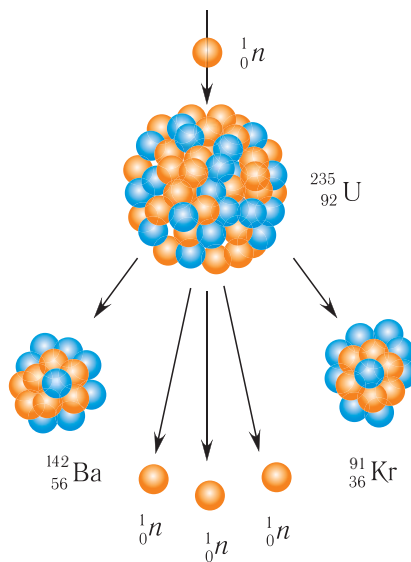
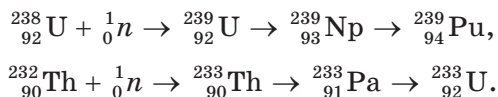


Рис. 220. Реакция деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$  под действием нейтрона



Используемые в качестве сырья для получения искусственного горючего уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и торий  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  начинают делиться при энергии нейтронов свыше 1 МэВ:



Особенность изотопов  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  состоит в том, что они делятся тепловыми нейтронами. В этом и заключается смысл термина «делящийся».

Поскольку деление ядер вызывают нейтроны, а в результате деления опять рождаются нейтроны, то при определенных условиях процесс, начавшись однажды с одного нейтрона, может принять характер *цепной реакции*: за одним делением последуют другие и т. д.

**Ядерная реакция деления**, в которой частицы (нейтроны), вызывающие реакцию, образуются и как продукты этой же реакции, называется *цепной*.

Какие же условия необходимы для цепных ядерных реакций?

Вследствие большой проникающей способности нейтронов и из-за конечных размеров зоны (активной зоны), в которой находится делящееся вещество, многие из нейтронов покидают ее, и цепная реакция не происходит. Поэтому для осуществления цепной реакции определяющее значение имеют размеры зоны, которую называют *активной*, в которой происходит реакция. Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной ядерной реакции, называются *критическими размерами*. От чего же зависят эти размеры?

Критические размеры зависят от природы делящегося вещества, его формы. Чем больше размеры активной зоны, тем выше вероятность поглощения внутри нее нейтронов. Для урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  меньше вероятность вылета нейтронов за пределы зоны до их поглощения, т. е. ее размеры будут меньше, чем для зоны с  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Кроме того, размер зоны будет меньше вследствие того, что для расщепления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  можно использовать медленные нейтроны.

Критические размеры уменьшатся, если вокруг активной зоны поместить замедлитель (графит, воду), так как вылетающие из нее нейтроны будут отражаться от него и возвращаться обратно в нее. Эффективность их отражения значительно увеличивается при толщине отражателя превышающей среднюю длину пробега нейтронов в нем.

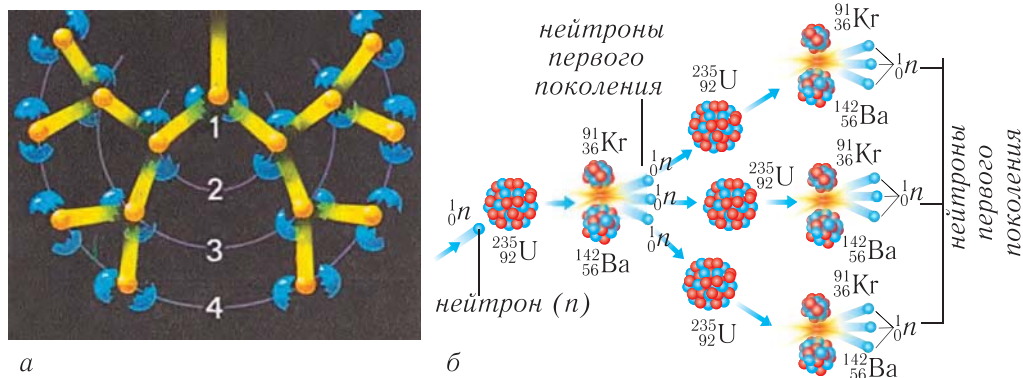


Рис. 221. *a* — цепная реакция деления (1 — первичный нейтрон (первое поколение); 2 — второе поколение, 3 — третье поколение); *б* — схема реакции

Оценим критическую массу делящегося вещества в такой зоне. Наименьшие размеры и массу имеет вещество шарообразной формы, так как для него отношение площади поверхности к объему минимально. Радиус шара должен быть больше длины пробега нейтрона до соударения с ядром. Тогда критическую массу урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  можно оценить, и она составляет примерно 48 кг. При плотности урана  $1,895 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  радиус шара такой массы равен примерно 8,5 см. Для изотопа плутония  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  критическая масса составляет уже 17 кг, что соответствует шару радиуса 6,0 см.

Вновь образованные при ядерной реакции деления два или три нейтрона вызовут дополнительные акты деления, так что процесс лавинообразно нарастает (рис. 221).

Так запускается цепная реакция деления, при которой вновь образовавшиеся нейтроны вызывают процесс деления новых ядер, подобно тому, как ряд поставленных домино «заваливается друг на друга».

Подобное неконтролируемое (неуправляемое) развитие цепной реакции приводит к освобождению колоссального количества энергии за очень короткий промежуток времени. Именно такие процессы происходят при ядерном взрыве (рис. 222).

Количество нейтронов, возникающих в одном акте деления, называется *поколением* нейтронов.



Рис. 222. Ядерный взрыв

Количественной характеристикой цепной реакции деления является **коэффициент размножения нейтронов**:

$$k = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_2$  — число нейтронов в данном поколении,  $n_1$  — число нейтронов в предыдущем поколении. Если коэффициент размножения  $k = 1$ , то число нейтронов в нем все время остается неизменным. При  $k > 1$  общее число нейтронов в реакторе увеличивается со временем и возможно их неконтролируемое размножение, приводящее к взрыву. При  $k < 1$  число нейтронов уменьшается, и реакция с течением времени прекращается.

Нейтроны могут поглощаться различными примесями, покидать область, в которой происходит реакция, терять свою энергию в результате большого числа актов рассеяния. С учетом всех возможных потерь коэффициент размножения  $k$  должен быть больше единицы для цепной ядерной реакции.

Цепная ядерная реакция будет *самоподдерживающейся*, если количество нейтронов в каждом следующем поколении не уменьшается.

Таким образом, для цепных самоподдерживающихся ядерных реакций необходимы следующие условия:

- 1) необходимо иметь минимальное количество вещества, чтобы нейтроны успели возбудить ядро до выхода из области, занимаемой делящимся веществом;
- 2) энергия нейтронов, возникающих при делении, должна быть достаточной, чтобы вызвать деление ядер;
- 3) коэффициент размножения нейтронов  $k > 1$ ;
- 4) отсутствие примесей, поглощающих образующиеся нейтроны.

► Ядерное «горючее» в атомной бомбе содержится в виде разделенных друг от друга порций докритической массы. Обычный (тротильный) взрыв соединяет горючее в единый образец, масса которого превышает критическую. После этого через ничтожно малое время следует ядерный взрыв.

Цепная ядерная реакция впервые была осуществлена в США Энрико Ферми в 1942 г., в СССР — Игорем Курчатовым в 1946 г.

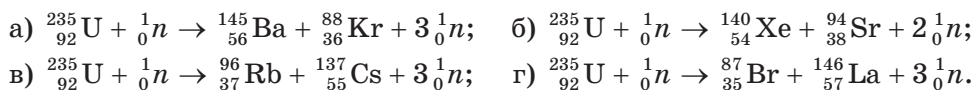
Называя энергию, выделяющуюся при делении ядра, атомной, мы допускаем двойную неточность. Во-первых, делится не атом, а ядро, а во-вторых, выражение «атомная энергия» в буквальном смысле означает «энергия неделимого». Правильно ее называть ядерной энергией.



1. Что называют делением ядра? В чем заключаются особенности этого процесса?
2. Как объяснить способность тяжелых ядер к делению? Почему при делении ядер происходит выделение энергии?
3. Опишите механизм деления ядра урана и напишите уравнение данной ядерной реакции.
4. Что называют цепной ядерной реакцией? Благодаря чему оказалось возможным существование цепной ядерной реакции деления?
5. Изобразите графически и объясните процессы, происходящие при цепной реакции в уране  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

### Упражнение 26

Определите энергетический выход реакций:



Массы изотопов (а.е.м.):  ${}_{56}^{145}\text{Ba}$  — 144,92763;  ${}_{36}^{88}\text{Kr}$  — 87,91445;  
 ${}_{54}^{140}\text{Xe}$  — 139,92164;  ${}_{38}^{94}\text{Sr}$  — 93,91536;  ${}_{37}^{96}\text{Rb}$  — 95,93427;  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  — 136,90709;  ${}_{35}^{87}\text{Br}$  — 86,92071;  ${}_{57}^{146}\text{La}$  — 145,92579.

## § 41. Ядерный реактор

- Для реализации управляемой цепной реакции созданы специальные устройства — ядерные реакторы, позволяющие получать электроэнергию в промышленных масштабах. Как это происходит? Как устроен ядерный реактор? Какие проблемы он создает для окружающей среды?

Цепная реакция может быть управляемой и неуправляемой (ядерный взрыв). Для управления цепной реакцией необходимо очень точно контролировать процесс размножения нейтронов с помощью поглотителей нейтронов (рис. 223), делая его таким, чтобы число нейтронов в процессе реакции оставалось практически неизменным.

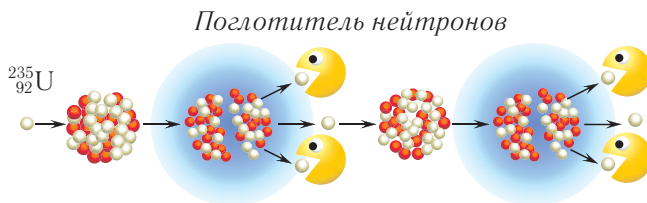


Рис. 223. Контролируемая ядерная реакция в ядерном реакторе

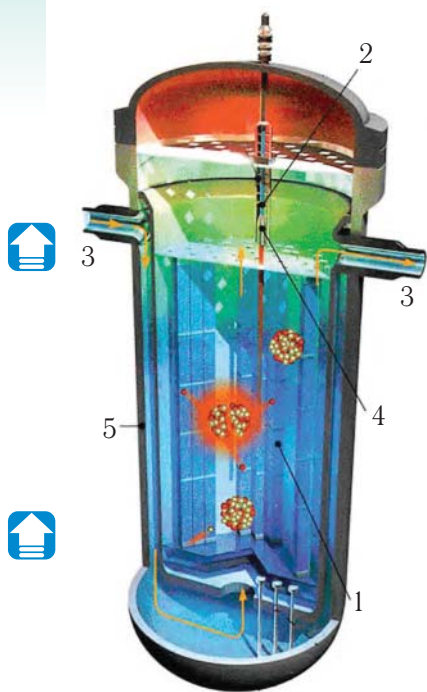


Рис. 224. Схема ядерного реактора: 1 — активная зона с твэлами; 2 — замедлитель (обычная, тяжелая вода); 3 — система отвода теплоносителя; 4 — стержни управления реакцией; 5 — защитный корпус

на отражателем нейтронов, возвращающим их внутрь активной зоны для продолжения реакции. Хорошим отражателем нейтронов является бериллий.

В качестве ядерного горючего используется три вида радиоактивных изотопов: урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ .

2. *Замедлитель быстрых нейтронов* (графит, обычная и тяжелая вода, бериллий, окись бериллия, гидриды металлов, органические жидкости). Средняя энергия нейтронов, появляющихся в реакторе, около  $E \sim 2$  МэВ. Если энергия нейтронов меньше  $E \sim 0,1$  эВ, то их называют *тепловыми*, так как их скорости близки к скорости теплового движения, модуль которой  $2,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Если энергия нейтронов больше 0,1 МэВ,

Определяющую роль в управлении цепными ядерными реакциями в реакторах играют *запаздывающие нейтроны*. Их среднее время жизни для  ${}_{92}^{235}\text{U}$  составляет несколько секунд. Это дает возможность для манипулирования управляющими стержнями с целью поддержания коэффициента размножения нейтронов  $k = 1$ .

**Ядерный реактор** — это устройство, в котором происходит управляемая цепная ядерная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов (рис. 224). В ходе реакции освобождается энергия, которую можно использовать для производства электрической энергии.

Ядерный реактор имеет пять основных составных частей, изображенных на рисунке 224. Упрощенная (функциональная) схема ядерного реактора приведена на рисунке 225.

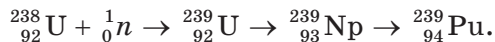
1. *Активная зона*, которая содержит ядерное горючее, находящееся в специальных тепловыделяющих элементах, или *твэлах* (по первым буквам словосочетания). Твэлы представляют собой очень длинные трубки, проходящие через всю активную зону реактора. Именно в них идет цепная реакция. Активная зона окружена

а модуль их скорости  $\sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , то нейтроны называют *быстрыми*. Промежуточная область энергий отведена промежуточным (резонансным) нейтронам. Замедлитель эффективно отбирает энергию от быстрых нейтронов, рождающихся в реакции деления. (Вспомните столкновение двух тел одинаковой массы.) Нейтроны замедляются (отсюда и название вещества — замедлитель) до энергий порядка долей электронвольта.

Под действием медленных (тепловых) нейтронов делится лишь достаточно редкий в природе изотоп урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , в то время как гораздо более распространенный изотоп  ${}^{238}_{92}\text{U}$  поглощает тепловые нейтроны без деления на осколки. При каждом акте деления  ${}^{235}_{92}\text{U}$  выделяется в среднем  $W = 170$  МэВ в виде кинетической энергии разлетающихся осколков. Делящиеся под действием тепловых нейтронов изотопы  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ,  ${}^{233}_{92}\text{U}$  в природе не встречаются и получают искусственным путем.

В реакторах на быстрых нейтронах используются *урано-плутониевый* цикл, в котором ядро  ${}^{238}_{92}\text{U}$  превращается в ядро  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  и *ториевый* цикл, в котором ядро  ${}^{230}_{90}\text{Th}$  превращается в ядро  ${}^{233}_{92}\text{U}$ .

Ядра изотопа  ${}^{238}_{92}\text{U}$  могут делиться только под действием быстрых нейтронов. Однако основной реакцией при взаимодействии с нейтронами является захват нейтрона, после которого они самопроизвольно превращаются в ядра изотопа плутония  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ :



Полученный изотоп  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  является практически стабильным, так как его период полураспада  $T_{1/2} = 24\,400$  лет. Плутоний  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  по способности к взаимодействию с нейтронами похож на изотоп урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . При захвате нейтрона ядро плутония делится и испускает в среднем 2—3 нейтрона, которые способны поддерживать развитие цепной реакции.

Под действием быстрых нейтронов ядро изотопа тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  также самопроизвольно претерпевает цепочку распадов, превращаясь в ядро изотопа  ${}^{233}_{92}\text{U}$ :

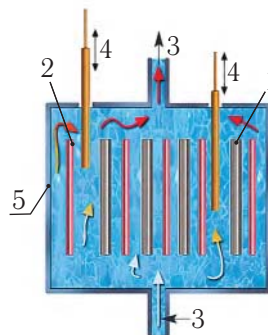


Рис. 225. Схема активной зоны реактора: 1 — активная зона с твэлами; 2 — замедлитель (вода); 3 — система отвода теплоносителя; 4 — стержни управления реакцией; 5 — защитный корпус

Изотоп урана  ${}_{92}^{233}\text{U}$  также является практически стабильным, так как его период полураспада  $T_{1/2} = 162\,000$  лет, но он делится тепловыми нейтронами.

Таким образом, захват быстрых нейтронов изотопами  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  позволяет осуществлять воспроизводство ядерного горючего  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  и  ${}_{92}^{233}\text{U}$ .

Ядерный реактор на быстрых нейтронах выполняет одновременно две функции — производство энергии и воспроизводство ядерного горючего. Именно поэтому он называется еще реактором-размножителем (бридером). Кроме того, в нем можно использовать в качестве горючего не только редкий в природе изотоп урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , но и гораздо более распространенный изотоп урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ .

В связи с тем, что запасы естественно делящихся радиоактивных изотопов ограничены, возможность осуществления процессов производства ядерного горючего  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  и  ${}_{92}^{233}\text{U}$  в реакторах на быстрых нейтронах имеет принципиальный характер для будущего ядерной энергетики. Кроме того, ядерные реакторы на тепловых нейтронах способны «сжечь» только (0,5—1) % урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Применение реактора-размножителя позволяет увеличить эффективность использования горючего в десятки раз.

3. *Система охлаждения* — теплоноситель (для отвода из активной зоны реактора выделяющейся в ней энергии) — вода, газы, жидкий натрий. Вода нагревается стенками твэлов до температуры  $t = 300\text{ }^\circ\text{C}$  и под давлением порядка  $p \sim 10^7$  Па (100 атм) выводится из активной зоны. Далее вода превращается в пар и направляется к паровым турбинам для генерации электрической энергии.

4. *Система регулирования* — устройство для обеспечения возможности управления цепной реакцией. В системе регулирования используются поглотители (стержни) из бора, т. е. вещества, которое активно поглощает нейтроны.

Если стержни с поглотителем ввести в активную зону, то коэффициент размножения нейтронов уменьшается. И, наоборот, выведение стержней из активной зоны увеличивает коэффициент размножения. Этим и достигается управление реакцией. Обычно это делается автоматически. В нештатных ситуациях предусмотрено экстренное прекращение цепной реакции, которое осуществляется сбрасыванием в активную зону специальных аварийных стержней (стержней безопасности).

5. *Система безопасности* — оболочка из бетона с железным наполнителем (для защиты окружающего пространства от ионизирующего излучения компонентов топлива и продуктов ядерной реакции).



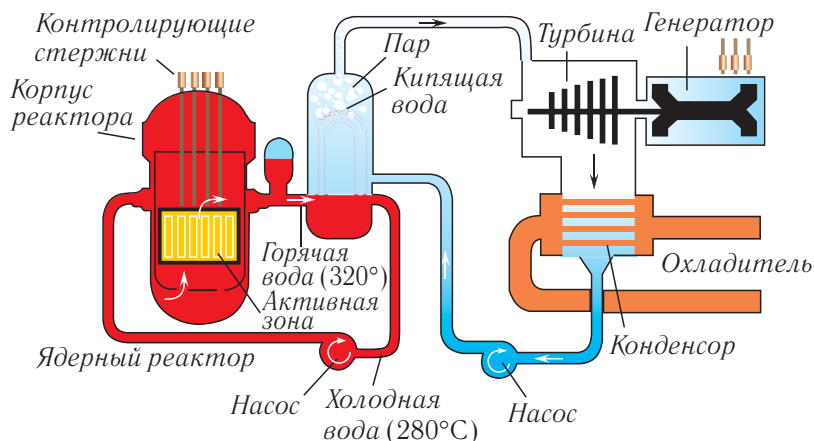


Рис. 226. Диаграмма, показывающая работу атомной электростанции с герметичным водяным контуром охлаждения

Ядерные реакторы различаются по типу используемого ядерного горючего, замедлителя и теплоносителя.

Выработка электроэнергии, основанная на использовании управляемой ядерной реакции, производится на атомных электростанциях (АЭС) (рис. 226).

Преимущества атомных электростанций:

- 1) не потребляют кислород и органическое топливо;
- 2) отсутствует загрязнение окружающей среды золой, серой и другими продуктами сгорания органического топлива.

Опасные факторы воздействия АЭС на окружающую среду:

- 1) радиоактивные отходы;
- 2) радиоактивное загрязнение местности;
- 3) опасность экологических катастроф;
- 4) нарушение теплового баланса в окрестности АЭС.

Всем известна Чернобыльская катастрофа, произошедшая на 4-м блоке Чернобыльской атомной станции в апреле 1986 г. В результате нарушения технологических процессов произошло перегревание активной зоны. Последовавший за этим взрыв разрушил оболочку реактора. Большое количество радиоактивных веществ было выброшено в атмосферу. Кратковременному загрязнению короткоживущими изотопами подверглись огромные территории. Долговременное загрязнение сделало невозможными для проживания тысячи квадратных километров территории Беларуси, России и Украины, где выпали наиболее опасные нуклиды стронция  $^{90}_{38}\text{Sr}$  (период полураспада 27,7 года) и цезия  $^{137}_{55}\text{Cs}$  (период

полураспада около 30 лет). Нуклиды  $^{90}_{38}\text{Sr}$  откладываются в костных тканях и костном мозге — органе кроветворения, что может привести к развитию рака крови (лейкемии) и костей. Нуклиды  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , попадающие в организм главным образом через пищеварительный тракт и дыхательные пути, накапливаются в основном в скелетных мышцах, испускают  $\gamma$ -излучение, наносящее значительные повреждения организму.

▶ Первая в мире атомная электростанция была построена в СССР в г. Обнинске и дала ток 27 июня 1954 г.

Первая в Беларуси атомная электростанция построена в северо-западной части страны вблизи города Островец Гродненской области. Ее проектная мощность с двумя энергоблоками составляет 2,4 ГВт.



1. Что называют ядерным реактором? Что является ядерным горючим в реакторах?
2. Какое вещество служит замедлителем нейтронов в ядерных реакторах? Зачем нужен замедлитель?
3. Что используют в качестве теплоносителя в ядерных реакторах?
4. Как осуществляется управление цепной реакцией деления?
5. Что применяется в системе биологической защиты от потока нейтронов и  $\gamma$ -излучения, возникающих в реакторе?
6. В чем состоят преимущества использования атомных электростанций по сравнению с тепловыми электростанциями?
7. В чем заключаются основные недостатки ядерной энергетики?

## § 42. Реакции ядерного синтеза

- В недрах светящихся звезд (в т. ч. и Солнца) «бушуют» ядерные реакции синтеза, приводящие к выделению энергии с их поверхности в виде излучения. Энергетическая проблема будущего на нашей планете (с учетом ограниченности запасов угля, нефти и газа) может быть решена за счет создания управляемой реакции термоядерного синтеза, в которой будут использованы воды Мирового океана.

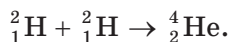
Несмотря на то что атомные электростанции экологически более чистые по сравнению с тепловыми электростанциями, у ядерной энергетики есть существенные недостатки. Во-первых, радиоактивные элементы (уран и торий) составляют  $\sim (3 - 8) \cdot 10^{-4} \%$  по массе в земной коре и их добыча все усложняется. Во-вторых, что делать с растущим количеством радиоактивных отходов?

Этих недостатков можно избежать, если для получения энергии использовать не реакции деления тяжелых ядер, а реакции синтеза легких ядер.

Эти реакции эффективно протекают при сверхвысоких температурах  $T \sim 10^9$  К и самоподдерживаются за счет значительного выделения в них энергии. Такие реакции названы **термоядерными**. Причина выделения энергии та же, что и в случае реакций деления — удельная энергия связи продуктов реакции выше, чем у исходных материалов.

Энергия покоя двух легких ядер больше, чем у образованного из них результирующего ядра. Так как результирующее ядро имеет меньшую массу, то при его образовании должна высвободиться энергия  $Q = \Delta mc^2$ .

Простейшим примером термоядерной реакции является преобразование дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  в гелий  ${}^4_2\text{He}$ :



Массовое число ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$   $m_{\text{H}} = 2,01355$  а.е.м., массовое число ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$   $m_{\text{He}} = 4,00150$  а.е.м. В результате реакции синтеза дефект масс:

$$\Delta m = m_{\text{He}} - 2m_{\text{H}} = 4,00150 \text{ а.е.м.} - 2 \cdot 2,01355 \text{ а.е.м.} = -0,0256 \text{ а.е.м.}$$

Это составляет 0,63 % общей массы ядер водорода. В то время как при делении урана дефект масс составляет 0,056 %. Следовательно, для одной и той же массы вещества при ядерном синтезе выделяется примерно в 10 раз больше энергии, чем при делении ядра. Если бы этот процесс удалось использовать для производства энергии, то он оказался бы в 10 раз эффективнее процесса деления урана.

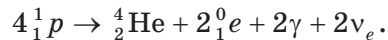
Основное преимущество использования ядерного синтеза для получения энергии заключается, прежде всего, в количестве запасов топлива. Для человечества было бы очень удобно, если бы для реакции синтеза требовался наиболее часто встречающийся изотоп водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Однако для реакции синтеза его необходимо нагреть до колоссальной температуры. Дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  вступает в реакцию синтеза при более низкой температуре, чем изотоп водорода  ${}^1_1\text{H}$ , а тритий  ${}^3_1\text{H}$  еще при более низкой температуре. Но так как тритий  ${}^3_1\text{H}$  нестабилен, то в качестве основного ядерного топлива остается лишь дейтерий  ${}^2_1\text{H}$ .

В Мировом океане из 7000 атомов водорода только один является дейтерием  ${}^2_1\text{H}$ . Следовательно, запасы дейтерия в нем составляют  $80\,000 \text{ км}^8$ . В результате реакции синтеза водорода, который содержится в 1 л воды,

выделяется столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 300 л бензина. Следовательно, из дейтерия, содержащегося в океане, можно получить столько энергии, сколько выделяется при сгорании бензина, объем которого превышает объем земного шара, т. е. его запасы практически неисчерпаемы. Кроме того, при реакциях синтеза фактически не образуются радиоактивные отходы.

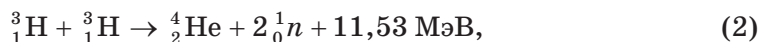
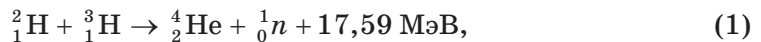
Однако серьезным препятствием на пути к получению энергии является кулоновское отталкивание ядер дейтерия, которое при комнатной температуре не позволяет им сблизиться до расстояний, на которых сказываются короткодействующие ядерные силы притяжения. Для преодоления сил отталкивания необходимо нагреть дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  до очень высоких температур  $T \sim 10^9$  К, при которых возможны реакции синтеза. Это является существенным препятствием для широкого применения реакций ядерного синтеза в энергетике. Эта температура намного выше температуры внутри Солнца ( $T \sim 10^7$  К). Термоядерная реакция происходит и в других звездах. В них есть одно существенное преимущество: благодаря колоссальным массам и размерам в них оптимально решается проблема гравитационного удержания и термоизоляции вещества, представляющего собой плазму.

Основным источником энергии Солнца являются реакции, приводящие к превращению четырех протонов в ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  с выделением 26,72 МэВ энергии:



В природных условиях такие реакции протекают лишь в недрах звезд, а для осуществления их на Земле необходимо сильно разогреть вещество либо ядерным взрывом, либо мощным газовым разрядом, либо гигантским импульсом лазерного излучения, либо бомбардировкой интенсивным пучком частиц.

Для управления реакциями синтеза необходимо создать термоядерный реактор. Наиболее вероятно осуществление такого реактора на следующих ядерных реакциях синтеза:



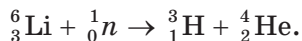
Наиболее доступной из реакций синтеза (по области необходимых температур) и энергетически выгодной является реакция (1) между ядрами дейтерия и трития. При этом на один нуклон выделяется 3,5 МэВ, а при реакциях деления — 1 МэВ. Для того чтобы дейтерий мог проникнуть к ядру трития, ему необходимо иметь энергию порядка 1 МэВ. Рассчитаем температуру, которую должна иметь частица, чтобы иметь такую энергию.

Средняя кинетическая энергия частицы в газе  $E = \frac{3}{2}kT$ , тогда

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ В}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ К}.$$

При такой температуре вещества почти каждое столкновение частиц приводило бы к ядерной реакции, однако на Земле такие условия недостижимы.

В проблеме термоядерного синтеза есть еще один вопрос: где взять тритий? Тритий в природе содержится в незначительном количестве. Он образуется в верхних слоях атмосферы при соударении космических частиц с атомами азота. Но его можно получать в ядерных реакторах при облучении  ${}^6_3\text{Li}$  нейтронами. Он может быть получен в самом термоядерном реакторе, если использовать мощные потоки нейтронов:



Дейтерий присутствует в природном водороде, и его можно получить, разделяя изотопы водорода. Запасы дейтерия в Мировом океане огромны, на многие тысячи лет хватит также запасов лития, необходимого для производства другого изотопа — трития.

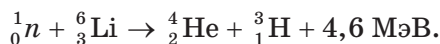
Для практического управления термоядерными реакциями важнейшим является создание таких условий, при которых высокотемпературная плазма с помощью магнитных полей устойчиво удерживается в состоянии теплоизоляции. Для этой цели применяются магнитные камеры. Основными видами потерь являются теплота, уходящая через стенки реактора, и тормозное излучение в плазме.

К преимуществам использования реакций синтеза для получения энергии относятся:

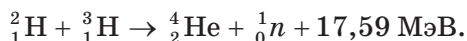
- 1) высокий выход энергии;
- 2) экологическую безопасность реактора;
- 3) отсутствие проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Осуществить управляемую термоядерную реакцию в промышленных масштабах, т. е. добиться энергетического выхода, превышающего затраты, пока не удалось.

На Земле удалось осуществить в настоящее время лишь неуправляемую термоядерную реакцию синтеза при взрыве водородной бомбы. Следует заметить, что сначала в водородной бомбе взрывается находящаяся внутри нее атомная бомба. В результате происходит резкий рост температуры до значений  $(10 - 20) \cdot 10^6$  К, при этом возникает поток нейтронов и электромагнитного излучения. Нейтроны вступают в реакцию с изотопом лития, находящимся в бомбе, с образованием трития:



Повышение температуры до необходимого значения вместе с образовавшимся тритием приводят к термоядерной реакции:



Основная часть энергии (70 %) уносится быстрыми нейтронами и ядрами атомов гелия (20 %).

► Исследование механизмов ядерного синтеза и распространенности различных ядер дает возможность заглянуть в далекое прошлое, когда «рождались» химические элементы. Изучение радиоактивности, открытие деления и синтеза ядер показали, что на ранних стадиях Вселенная состояла только из самых легких элементов — водорода и гелия, а все более тяжелые элементы образовались в результате ядерных реакций в звездах и при взрывах звезд.

В 2005 г. было принято решение о строительстве Международного экспериментального термоядерного реактора в г. Кадараш (Франция).



1. Какие реакции называются термоядерными?
2. Как объяснить, что при синтезе легких ядер выделяется энергия?
3. Каковы условия осуществления ядерной реакции синтеза?
4. Как называются наиболее известные изотопы водорода и как их обозначают?
5. Сравните энергию, приходящуюся на один нуклон при термоядерной реакции и цепной ядерной реакции.
6. Обсудите достоинства и недостатки различных способов получения энергии: сжигание ископаемого горючего, деление ядра и ядерный синтез.

7. Применима ли формула Эйнштейна  $E = mc^2$ :

- а) к делению ядер;
- б) к ядерному синтезу;
- в) к ядерным реакциям?

8. Источником электромагнитной энергии, излучаемой Солнцем и другими звездами, служит термоядерный синтез. Какие условия в недрах звезд делают возможным протекание термоядерного синтеза?

## § 43. Ионизирующее излучение. Элементы дозиметрии

- Человек каждую секунду подвергается воздействию излучений. Излучение Солнца является одним из ключевых факторов возникновения и существования жизни на Земле. Однако некоторые виды излучения опасны для здоровья человека. Какие это излучения? Как от них можно защититься?

Заряженные частицы, рентгеновское и  $\gamma$ -излучения, распространяясь в веществе, взаимодействуют с его атомами. За счет своей энергии частицы излучения могут ионизировать атомы, выбивая из них электроны. Часто одна частица в состоянии ионизировать несколько атомов, поэтому процесс распространения такого излучения через вещество сопровождается его сильной ионизацией. Вследствие этого **ионизирующим** называют такой вид излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул (рис. 227).

Основу биологического действия ионизирующего излучения на живые ткани составляют химические процессы, происходящие в их клетках при



Рис. 227. Виды излучения

поглощению ими излучения. Ионизация атомов и молекул тканей вещества приводит к повреждению клеток и изменению структуры тканей. Часть атомов и молекул переходит в возбужденное состояние и, возвращаясь в невозбужденное состояние, отдает излишек энергии в виде электромагнитного излучения. Под воздействием этого излучения в тканях происходят биохимические реакции, обусловленные образованием новых молекул, чуждых нормальной клетке. В результате нарушается клеточное деление и образование новых клеток. В свою очередь это приводит к хромосомным перестройкам и возникновению мутаций, приводящих к изменениям в генах клетки. Таким образом, биологическое действие ионизирующего излучения сказывается не только на данном организме, но и на последующих поколениях.

Повреждения живого организма, вызванные действием ионизирующего излучения, называется *лучевой болезнью*. Опасность этой болезни усугубляется наличием скрытого периода, т. е. ее симптомы проявляются только через некоторый промежуток времени. Симптомами лучевой болезни являются тошнота, рвота, общая слабость, повышенная температура, выпадение волос, кровоизлияние.

Разные виды ионизирующего излучения обладают различной проникающей способностью (см. рис. 227). Биологическое действие различных видов излучения на живые организмы неодинаково. Например,  $\alpha$ -частицы не способны проникнуть через наружный слой кожи. Поэтому они не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие  $\alpha$ -частицы, не попадут внутрь организма с пищей, вдыхаемым воздухом, на слизистую оболочку или через открытую рану.  $\beta$ -излучение обладает большей проникающей способностью: оно проникает в ткани организма на 1—2 см. Проникающая способность  $\gamma$ -излучения настолько велика, что поглотить его может только достаточно толстая свинцовая или бетонная плита. Чем больше энергии передает излучение тканям живого организма, тем больше в них будет повреждений.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников ионизирующих излучений: космических лучей, радиоактивных изотопов, естественной радиоактивности горных пород и почвы, попадающих в пищу радиоактивных радиоизотопов. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о *внешнем облучении*. В то же время они могут находиться в пище, воде, воздухе и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют *внутренним*.



Основными источниками внутреннего фонового облучения человеческого организма являются:

1) естественный изотоп углерода  ${}^14_6\text{C}$ , содержащийся во всех тканях человеческого организма;

2) радон  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ , торий  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  и их дочерние продукты распада, вдыхаемые с воздухом и откладывающиеся в дыхательных органах человека;

3) долгоживущий изотоп радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  и его короткоживущий изотоп  ${}^{224}_{88}\text{Ra}$ , отлагающиеся в костных тканях;

4) естественный радиоактивный изотоп калия  ${}^{40}_{19}\text{K}$ , содержащийся в мягких тканях (преимущественно в мышцах).

Кроме того, отдельные источники ионизирующего излучения избирательно концентрируются в отдельных органах: йод — в щитовидной железе, стронций — в костях, уран — в почках — и подвергают их повышенному облучению.

Очень важно уметь определять результат действия ионизирующего излучения на вещество, мерой которого является *доза*. Этим занимается **дозиметрия**.

Количество энергии, переданной единице массы организма ионизирующим излучением, называется дозой (от греч. *δοση* (доза) — доля, порция). Существуют различные виды доз в зависимости от вида излучения, вида органа или ткани, подвергшихся облучению.

**Поглощенная доза** — количество энергии  $W$ , переданное веществу ионизирующим излучением любого вида в пересчете на единицу массы тела любого вещества.

Доза в органе или биологической ткани — средняя поглощенная доза  $D$  в определенном органе или ткани человеческого тела:

$$D = \frac{W}{m}, \quad (1)$$

где  $W$  — полная энергия, переданная ионизирующим излучением ткани или органу;  $m$  — масса органа или ткани.

В СИ единицей поглощенной дозы является **Грей (Гр)**.  $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Поглощенная доза излучения равна 1 Гр, если в 1 кг вещества поглощено ионизирующее излучение, энергия которого равна 1 Дж.

Поглощенная доза расходуется на нагревание вещества и на физические и химические превращения в нем. Величина дозы зависит от вида излучения, энергии его частиц, плотности их потока и от состава облучаемого вещества.

При одинаковой поглощенной дозе  $\alpha$ -излучение гораздо опаснее  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений. Для учета этого фактора дозу излучения следует умножить на коэффициент  $w_R$ , учитывающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Он называется *коэффициентом качества излучения (взвешивающий коэффициент)*.

Коэффициент качества излучения показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия  $\gamma$ -излучения (при одинаковых поглощенных дозах).

Значения  $w_R$  для различных видов ионизирующего излучения приведены в таблице 12.

Таблица 12. Взвешивающие коэффициенты  $w_R$  (коэффициенты качества) для различных видов ионизирующего излучения

| Вид излучения                                | Взвешивающий коэффициент излучения ( $w_R$ ) |
|--|--|
| Фотоны                                       | 1  |
| Электроны и мюоны                            | 1  |
| Протоны и заряженные пионы                   | 2  |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ионы | 20   |
| Нейтроны                                     | См. рис. 228                                 |

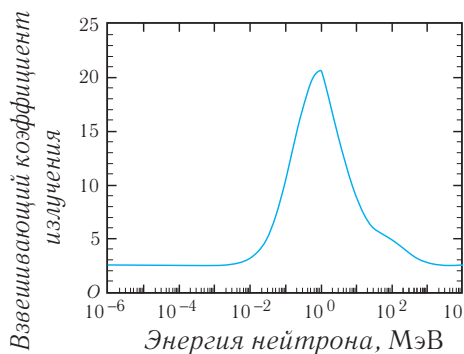


Рис. 228. Зависимость взвешивающего коэффициента излучения нейтронов от их энергии

Пересчитанную таким образом дозу называют *эквивалентной дозой*. **Эквивалентная доза  $H$**  — это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий коэффициент качества излучения:

$$H = w_R D. \quad (2)$$

В СИ единицей эквивалентной дозы является **зиверт (Зв)**.

1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и взвешивающий коэффициент равен единице.

Необходимо учитывать также, что одни части тела более чувствительны к облучению, чем другие. Поэтому дозы облучения органов и тканей организма необходимо учитывать с разными взвешивающими коэффициентами  $w_T$  (таблица 13). При умножении эквивалентной дозы на соответствующие коэффициенты и суммировании по всем органам и тканям получают **эффективную дозу**, отражающую суммарный эффект облучения для организма.

Таблица 13. Тканевый взвешивающий коэффициент ( $w_T$ ) (2007)

| Ткань  | $w_T$ |
|--|-------|
| Костный мозг (красный), толстая кишка, легкие, желудок | 0,12  |
| Молочная железа, остальные ткани                       | 0,12  |
| Половые железы   | 0,08  |
| Мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа     | 0,04  |
| Поверхность кости, головной мозг, слюнные железы, кожа | 0,01  |

На практике широко используются внесистемные единицы:

**рад** — единица поглощенной дозы излучения:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}; \quad (3)$$

**бэр** (биологический эквивалент рад) — единица эквивалентной дозы:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}, \quad 1 \text{ Зв} = 1 \cdot 10^2 \text{ бэр}. \quad (4)$$

Облучению от естественных источников подвергается любой житель Земли. Естественный фон составляет около 1,3 мЗв в год на человека. Однако одни из них получают большую дозу, а другие — меньшую. Это зависит от места проживания, образа жизни. Использование газа для приготовления пищи, герметизация помещений, полеты на самолетах, применение некоторых строительных материалов — все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников. В среднем земные источники ионизирующего излучения обеспечивают более  $\frac{5}{6}$  годовой эффективной дозы, получаемой населением, в основном за счет внутреннего облучения. Остальную часть естественного облучения вносят космические лучи путем внешнего облучения.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных



источников радиации. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космического излучения эффективную дозу около 300 мкЗв в год. Для людей, живущих выше 2 км над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше. При подъеме с высоты 4 км до высоты 12 км уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз.

В среднем примерно  $\frac{2}{3}$  эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников излучения, поступают от радиоактивных веществ, попавших в организм с водой, пищей и воздухом.

▶ Наиболее значительным из всех естественных источников ионизирующих излучений является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон и его дочерние продукты. Именно они ответственны примерно за  $\frac{3}{4}$  годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников ионизирующего излучения (рис. 229).



Для защиты от ионизирующего излучения, по возможности, нужно использовать следующие способы:

- 1) удаление на большое расстояние от источника;
- 2) ограничение времени пребывания на загрязненной местности;
- 3) применение защитных веществ (свинец, бор, кадмий), эффективно поглощающих ионизирующее излучение;
- 4) применение веществ, ослабляющих воздействие ионизирующих излучений на организм;

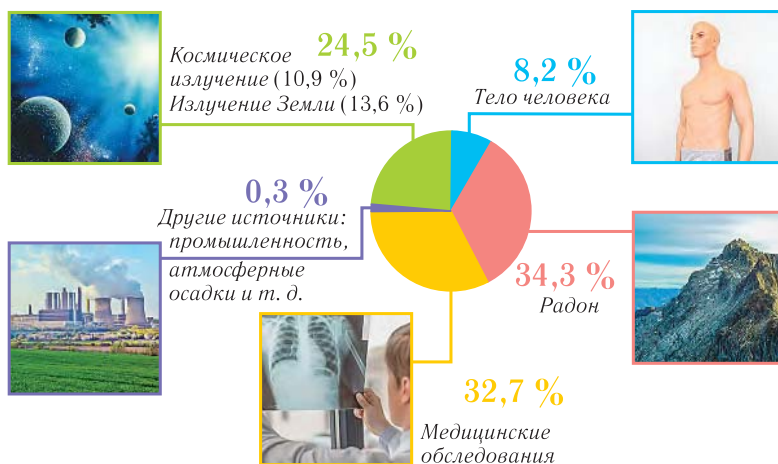


Рис. 229. Источники ионизирующего излучения

5) дозиметрический контроль окружающей среды и продуктов питания.

Широкое применение находят ионизирующие излучения в науке и технике. В результате взаимодействия частиц высоких энергий с исследуемым веществом образуются радиоактивные нуклиды. При переходе их в стабильное состояние испускается  $\gamma$ -излучение. По виду  $\gamma$ -спектров и интенсивности спектральных линий определяют химический состав вещества и концентрации содержащихся в нем элементов. Для этого метода характерны универсальность методики, быстрота измерения и очень высокая относительная чувствительность. Она достигает величины порядка  $10^{-7}$ .

Радиоактивационный анализ широко применяется в геологоразведке, особенно при исследовании руд, содержащих редкие и драгоценные металлы. В технике благодаря высокой чувствительности им исследуют скорость износа металлических деталей, например исследование износа железнодорожных рельсов.

Радионуклиды (изотопы йода, технеция, ксенона, таллия) широко используются в медицинской диагностике.

В качестве приборов для измерения дозы или ее мощности используются дозиметры. Ими служат приборы, способные регистрировать ионизирующие излучения. Шкалы приборов специально проградуированы в единицах дозы либо в единицах мощности дозы.

**Внимание!** Знак, предупреждающий о радиационной опасности, изображен на рисунке 230.



Рис. 230. Знак радиационной опасности

► Беккерель первым столкнулся с «результатами» воздействия радиоактивного излучения на ткани живого организма. Он положил пробирку с радием в карман и получил серьезный ожог кожи.

Ионизирующее излучение используется в медицине как для лечения, так и в диагностических целях. Одним из самых распространенных медицинских приборов является рентгеновский аппарат. Самым значительным достижением рентгенодиагностики стала компьютерная томография. Ее применение позволило уменьшить дозы облучения в десятки раз.

Наиболее чувствительными к поражению ионизирующим излучением являются кроветворные органы, а наиболее опасными являются дозы, полученные в течение очень малого промежутка времени. Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы теряют способность нормально функционировать при дозах 0,5—1 Гр.

► По правилам МАГАТЭ (Международное Агентство по Атомной Энергии), предельная доза облучения составляет 5 мЗв в год для населения и 0,05 Зв в год для людей вредных профессий (не считая фонового излучения). В Республике Беларусь с 28 декабря 2012 г. введены следующие Нормы радиационной безопасности. Основным пределом доз для населения является эффективная доза, равная 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год или эффективная доза за период жизни (70 лет) — 70 мЗв. Эквивалентные дозы за год: в хрусталике глаза — 15 мЗв; в коже, кистях и стопах — 50 мЗв.



1. Какое излучение называют ионизирующим?
2. В чем проявляется биологическое воздействие ионизирующего излучения на живые организмы?
3. Какое излучение обладает наибольшей проникающей способностью?
4. К каким последствиям может привести облучение человека ионизирующим излучением?
5. Что является основными естественными источниками ионизирующего излучения?
6. Чем занимается дозиметрия?
7. Дайте определение поглощенной дозы излучения. Что является единицей измерения поглощенной дозы в СИ?
8. Что такое эквивалентная доза? Что является единицей эквивалентной дозы в СИ?
9. Что такое эффективная доза? Что является единицей эффективной дозы в СИ?
10. Какие внесистемные единицы используются для измерения поглощенной и эквивалентной доз?
11. Какие из естественных внутренних источников ионизирующего излучения являются наиболее опасными?
12. Какие органы человека являются наиболее чувствительными к поражению ионизирующим излучением?

## § 44. Элементарные частицы и их взаимодействия

- Долгое время протон, нейтрон и электрон считались незыблемыми «кирпичиками» материи. Однако по мере открытия новых частиц перед физиками встала проблема их классификации: сколько всего «кирпичиков» материи, какие из них являются простейшими, а какие имеют сложную структуру, т. е. образованы из других частиц. Как частицы взаимодействуют между собой? Как они распадаются?



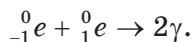
Каждый электрон характеризуется собственным механическим моментом движения, который называется спином (от англ. spin — вращать).

Вплоть до конца XIX в. атомы считались неделимыми «кирпичиками» материи. Но в конце XIX — начале XX в. учеными было установлено сложное строение атомов и раскрыта структура ядер. Открыты новые частицы — электроны, фотоны, протоны и нейтроны, которые определяют свойства атомов и ядер и их взаимодействие. Именно они уже, а не атомы являлись простейшими неделимыми частицами, их нужно было считать «кирпичиками мироздания».

В 1932 г. была открыта новая частица и первая античастица — позитрон. Хотя еще в 1928 г. английский физик П. Дирак, исходя из разработанной им релятивистской теории движения электрона, предсказал, что должен существовать «двойник» электрона, имеющий положительный заряд. Позитрон явился первой обнаруженной античастицей. В 1955 г. был открыт — антипротон, а 1956 г. — антинейтрон. В том же году была открыта еще одна новая частица — нейтрино.

Существование позитрона (от лат. *positus* — положительный), предсказанного Полем Дираком, в 1932 г. доказал американский физик К. Андерсон, исследуя космические лучи.

При столкновении медленно движущихся электрона и позитрона они аннигилируют (от лат. *nihil* — ничто) и возникают обычно два фотона (рис. 231, а):



Образование при аннигиляции именно двух (редко трех) фотонов является следствием закона сохранения импульса и энергии.

Возможен и обратный процесс рождения электронно-позитронной пары в поле ядра за счет энергии фотона:

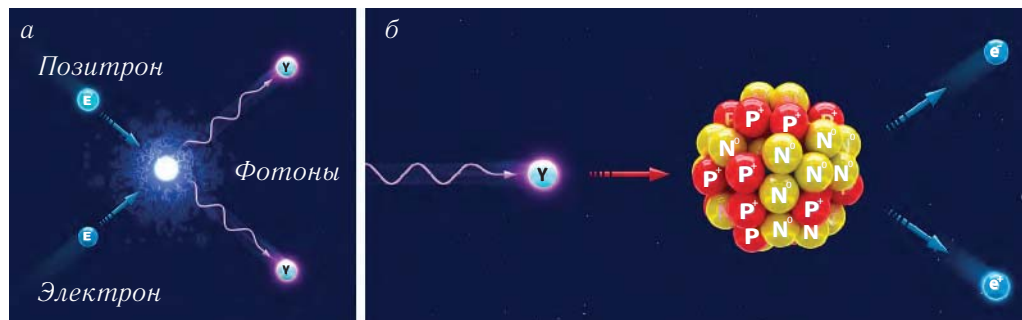
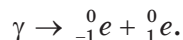


Рис. 231. а — аннигиляция электрона и позитрона при столкновении; б — рождение электронно-позитронной пары из  $\gamma$ -кванта в поле ядра

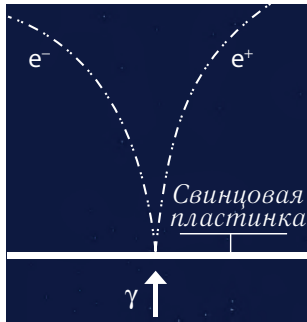


Рис. 232. Рождение электронно-позитронной пары из  $\gamma$ -кванта — при прохождении квантов через свинцовую пластинку

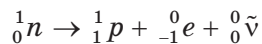
Вскоре был сформулирован принцип зарядового сопряжения: каждая заряженная частица имеет античастицу. Этот принцип распространяется на нейтральные частицы — нейтрон и нейтрино.

Следовательно, фактически половину всех элементарных частиц составляют античастицы.

В том же 1932 г. при исследовании  $\beta^+$ -распада была открыта еще одна новая частица — нейтрино.

Ученым при исследовании особенностей  $\beta^+$ -распада, а также свойств нейтрино (антинейтрино) впервые пришлось иметь дело с еще одним видом фундаментального взаимодействия — *слабым взаимодействием*. Оно проявляется при взаимопревращениях элементарных частиц. Для характеристики слабых взаимодействий вводится квантовое число — *лептонный заряд*, обозначаемый латинской буквой  $L$ . Необходимость введения лептонного заряда обусловлена тем, что до сих пор не обнаружено ни одного явления, в котором не выполняется *закон сохранения лептонного заряда: сумма лептонных зарядов до и после взаимодействия сохраняется*. Лептонный заряд представляет собой безразмерное целое число. У всех лептонов (частиц и античастиц)  $L = \pm 1$ , а у частиц, не являющихся лептонами (например, нуклонов),  $L = 0$ . Нейтрино, так же как и электрон, относят к классу *лептонов*.

Рассмотрим реакции  $\beta^+$  превращений. Из закона сохранения лептонного заряда для уравнения реакции распада нейтрона:



следует:

$$0 = 0 + 1 + L.$$

Откуда находим:

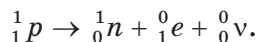
$$L = -1.$$

Таким образом, лептонный заряд нейтрино в данной реакции отрицателен. Следовательно, как вытекает из определения лептонов,



в процессе  $\beta^-$ -распада ядра рождается не нейтрино, а *антинейтрино*  $\bar{\nu}$  (см. рис. 216).

Отметим, что свободный протон, в отличие от нейтрона, стабилен. Однако в ядре становится возможным  $\beta^+$  превращение протона в нейтрон с испусканием *позитрона* и *нейтрино*:



Это следует из закона сохранения лептонного заряда, т. к.

$$0 = 0 - 1 + L,$$

откуда  $L = +1$ .

Таким образом, при электронном распаде возникает антинейтрино  $\bar{\nu}$ , при позитронном распаде — нейтрино  $\nu$ . Это обусловлено фундаментальным законом сохранения лептонного заряда.

Прежде чем перейти к классификации частиц, необходимо дать определение того, что понимается в настоящее время под элементарной частицей.

**Элементарными** называют частицы, которые на современном уровне развития физики можно считать первичными неразложимыми далее частицами, и из них построена вся материя. Неделимость элементарных частиц не означает, что у них отсутствует внутренняя структура.

Элементарные частицы способны взаимодействовать друг с другом. Для всех элементарных частиц характерна способность возникать и поглощаться (рождаться и уничтожаться) при взаимодействии с другими частицами. Например, хотя нейтрон и не состоит из протона, электрона и антинейтрино, но он может превращаться в указанные частицы при взаимодействиях.

Общими характеристиками всех элементарных частиц является масса, среднее время жизни, электрический заряд и спин.

Различие в массах частиц получило отражение в названиях типов частиц: **лептоны** (от греч.  $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\varsigma$  (лептос) — легкий), **мезоны** (от греч.  $\mu\epsilon\sigma\omicron\varsigma$  (мезос) — средний), **барионы** (от греч.  $\beta\alpha\rho\upsilon\varsigma$  (барис) — тяжелый). Однако в дальнейшем оказалось, что такая классификация не отражает всех свойств элементарных частиц.

Электрические заряды элементарных частиц являются кратными величине элементарного электрического заряда.

Спин элементарных частиц является целым или полуцелым и кратным постоянной Планка  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

В 50-х гг. XX в. было обнаружено, что в ядерных реакциях могут рождаться новые виды частиц, если бомбардирующая частица обладает достаточной энергией. Общее число элементарных частиц с античастицами около 500, и их количество увеличивается с каждым годом. Из них 30 относительно стабильные со средним временем жизни не менее  $10^{-17}$  с и более 400 — короткоживущие, со средним временем жизни  $10^{-23}$  с. Время жизни зависит от природы взаимодействия.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на *стабильные, квазистабильные и нестабильные (резонансы)*.

Если распад обусловлен сильным взаимодействием, то среднее время жизни частицы оказывается очень малым ( $10^{-22}$ — $10^{-24}$  с), и исторически они были названы (нестабильными) *резонансами*.

При распаде, обусловленном слабым взаимодействием, среднее время жизни частиц  $\geq 10^{-10}$  с, при электромагнитном взаимодействии —  $10^{-16}$ — $10^{-19}$  с. Такие частицы называются *квазистабильными*.

*Стабильными* в пределах точности современных измерений являются **электрон, протон, фотон и нейтрино**.

Изучением их свойств и взаимодействий занимаются в разделе физики, называемом *физикой элементарных частиц*.

▶ Электрический заряд частиц в ядерной физике принято также выражать не в кулонах, а в виде целого числа, показывающего, сколько элементарных зарядов составляют заряд данной частицы  $\left( Z = \frac{q}{e} \right)$ . Поэтому для протона заряд равен +1, для электрона −1, а для атомного ядра —  $Z$ .



1. Какая античастица была открыта первой?
2. Все ли элементарные частицы имеют античастицу?
3. Чем отличается античастица от частицы?
4. Какая частица называется элементарной?
5. Какие частицы являются стабильными?
6. Какие частицы относятся к квазистабильным и нестабильным (резонансам)?



§44-1

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 7

Ядерная физика изучает атомные ядра. Протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — **нуклона**.

Число протонов в ядре называется **атомным номером** и обозначается буквой  $Z$ . Общее число нуклонов называется **массовым числом** и обозначается буквой  $A$ . Число нейтронов в ядре

$$N = A - Z.$$

**Ядерные силы** — короткодействующие силы притяжения действуют только между данным нуклоном и его непосредственными соседями.

**Ядерная реакция** — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, который может сопровождаться изменением состава и строения ядра.

**Энергией реакции  $Q$**  называется разность энергий покоя начального и конечного состояний частиц, участвующих в реакции. Ядерные реакции, происходящие с выделением энергии ( $Q > 0$ ), называются *экзоэнергетическими*, а с поглощением энергии ( $Q < 0$ ), — *эндоэнергетическими*. Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется **энергетическим выходом** ядерной реакции.

Под **энергией связи** атомных ядер понимается энергия, необходимая для разделения ядра на отдельные нуклоны:

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2.$$

**Дефект массы ядра** — разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}.$$

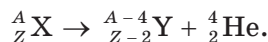
Характеристикой прочности (связанности) ядер служит **удельная энергия связи  $\varepsilon$  ядра**, т. е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\varepsilon = \frac{|E_{\text{св}}|}{A}.$$

**Радиоактивность** — явление самопроизвольного превращения ядер, сопровождающееся испусканием частиц или ядер и коротковолнового электромагнитного излучения.

Радиоактивные превращения ядер, как правило, сопровождаются испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -излучения.

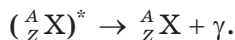
При  $\alpha$ -распаде продуктом распада оказывается изотоп с числом протонов  $Z - 2$  с испусканием  $\alpha$ -частицы:



При  $\beta^-$ -распаде образуется изотоп с атомным номером  $Z + 1$ :



Испускание  $\gamma$ -излучения не приводит к превращениям элементов:



Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_1}}.$$

**Цепной реакцией** называется процесс, в котором продукты определенной реакции вызывают последующие реакции такого же типа.

**Критической массой** называется минимальная масса ядерного горючего, необходимая для поддержания цепной реакции.

**Ядерным реактором** называется устройство, в котором может происходить самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов.

Одним из видов ядерных реакций являются реакции синтеза легких ядер, эффективно протекающие при сверхвысоких температурах  $\sim 10^9$  К и самоподдерживающиеся за счет значительного выделения в них энергии. Такие реакции названы **термоядерными**.

**Ионизирующим** называют такой вид излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул.

Количество энергии, переданной единице массы вещества ионизирующим излучением, называется **дозой**.

Приборы для регистрации ионизирующих излучений называют **детекторами**.

**Элементарные частицы** — первичные, неразложимые далее частицы, которые нельзя считать соединением других частиц, существующих в свободном состоянии. Основными характеристиками элементарных частиц являются их масса, электрический заряд, среднее время жизни, спин.

Для всех элементарных частиц характерна способность испускаться и поглощаться (рождаться и уничтожаться) при взаимодействии с другими

частицами. Различают четыре типа **фундаментальных** взаимодействий: гравитационное; электромагнитное; сильное; слабое.

Электромагнитное взаимодействие характерно для всех частиц, обладающих электрическим зарядом. Квант электромагнитного поля — **фотон**.

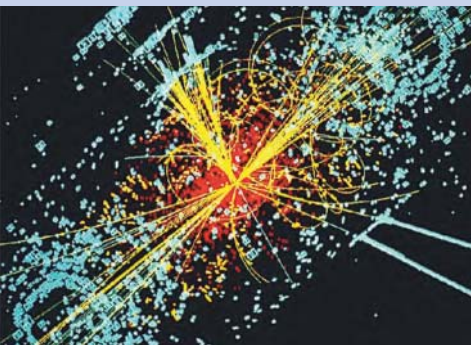
В микромире выполняются фундаментальные законы сохранения энергии, импульса и зарядов.



### Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (А. Беккерель, Э. Резерфорд, Дж. Чедвик, М. Склодовская-Кюри, П. Кюри, Э. Ферми, В. Паули, Ф. Содди, И. Курчатов, П. Хиггс).

2. Подготовьте рефераты на темы: «Масс-спектроскопия и ее применение», «Применение радиоактивных изотопов в промышленности», «Применение гамма-излучения в медицине», «Ядерная геохронология», «Методы лечения и диагностики с применением ионизирующего излучения», «Ускорители заряженных частиц и их применение в науке, медицине, производстве», «Виды ядерных энергетических реакторов».



## Глава 8

# Основы единой физической картины мира

### § 45. Современная естественнонаучная картина мира

Главная цель естественных наук — раскрыть единство сил Природы.

*Л. Больцман*

Наиболее непознаваемым явлением природы является тот факт, что она познаваема.

*А. Эйнштейн*

Природа — это храм науки, где камни говорят,  
Хоть часто их язык бывает непонятен.  
Вокруг — лес символов, тревожен, необъятен,  
И символы на нас с усмешкою глядят.

*Шарль Бодлер*

- Физика, являясь наукой о природе, дает человеку знания об окружающем его мире, позволяя тем самым, с одной стороны, решать проблемы цивилизации, а с другой — беречь нашу планету для будущих поколений. Как объединить накопленные знания? Что сегодня должен знать каждый образованный человек о физических явлениях?

В курсе физики вы познакомились с различными видами взаимодействий тел и объектов в природе, определяющими не только разнообразие физических явлений окружающего нас мира, но и направление эволюции Вселенной. Физика — наука о природе, однако в каждом ее разделе подробно рассматриваются физические явления только с одной стороны, выделяя те или иные свойства материи по определенному признаку. Познание законов природы исторически также шло в основном на базе того или иного физического подхода.



Рис. 233. Структура физической картины мира

По мере накопления знаний человечество стремилось «соединить» все разрозненные факты и законы в рамках обобщенной, научной **картины мира**. Под картиной мира понимают совокупность теорий, законов и принципов, описывающих окружающий нас мир.

Первая, **механическая картина** мира была основана на классической механике И. Ньютона (рис. 233). В основе построения этой картины мира лежало объяснение причин и установление закономерностей механического движения небесных тел, а также макро- и мегасистем (Земля, Луна, Солнце, Солнечная система, Галактика). В качестве первопричины механического движения рассматривалось гравитационное взаимодействие между телами, бесконечно быстро передаваемое на любые расстояния во Вселенной.

Напомним, что на основании силовых или энергетических представлений можно установить законы движения различных объектов: от атомов и молекул до планет и звезд. Важнейшую роль играют принципы инерции и относительности, введенные в механику Г. Галилеем.

На основе механической картины мира в XVIII—XIX вв. была разработана «земная», небесная и молекулярная механика. Однако в то же время в физике накапливалось значительное количество экспериментальных данных, противоречащих идеям атомизма (дискретности строения вещества), которые лежали в ее фундаменте.

Изучение электрических и магнитных взаимодействий существенно изменило представления о материи и привело к появлению **электромагнитной картины мира** (см. рис. 233). В ее основе лежали представления о мире, в котором все явления описываются с помощью сил (гравитационных и электромагнитных). Основной вклад в создание электродинамики внесли Ш. Кулон (электростатические взаимодействия), А. Вольта (источник постоянного тока), А. Ампер (магнитные поля и токи), М. Фарадей (электромагнитная индукция), Дж. Максвелл (теория электромагнетизма), Г. Герц (открытие электромагнитных волн) и Г. Лоренц (классическая электронная теория строения вещества).

М. Фарадей пришел к мысли о необходимости замены дискретных (корпускулярных) представлений о материи непрерывными (континуальными). Материя по Фарадею представлялась как непрерывное бесконечное поле с силовыми точечными центрами. Дж. Максвелл создал математическую теорию электромагнитного поля. На основании этой теории он сделал вывод, что распространение электромагнитного возмущения происходит с конечной скоростью в виде электромагнитных волн. Новая картина мира сменила и принципы передачи взаимодействия: они передаются посредством поля непрерывно от точки к точке и с конечной скоростью. Как следует из электромагнитной картины мира, внутреннее строение вещества определяется действием электромагнитных сил.

Фактическим завершением формирования электромагнитной картины мира стала специальная теория относительности А. Эйнштейна. Он дополнил законы электродинамики идеей относительности как пространства, так и времени.

Однако на рубеже XIX—XX в. обнаружился ряд теоретических проблем и экспериментальных фактов, которые не находили объяснения в рамках электромагнитной картины мира: радиоактивность, тепловое излучение, атомные спектры, устойчивость атомов.

Первые радикальные шаги в создании **квантово-полевой** (см. рис. 233) картины мира были сделаны в начале XX в. Квантование излучения в процессах испускания, поглощения и распространения (М. Планк, А. Эйнштейн); стационарные состояния электронов в атоме (Н. Бор); совершенно фантастическая для своего времени идея — корпускулярно-волнового дуализма (Л. де Бройль) и, наконец, создание квантовой механики (Э. Шредингер, В. Гейзенберг, П. Дирак, В. Паули).

Изучение строения атомного ядра (Э. Резерфорд, П. Кюри и М. Склодовская-Кюри, Дж. Чедвик) привело к становлению физики атомного ядра и элементарных частиц. Были открыты принципиально но-



вые типы взаимодействий, свойственные только микромиру субатомных частиц, — сильное и слабое. Энергия ядерных реакций была поставлена на службу людям (Э. Ферми, И. Курчатов).

Особенностью **современной** физической картины мира является ее вероятностный характер, который выражается в виде статистических законов (см. рис. 233), изучаемых в рамках статистической физики. Здесь, в отличие от механической картины мира, нет «жесткой» определенности «будущего».

Здесь случайность событий выступает как объективное свойство материи. В современной физике основным материальным объектом является квантовое поле, переход которого из одного состояния в другое и приводит к появлению частиц.

Отметим две закономерности, присущие развитию физики как таковой. Первая выражена принципом соответствия (см. рис. 233): частные теории, справедливость которых экспериментально подтверждена, с появлением более общих теорий сохраняют свое значение как частный или предельный случай. Примером может служить специальная теория относительности, выводы которой при малых скоростях соответствуют выводам механики Ньютона.

Вторая закономерность — интеграция или взаимопроникновение разделов физики. Например, развитие физики элементарных частиц и ее слияние с астрономией привели к появлению астрофизики, занимающейся закономерностями эволюции звезд и Вселенной.

Квантово-полевая картина мира по мере накопления новых научных фактов и появления новых научных гипотез продолжает развиваться.

Таким образом, под **естественнонаучной картиной мира** понимают совокупное современное знание об окружающем нас мире, накопленное естественными науками: физикой, астрономией, математикой, химией, биологией. Физическая картина мира является составной частью естественнонаучной картины мира.

Физическая картина мира не исчерпывается представлениями о структурном строении материи. Она проявляется также и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий объектов в окружающем нас мире (частиц, тел, галактик), в природе, по современным данным, присутствуют лишь четыре типа **фундаментальных взаимодействий**. Они различаются по интенсивности и радиусу действия. Именно эти фундаментальные взаимодействия и являются главными



«действующими лицами и исполнителями» в построении современной физической картины мира.

Самое слабое из взаимодействий — **гравитационное взаимодействие**. Оно примерно в  $10^{38}$  раз слабее ядерного. Это взаимодействие описывается законом всемирного тяготения, который был открыт И. Ньютоном в 1687 г. Гравитационные силы действуют между любыми телами, в том числе и между элементарными частицами, однако решающую роль они играют лишь у астрономических объектов, имеющих колоссальные массы.

В **электромагнитном взаимодействии** участвуют любые электрически заряженные частицы и тела, а его «переносчиком» (квантом электромагнитного поля) являются фотоны. Электромагнитные силы обеспечивают возможность стабильного существования атомов, молекул, определяют механические свойства твердых тел, жидкостей и газов.

**Сильное взаимодействие** проявляется при взаимодействиях нуклонов внутри ядра (адронов). В отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий, которые можно отнести к дальнедействующим, т. е. действующим на расстояниях, характерных для макромира, сильное взаимодействие является коротко действующим, так как оно проявляется на расстояниях не более размеров ядра ( $\sim 10^{-15}$  м). Однако на этих расстояниях сильное взаимодействие значительно интенсивнее электромагнитного и тем более гравитационного, за что и получило свое название. Образно сильное взаимодействие можно назвать «богатырем с короткими руками». Сильные взаимодействия между нуклонами в ядрах атомов обеспечивают устойчивость ядер различных атомов. Согласно современным представлениям, сильное взаимодействие переносится квантами нового типа — глюонами, которые подобно фотонам являются безмассовыми частицами.

В **слабом взаимодействии** участвуют любые элементарные частицы, кроме фотонов. Радиус действия слабых сил определяется характерным размером элементарных частиц ( $\sim 10^{-18}$  м). Это взаимодействие сильнее гравитационного, но значительно слабее электромагнитного и сильного взаимодействий. Слабые взаимодействия проявляются при распадах одних элементарных частиц, в результате чего появляются другие элементарные частицы. Таким образом, слабое взаимодействие определяет стабильность элементарных частиц и играет решающую роль при их взаимопревращениях. Оно осуществляется посредством обмена достаточно массивными частицами — бозонами ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ), массы которых состав-

ляют около 80 масс протона. Бозоны были экспериментально открыты в 1983 г.

Если принять интенсивность сильного взаимодействия за единицу ( $\sim 1$ ), то относительная интенсивность электромагнитного взаимодействия будет составлять  $\sim 10^{-2}$ , слабого  $\sim 10^{-10}$ , гравитационного  $\sim 10^{-38}$ . Из этого следует интересный факт — наибольшие усилия в природе необходимы для удержания наиболее мелких частиц, а не планет или звездных гигантов!

Все многообразие окружающих нас взаимодействий, согласно современной квантово-полевой картине мира, сводится к взаимодействию двух групп квантовых объектов, первую из которых составляют **участники** фундаментальных взаимодействий, а вторую — их **переносчики**.

К участникам взаимодействий относятся электроны, протоны, нейтроны, которые и являются первичным «строительным материалом» для создания всего материального в природе. Обмен частицами-переносчиками (гравитон, фотон, глюоны и бозоны) позволяет частицам-участникам осуществлять четыре типа фундаментальных взаимодействий, к которым сводятся все наблюдаемые взаимодействия в природе. Образно можно представить себе окружающий мир как царство «кишащих и взаимодействующих друг с другом» фундаментальных частиц.

На следующем «уровне» более сложной организации материи располагаются элементарные частицы, составленные из фундаментальных, общее число которых, согласно современным данным, — более 500. Далее следуют ядра, состоящие из нуклонов, общее число соответствует числу химических элементов и их изотопов — 2000. На следующем этапе организации материи появляются атомы, составленные из ядер и электронов, количество которых соответствует количеству ядер.

Атомы, взаимодействуя между собой, образуют молекулы, общее число которых оценивается примерно в 10 млн и постоянно возрастает за счет синтеза новых соединений. Молекулы образуют различные вещества, вещества — тела, тела — астрономические объекты, астрономические объекты — Вселенную.

В настоящее время актуальной является проблема **объединения** различных типов фундаментальных взаимодействий в рамках одной теории. Обнадеживающим успехом на этом пути стало объединение электромагнитного и слабого взаимодействий в единое **электрослабое взаимодействие** (рис. 234). На повестке дня — построение теории большого объединения, включающую в себя электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия.

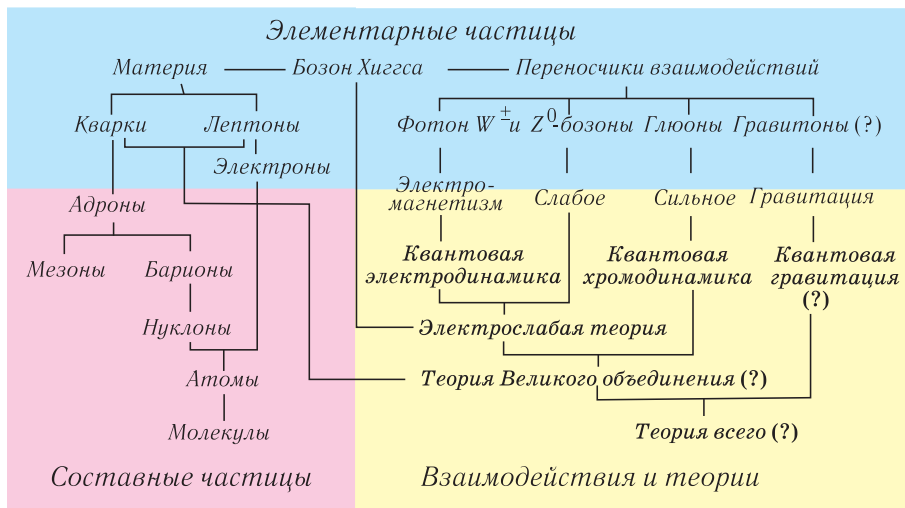


Рис. 234. Элементарные частицы и теории взаимодействий

Еще более грандиозна идея объединения всех четырех фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию, в рамках теории суперобъединения. Эта теория может быть создана на основе новейшей физической теории «суперструн», разработанной американскими физиками М. Грином и Дж. Шварцем, объединяющей все фундаментальные взаимодействия при сверхвысоких энергиях.

Помимо построения современной физической картины мира, которая является составной частью современной естественнонаучной картины мира, физика «сформулировала» ряд принципов, которые являются общими для любого научного исследования, т. е. они могут считаться философскими принципами. Сюда следует отнести принцип **причинности**, принцип **относительности**, принципы **сохранения**, принцип **инвариантности**, принцип **дополнительности**, принцип **соответствия** и некоторые другие.



1. Что понимают под научной картиной мира?
2. Что называется механической картиной мира? На чем она базируется?
3. Перечислите основные понятия и законы электромагнитной картины мира. Когда она возникла?
4. Какие научные открытия положены в основу квантово-полевой картины мира?
5. Что является основным материальным объектом в современной физической картине мира?

6. Какие частицы являются переносчиками фундаментальных взаимодействий?
7. Каково количество фундаментальных частиц согласно современным представлениям?
8. Каково количество известных сегодня элементарных частиц? Ядер? Атомов? Молекул?
9. В чем заключается сущность теории большого объединения? Суперобъединения?
10. Какие общенаучные (философские) принципы были сформулированы в современной физической картине мира?

### САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 8

Различают четыре типа **фундаментальных** взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.

В микромире выполняются фундаментальные законы сохранения **энергии, импульса, электрического, барионного и лептонного зарядов.**

Электромагнитное и слабое взаимодействия являются проявлением единого **электрослабого взаимодействия.**

В настоящее время актуальна проблема построения теории **большого (великого) объединения**, которая могла бы описать все типы существующих взаимодействий.

## Лабораторный эксперимент

### Лабораторная работа № 1

#### Изучение колебаний груза на нити

**Цель работы:** исследование зависимости характеристик нитяных маятников от длины нити, массы грузов, амплитуды колебаний.

**Приборы и принадлежности:** два нитяных маятника с подвесами для них (шарики различной массы), штатив с зажимом, метровая линейка с миллиметровыми делениями, секундомер или часы с секундной стрелкой, весы, разновес.

#### Расчетная формула

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

#### Порядок выполнения работы

1. Поставьте штатив на край стола так, чтобы зажим штатива выступал за край стола (рис. 235).

2. Закрепите в зажиме штатива подвес для маятника и зажмите в нем свободный конец нити длиной не менее 1 м. Отведите шарик в сторону и отпустите его: маятник начнет колебаться.

3. Исследуйте, зависит ли период колебаний математического маятника от амплитуды. Для этого отведите шарик вдоль стола в сторону

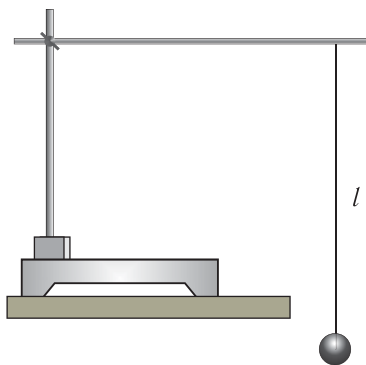


Рис. 235

на расстояние ~10 см и осторожно отпустите его, стараясь избегать боковых толчков. Измерьте время 10 полных колебаний маятника. Определите период колебаний. Повторите измерения еще не менее 4 раз, и результаты занесите в таблицу. Определите период колебаний этого же маятника, отклоняя шарик на 20 см и 30 см. Результаты измерений занесите в таблицу. По результатам измерений сделайте вывод: зависит ли период колебаний математического маятника от амплитуды колебаний  $T(A)$ .

4. Возьмите второй маятник той же длины, но с шариком иной массы. Повторяя процедуру, описанную в предыдущем пункте, определите период колебаний маятника с новым шариком. Сравните его с периодом, найденным в предыдущем пункте, и сделайте вывод: зависит ли период колебаний от массы шарика  $T(m)$ .

5. Измените длину маятника, взяв ее равной 75 см и 50 см, и снова определите период колебаний маятника, так же как описано в пункте 3. По результатам измерений сделайте вывод: зависит ли период колебаний маятника от его длины  $T(l)$ .

### *Таблица измерений и вычислений*

| № опыта           | $m$ , кг | $n$ | $l$ , м | $\Delta l$ , м | $t$ , с | $\Delta t$ , с | $T$ , с |
|-------------------|----------|-----|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| Не менее 4 опытов |          |     |         |                |         |                |         |
| Среднее значение  |          |     |         |                |         |                |         |

### *Контрольные вопросы*

1. Какую длину имеет математический маятник, период колебаний которого 1 с?

2. Как изменится период колебаний маятника, если массу шарика увеличить в 2 раза, а длину нити маятника уменьшить в 4 раза?

### *Выводы*

#### *Суперзадание*

Изготовьте математический маятник длиной, рассчитанной в контрольном вопросе № 1. Экспериментально определите период его колебаний. Результат проанализируйте и сделайте вывод.

## Лабораторная работа № 2

### Измерение ускорения свободного падения с помощью математического маятника

**Цель работы:** измерение ускорения свободного падения с использованием формулы Гюйгенса для расчета периода колебаний математического маятника.

**Приборы и принадлежности:** математический маятник, штатив с зажимом, метровая линейка с миллиметровыми делениями, секундомер или часы с секундной стрелкой.

**Расчетная формула**

$$g = 4\pi^2 \frac{ln^2}{t^2}.$$

**Порядок выполнения работы**

1. Поставьте штатив на край стола так, чтобы зажим штатива выступал за край стола (рис. 235), и зажмите в нем свободный конец нити длиной не менее 1 м. Измерьте длину маятника 3—5 раз. Вычислите среднее значение  $\langle l \rangle$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

2. Отведите шарик в сторону на  $5 \div 10$  см и отпустите его.

3. Измерьте 3—5 раз время 10 колебаний маятника и вычислите среднее значение  $\langle t \rangle$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

4. Вычислите среднюю абсолютную погрешность измерения времени  $\langle \Delta t \rangle$ . Результаты вычислений занесите в таблицу.

5. Вычислите среднее значение ускорения свободного падения. Результаты вычислений занесите в таблицу.

6. Определите относительную погрешность измерения ускорения свободного падения и запишите результат измерения в таблицу.

**Таблица измерений и вычислений**

| № опыта    | $l$ , м | $t$ , с | $n$ | $g$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ | $\Delta t$ , с | $\varepsilon$ , % |
|------------|---------|---------|-----|-------------------------------------|----------------|-------------------|
| 3—5 опытов |         |         |     |                                     |                |                   |
| Среднее    |         |         |     |                                     |                |                   |

**Контрольные вопросы**

1. Одинаково ли ускорение свободного падения на полюсе Земли и на ее экваторе? Ответ обоснуйте.

2. Можно ли измерить ускорение свободного падения с помощью математического маятника в условиях невесомости? Ответ обоснуйте.

**Выводы****Суперзадание**

Математический маятник отклонили на небольшой угол и отпустили без толчка. Через промежуток времени  $t_1$  он окажется в положении равновесия. Во втором случае его подняли до точки подвеса и отпустили (без толчка). Через промежуток времени  $t_2$  он также окажется в положении равновесия. Сравните промежутки времени  $t_1$  и  $t_2$  движения шарика. Ответ обоснуйте.



## Лабораторная работа № 3

### Измерение жесткости пружины на основе закономерностей колебаний пружинного маятника

**Цель работы:** измерение жесткости пружины с помощью пружинного маятника.

**Приборы и принадлежности:** набор грузов по механике, держатель со спиральной пружиной, штатив, линейка с миллиметровыми делениями, секундомер или часы с секундной стрелкой.

#### Расчетная формула

$$k = 4\pi^2 m \frac{n^2}{t^2}.$$

#### Порядок выполнения работы

1. Определите массу одного груза 3—5 раз с помощью весов. Вычислите среднее значение массы. Результаты измерений занесите в таблицу.

2. Укрепите пружину в штативе и подвесьте к ней груз массой  $m_1 = 0,1$  кг (рис. 236). Отклонив груз вниз на расстояние, примерно равное 2 см, отпустите его. Измерьте 3—5 раз время, необходимое для совершения  $n = 10$  полных колебаний. Вычислите среднее значение времени. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

3. Вычислите период его колебаний  $T$ . Результаты вычислений занесите в таблицу.

4. Вычислите среднее значение жесткости пружины, рассчитайте относительную и абсолютную погрешность измерения жесткости пружины. Результаты вычислений занесите в таблицу. Запишите значение жесткости пружины.

#### Таблица измерений и вычислений

| № опыта    | $m$ , кг | $\Delta m$ , кг | $n$ | $t$ , с | $\Delta t$ , с | $k$ , $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$ | $\Delta k$ $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$ | $T$ , с | $\varepsilon$ , % |
|------------|----------|-----------------|-----|---------|----------------|-----------------------------------|--|---------|-------------------|
| 3—5 опытов |          |                 |     |         |                |                                   |  |         |                   |
| Среднее    |          |                 |     |         |                |                                   |  |         |                   |

5. Запишите значение жесткости пружины.

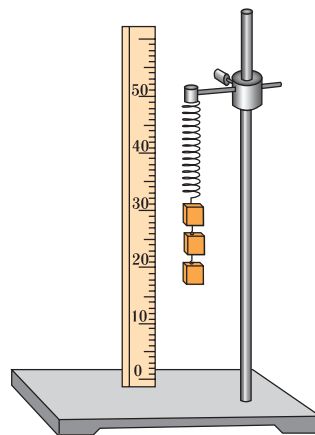


Рис. 236

### Контрольные вопросы

1. По какому закону происходит колебание тела, подвешенного на пружине?
2. Зависит ли частота колебаний пружинного маятника от амплитуды колебаний?
3. Каким был бы результат опыта в условиях невесомости?

### Выводы

#### Суперзадание

Как изменится период колебаний груза на пружине, если две пружины соединить последовательно? Параллельно? Ответ обоснуйте теоретически и проверьте экспериментально.

## Лабораторная работа № 4

### Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

**Цель работы:** измерение длины световой волны для красной и фиолетовой границ спектра с использованием дифракционной решетки с известным периодом.

**Приборы и принадлежности:** прибор для определения длины световой волны (рис. 237, а), лампа накаливания, дифракционная решетка, штатив.

#### Расчетная формула

Если смотреть на лампу накаливания сквозь решетку и щель в черном экране, то на экране можно наблюдать по обе стороны от щели дифракционные спектры 1, 2, 3 и т. д. порядков.

Длина волны дифракционного максимума первого порядка:

$$\lambda = \frac{ld}{L},$$

где  $d$  — ширина щели,  $L$  — расстояние от дифракционной решетки до экрана,  $l$  — расстояние от центра щели на экране до соответствующего дифракционного максимума (рис. 237, б)

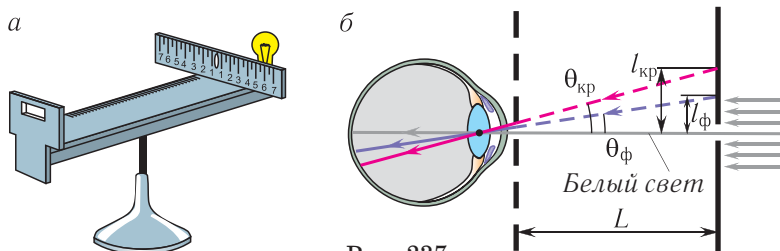


Рис. 237

**Порядок выполнения работы**

1. Установите экран на расстоянии  $L \sim 45\text{—}50$  см от дифракционной решетки. Включите лампу и расположите ее за экраном со щелью (см. рис. 237). Добейтесь наилучших условий видимости спектра.

2. Измерьте расстояние  $L$  3—5 раз, рассчитайте среднее значение  $\langle L \rangle$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

3. Измерьте расстояния от центра щели на экране до красного  $l_{\text{кр}}$  и фиолетового  $l_{\text{ф}}$  краев спектра. Эти расстояния измерьте 3—5 раз справа и слева от щели на экране. Рассчитайте средние значения  $\langle l_{\text{кр}} \rangle$  и  $\langle l_{\text{ф}} \rangle$ . Результаты занесите в таблицу.

4. Рассчитайте период  $d$  решетки. Запишите его в таблицу.

5. Вычислите по формуле длину волны для красной  $\langle \lambda_{\text{кр}} \rangle$  и фиолетовой  $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle$  границ спектра.

6. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерений длин волн:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}, \quad \Delta \lambda = \varepsilon_{\lambda} \langle \lambda \rangle.$$

7. Запишите значения длин волн и относительной погрешности их измерения.

**Таблица измерений и вычислений**

| № опыта    | $L$ , м | $l_{\text{кр}1}$ , м | $l_{\text{кр}2}$ , м | $l_{\text{ф}1}$ , м | $l_{\text{ф}2}$ , м | $\langle l_{\text{кр}} \rangle$ , м | $\langle l_{\text{ф}} \rangle$ , м | $d$ , м | $\lambda_{\text{кр}}$ , нм | $\lambda_{\text{ф}}$ , нм | $\varepsilon_{\lambda}$ , % | $\Delta \lambda$ , нм |
|------------|---------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 3—5 опытов |         |                      |                      |                     |                     |                                     |                                    |         |                            |                           |                             |                       |
| Среднее    |         |                      |                      |                     |                     |                                     |                                    |         |                            |                           |                             |                       |

**Контрольные вопросы**

1. Почему нельзя получить геометрический (световой) луч, уменьшая до нуля ширину щели?

2. В каком порядке следуют основные цвета в дифракционном спектре? Совпадает ли этот порядок следования цветов в радуге?

3. Как изменится характер дифракционного спектра, если использовать дифракционную решетку с периодом, в два раза большим, чем в вашем эксперименте? В два раза меньшим?

**Выводы****Суперзадание**

Направьте луч от источника света на рабочую поверхность компакт-диска. Нарисуйте, опишите и объясните наблюдаемую картину в отраженном от компакт-диска свете.

## Лабораторная работа № 5

### Измерение показателя преломления стекла

**Цель работы:** изучение преломления света на границе раздела сред воздух — стекло, измерение показателя  $n$  преломления стекла.

**Приборы и принадлежности:** лабораторный комплект по оптике, лист миллиметровой бумаги, линейка, карандаш, циркуль.

**Расчетная формула**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \approx n,$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  — углы падения и преломления света,  $n_2$  — показатель преломления стекла.

#### Порядок выполнения работы

1. Установите источник света на столе, в окно прибора вставьте экран с прорезью. Прорезь должна быть расположена вертикально.

2. Соберите электрическую цепь, присоединив лампочку к источнику постоянного тока через выключатель. Замкните цепь и получите яркую, тонкую полоску света на бумаге (световой луч).

3. Плоскопараллельную стеклянную пластинку расположите на листе с миллиметровыми делениями, обведите ее контур остро заточенным карандашом.

4. Наблюдайте явление преломления света при различных углах падения. Зафиксируйте ход лучей, используя булавки (рис. 238, а).

5. Выполните построение в соответствии с рисунком 238, а. Измерьте отрезки  $AE$  и  $DC$ . Результаты измерений занесите в таблицу. Проведите данный эксперимент не менее двух раз, меняя угол падения луча на пластинку. Проведите соответствующие построения и измерения отрезков  $AE$  и  $DC$ . Результаты измерений занесите в таблицу.

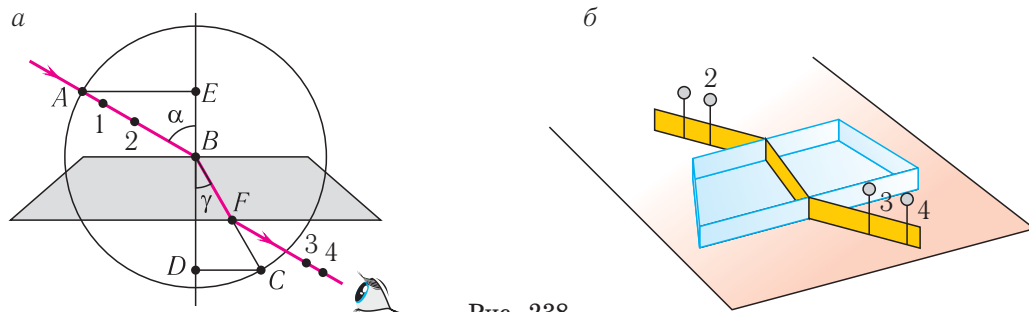


Рис. 238

6. Вычислите средние значения длин отрезков  $\langle AE \rangle$  и  $\langle DC \rangle$ . Данные занесите в таблицу.

7. Вычислите показатель преломления стекла:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle AE \rangle}{\langle DC \rangle}.$$

8. Рассчитайте абсолютные погрешности измерения отрезков:

$$\Delta AE = \Delta_{\text{и}} AE + \Delta_{\text{о}} AE, \quad \Delta DC = \Delta_{\text{и}} DC + \Delta_{\text{о}} DC.$$

Результаты вычислений запишите в таблицу.

9. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешность измерения абсолютного показателя преломления стекла:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta AE}{\langle AE \rangle} + \frac{\Delta DC}{\langle DC \rangle}.$$

Результаты вычислений запишите в таблицу.

10. Запишите значение показателя преломления стекла и относительной погрешности его измерения:

$$n = \langle n \rangle \pm \Delta n, \quad \varepsilon = \dots \%$$

### Таблица измерений и вычислений

| № опыта           | $AE$ , м | $DC$ , м | $\langle n \rangle$ | $\Delta AE$ , м | $\Delta DC$ , м | $\varepsilon = \dots \%$ | $\Delta n$ |
|-------------------|----------|----------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------------|
| Не менее 2 опытов |          |          |                     |                 |                 |                          |            |
| Среднее           |          |          |                     |                 |                 |                          |            |

### Контрольные вопросы

1. Запишите формулу для вычисления скорости света в веществе с показателем преломления  $n$ .

2. От чего зависит абсолютный показатель преломления вещества?

3. В чем заключается явление полного отражения света на границе раздела двух сред?

### Выводы

### Суперзадание

Попробуйте, используя данную стеклянную пластинку, наблюдать явление полного отражения. Нарисуйте оптическую схему для его наблюдения. Оцените угол полного отражения для пластинки.

## Лабораторная работа № 6

### Изучение тонкой собирающей линзы

**Цель работы:** определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы.

**Приборы и принадлежности:** лабораторный комплект по оптике, линейка измерительная, источник тока, электрическая лампа, ключ, соединительные провода, экран.

### Изучение тонкой собирающей линзы

#### Расчетная формула

Фокусное расстояние  $F$  собирающей линзы определяется по формуле:

$$F = \frac{df}{d+f}$$

и оптическая сила

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

где  $d$  — расстояние от линзы до предмета,  $f$  — расстояние от линзы до изображения.

#### Порядок выполнения работы

1. Установите на столе вдоль одной прямой источник света  $S$  (рис. 239) (лампочку с колпачком, в котором имеется прорезь в виде стрелки), собирающую линзу и экран. Перемещайте линзу до получения резкого и четкого изображения  $S'$  стрелки на экране.

2. Не меняя расстояние между лампой и экраном, измерьте расстояние  $d$  от прорези в окне прибора до линзы и расстояние  $f$  от линзы до экрана 2—3 раза. Результаты измерений запишите в таблицу.

3. Вычислите средние значения  $\langle d \rangle$  и  $\langle f \rangle$ . Результаты вычислений запишите в таблицу.

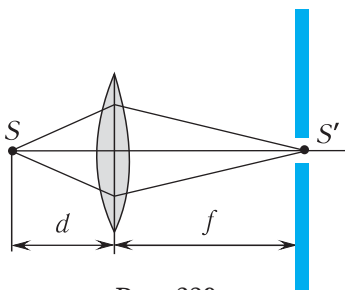


Рис. 239

4. Вычислите фокусное расстояние

$$\langle F \rangle = \frac{\langle d \rangle \langle f \rangle}{\langle d \rangle + \langle f \rangle} \text{ и оптическую силу } \langle D \rangle = \frac{1}{\langle F \rangle} \text{ линзы.}$$

Результаты вычислений запишите в таблицу.

5. Вычислите относительную и абсолютную погрешность измерений фокусного расстояния собирающей линзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle + \langle f \rangle}, \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

Результаты вычислений занесите в таблицу.

6. Вычислите абсолютную погрешность косвенных измерений фокусного расстояния собирающей линзы:

$$\Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

Результаты вычислений занесите в таблицу.

7. Запишите значение фокусного расстояния собирающей линзы и относительной погрешности его измерения в виде:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}, \varepsilon_F = \dots \%$$

### Таблица измерений и вычислений

| № опыта   | $d$ , м | $\Delta d$ , м | $f$ , м | $\Delta f$ , м | $F$ , м | $D$ , дптр | $\varepsilon_F$ , % | $\Delta F$ , м |
|-----------|---------|----------------|---------|----------------|---------|------------|---------------------|----------------|
| 2—3 опыта |         |                |         |                |         |            |                     |                |
| Среднее   |         |                |         |                |         |            |                     |                |

8. Поверните линзу к окну и получите на экране изображение удаленного предмета за окном. Измерьте расстояние от линзы до экрана и сравните его с полученными ранее значениями фокусного расстояния линзы. Сделайте соответствующие выводы.

### Контрольные вопросы

1. В каком случае линзу можно считать тонкой? Ответ обоснуйте.
2. Как по внешним признакам отличить собирающую линзу от рассеивающей?

### Выводы

### Суперзадание

Закройте темной бумагой половину линзы и опишите, как при этом изменится изображение предмета на экране.



## Ответы к упражнениям

- Упр. 1.** 1.  $A = 0,60$  м;  $T = 8,0$  с;  $\nu = 0,13$  Гц. 3.  $S = 15$  м. 4.  $T = 0,33$  с;  
 $\nu = 3,0$  Гц;  $\omega = 19 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . 5.  $x(t) = 20 \cos(2\pi t)$  (см) =  $0,20 \cos(2\pi t)$  (м).
- Упр. 2.** 1.  $T = 7,3$  с;  $\nu = 0,14$  Гц. 2.  $l = 25$  см. 3.  $k = 16 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . 4.  $\Delta l = 10$  см.  
 5. Одновременно. 6.  $l_2 = 28$  см. 7.  $T = 1,3$  с. 8.  $l = 24,87$  см,  $\varepsilon = 1,9\%$ .
- Упр. 3.** 2.  $W_{\text{мех}} = 0,80$  Дж;  $h_{\text{max}} = 80$  см. 3.  $\Delta W_{\text{II}} = 0,10$  Дж;  $\Delta W_{\text{кmax}} = 0,10$  Дж.  
 4.  $\eta_1 = 3,0$ ;  $\eta_2 = 0,78$ ;  $\eta_3 = 0$ . 5.  $W = 52$  мДж;  $W_{\text{II}} = 19$  мДж;  
 $W_{\text{к}} = 33$  мДж. 6.  $W_{\text{II}} = 0,13$  Дж;  $W_{\text{к}} = 50$  мДж;  $x(t) = 5 \cos(32t)$  (см).  
 7.  $n = \frac{1}{8}$ . 8.  $W = 2\pi^2 \nu^2 A^2 m$ .
- Упр. 4.** 2. Для устранения возможного резонанса. 3.  $\nu = 30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . 4.  $l = 11,0$  см.
- Упр. 5.** 1.  $\nu = 75 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . 2.  $T = 1,3$  с;  $A = 5,0$  мкм. 3.  $T = 2,9$  с. 4.  $\nu = 1,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .  
 5.  $l = 0,63$  км. 6.  $h = 50$  км.
- Упр. 6.** 1.  $\Delta t_1 = 30$  с;  $\Delta t_2 = 2,0$  с. 2.  $\lambda_1 = 6,0$  мм;  $\lambda_2 = 1,4$  мм. 3.  $l = 0,34$  км.  
 4.  $H = 1,5 \cdot 10^2$  м. 5.  $l = 0,26$  км. 6.  $l = 0,45$  км. 7.  $h = 2,0$  см;  $d = 5,0$  см.
- Упр. 7.** 1.  $T = 1,2$  мс. 2.  $T = 0,89$  с. 3.  $\nu = 36$  кГц. 4. Увеличится (уменьшится) в 4 раза. 5. а)  $U = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0,71U_0$ ; б)  $U = -0,71U_0$ . 6. Изменяется от  
 1,2 пФ до 0,14 пФ. 7. Нет; увеличить оба значения в 1,24 раза.
- Упр. 8.** 1.  $I_0 = 10$  А;  $T = 1,0$  с;  $\nu = 1,0$  Гц;  $I_1 = 1,3$  А.  
 2.  $I(t) = -0,30 \sin(314t)$  (мА);  $I_1 = -0,30$  мА;  $I_2 = 0,30$  мА.  
 3.  $I(t) = 3,0 \sin(157t)$  (мА);  $I_1 = 3,0$  мА;  $I_2 = -2,1$  мА.  
 4.  $q(t) = 20 \cos(1570t)$  (мКл);  $q_1 = -14$  мКл;  $q_2 = 19$  мКл.  
 5.  $\nu = 25$  Гц;  $U = 200$  В. 6.  $\nu = 50$  Гц. 7.  $U_0 = 6,2$  В.
- Упр. 9.** 1.  $T = 50$  нс;  $\nu = 2,0 \cdot 10^7$  Гц. 2.  $l = 0,90$  км.  
 3.  $l_1 = 4,1 \cdot 10^{10}$  м;  $l_2 = 3,2 \cdot 10^{10}$  м. 4.  $N = 7,5 \cdot 10^3$ . 5.  $\lambda_1 = 30$  км;  
 $\lambda_2 = 0,10$  км. 6.  $\lambda = 7,5$  км. 7.  $13 \text{ м} \leq \lambda \leq 0,10 \text{ км}$ . 8.  $d_2 = 5,6$  мм.
- Упр. 10.** 1.  $\tau = 493$  с. 2.  $\nu = 1,95 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . 3.  $k = 1,135$ . 4.  $\tau = 2,00$  мс. 5.  $l = 1,7$  км.  
 6.  $n = 1,52$ .
- Упр. 11.** 1. Ослабление (минимум). 2.  $N = 5$ . 3. Ослабление (минимум).
- Упр. 12.** 1.  $\theta = 6,2^\circ$ . 2.  $N = 1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{штР}}{\text{м}}$ . 3.  $N = 1,3 \cdot 10^4 \frac{\text{штР}}{\text{см}}$ . 4.  $m_{\text{max}} = 3$ .  
 5.  $m = 3$ ;  $\theta_2 = 25^\circ$ ;  $\theta_3 = 39^\circ$ ;  $\theta_4 = 56^\circ$ . 6. Во втором порядке. Не зависит.



- Упр. 13.** 1.  $\alpha = 37^\circ$ . 2.  $H = 6,0$  м. 3. Да, можно;  $x = 4,4$  м. 4.  $b = 1,0$  м.  
6.  $u = 0,60 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .
- Упр. 15.** 1.  $H = 5,3$  м. 2.  $n_{21} = 0,89$ . 3.  $\alpha = 41^\circ$ . 4.  $\alpha_2 = 82^\circ$ . 5.  $\alpha = 51^\circ$ . 6.  $\alpha = 49^\circ$ .  
7.  $n_2 = 1,59$ .
- Упр. 16.** 1.  $n_1 = 1,5$ ;  $n_2 = 1,3$ ;  $n_3 = 1,8$ . 2.  $n_1 = 1,6$ ;  $n_2 = 1,4$ ;  $n_3 = 1,8$ . 4.  $l = 22$  мм.
- Упр. 17.** 4. Собирающая;  $F = 18,3$  см. 5.  $d = 24$  см;  $h = 1,8$  см. 6.  $d = 30$  см;  
 $\Gamma = 0,67$ . 7.  $d = 5,8$  см.
- Упр. 18.** 1.  $E = 9,0 \cdot 10^{10}$  Дж. 2.  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. 3.  $\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-8}$  кг.  
4.  $\Delta m = 1,4 \cdot 10^{17}$  кг.
- Упр. 19.** 1.  $E = 3,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. 2.  $E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $\frac{E_2}{E_1} = 2,4$ ;  $\frac{E_3}{E_1} = 6,0 \cdot 10^3$ ;  
 $\frac{E_4}{E_1} = 6,0 \cdot 10^6$ . 3.  $v_{\min} = 5,0 \cdot 10^{14}$  Гц. 4.  $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-7}$  м.  
5.  $A_{\text{вых}} = 4,2$  эВ;  $N = 3,8 \cdot 10^{17}$ . 6.  $N = 1,4 \cdot 10^3$ . 7.  $E_{\text{к}}^{\max} = 6,27 \cdot 10^{-19}$  Дж;  
 $v_{\max} = 1,17 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . 8.  $A_{\text{вых}} = 2,0$  эВ.
- Упр. 20.** 1.  $N = 6$ . 2. Энергия атома уменьшилась на  $\Delta E \approx 2,6$  эВ  $\approx 4,1 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
3. С уровня  $N = 5$  на уровень  $N = 1$ ; с уровня  $N = 1$  на уровень  $N = 5$ .  
4.  $\Delta E = 4,1 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,6 эВ. 5.  $\Delta E = 12,1$  эВ. 6.  $\lambda_1 = 2,3 \cdot 10^{-7}$  м;  
 $\lambda_2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$  м;  $\lambda_3 = 2,9 \cdot 10^{-7}$  м.
- Упр. 21.** 1.  $A_1 = 225$ ;  $A_2 = 131$ ;  $A_3 = 91$ . 3. а)  $A = 11$ ;  $N = 5$ ;  $Z = 6$ ; б)  $A = 19$ ;  
 $N = 10$ ;  $Z = 9$ ; в)  $A = 40$ ;  $N = 22$ ;  $Z = 18$ ; г)  $A = 64$ ;  $N = 35$ ;  $Z = 29$ ;  
д)  $A = 55$ ;  $N = 30$ ;  $Z = 25$ . 4. а) кальций (Ca); б) магний (Mg); неон (Ne);  
резерфордий (Rf). 5. а) Азот (N); б) алюминий (Al); магний (Mg).
- Упр. 22.** 1. Нейтрон ( ${}_0^1n$ ). 2. а)  ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_4^7\text{Be} + {}_0^1n$ ; б)  ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$ ;  
в)  ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He} + {}_1^1\text{p}$ ; г)  ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_4^8\text{Be} + {}_0^0\gamma$ . 3.  $E = 127$  МэВ.  
5.  ${}_{12}^{25}\text{Mg} + {}_1^1\text{p} \rightarrow {}_{11}^{22}\text{Na} + {}_2^4\text{He}$ . 6.  $\Delta m = 0,0256$  а.е.м.;  $Q = 23,8$  МэВ.  
7.  $\Delta m = 0,01549$  а.е.м.; выделяется,  $Q = 14,4$  МэВ;  $E = 14,4$  МэВ.
- Упр. 23.** 1.  $\Delta m = 0,24157$  а.е.м. 2.  $m_{\text{я}} = 7,0547$  а.е.м. =  $1,1711 \cdot 10^{-26}$  кг.  
3.  $\varepsilon = 7,42 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . 4.  $\varepsilon = 7,074 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . 5.  $\Delta m = 0,10851$  а.е.м.;  
 $\varepsilon = 7,22 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . 6.  $E_{\text{св}}(\text{N}) = 104,72$  МэВ;  $E_{\text{св}}(\text{He}) = 28,3$  МэВ;  
 $E_{\text{св}}(\text{O}) = 131,8$  МэВ.
- Упр. 24.** 1.  $\alpha$ -частицу. 2. Указание: вычислите дефект масс. 3. Указание: вы-  
числите дефект масс. 4.  ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1n$ ;  ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_1^0e$ .  
5.  ${}_{8}^{19}\text{O} \rightarrow {}_{9}^{19}\text{F} + {}_{-1}^0e$ . 6.  ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + {}_2^4\alpha$ .
- Упр. 25.** 1.  $k_2 = 4,0$ . 2.  $k = 1,6$  %. 3.  $t = 145$  лет. 4.  $N_1 = 1,8 \cdot 10^{21}$ ;  $N_2 = 5,7 \cdot 10^{19}$ .  
5.  $m = 0,25$  кг.
- Упр. 26.** 1. а)  $Q = 172$  МэВ; б)  $Q = 185$  МэВ; в)  $Q = 173$  МэВ; г)  $Q = 168$  МэВ.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| От авторов .....  | 3   |
| <b>Глава 1. Механические колебания и волны</b>  |     |
| § 1. Колебательное движение. Гармонические колебания .....  | 5   |
| § 2. Пружинный и математический маятники .....  | 14  |
| § 3. Превращения энергии при гармонических колебаниях .....   | 21  |
| § 4. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс .....  | 26  |
| § 5. Распространение колебаний в упругой среде. Продольные и поперечные волны .....   | 32  |
| § 6. Звуковые волны .....   | 39  |
| Самое важное в главе 1 .....  | 47  |
| <b>Глава 2. Электромагнитные колебания и волны</b>  |     |
| § 7. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Формула Томсона. Превращения энергии в колебательном контуре ..... | 51  |
| § 8. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный электрический ток .....   | 59  |
| § 9. Преобразование переменного тока. Трансформатор .....   | 65  |
| § 10. Производство, передача и потребление электрической энергии .....  | 68  |
| § 11. Экологические проблемы производства и передачи электрической энергии .....  | 71  |
| § 12. Электромагнитные волны и их свойства. Шкала электромагнитных волн .....   | 74  |
| § 13. Действие электромагнитного излучения на живые организмы .....   | 81  |
| Самое важное в главе 2 .....  | 86  |
| <b>Глава 3. Оптика</b>  |     |
| § 14. Электромагнитная природа света. Скорость света .....  | 88  |
| § 15. Интерференция света .....   | 94  |
| § 16. Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция света. Дифракционная решетка .....  | 102 |
| § 17. Прямолинейное распространение и отражение света. Зеркала .....  | 110 |
| § 18. Вогнутые и выпуклые сферические зеркала. Построение изображений .....   | 114 |
| § 19. Закон преломления света. Показатель преломления. Полное отражение .....   | 121 |
| § 20. Прохождение света через оптические элементы .....   | 127 |
| § 21. Формула тонкой линзы .....  | 130 |
| § 22. Оптические приборы для получения действительных изображений .....   | 139 |
| § 23. Оптические приборы для увеличения угла зрения .....   | 141 |
| Самое важное в главе 3 .....  | 146 |

#### **Глава 4. Основы специальной теории относительности**

- § 24. Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Экспериментальные предпосылки теории относительности ..... 151
- § 25. Постулаты специальной теории относительности ..... 155
- § 26. Элементы релятивистской динамики. Взаимосвязь массы и энергии ... 158
- Самое важное в главе 4 ..... 161

#### **Глава 5. Фотоны. Действия света**

- § 27. Фотоэффект. Экспериментальные законы внешнего фотоэффекта. Квантовая гипотеза Планка ..... 163
- § 28. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта ..... 169
- § 29. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм ..... 177
- Самое важное в главе 5 ..... 181

#### **Глава 6. Физика атома**

- § 30. Явления, подтверждающие сложное строение атома. Ядерная модель атома ..... 183
- § 31. Квантовые постулаты Бора ..... 188
- § 32. Излучение и поглощение света атомом. Спектры испускания и поглощения ..... 195
- § 33. Спонтанное и индуцированное излучение ..... 199
- § 34. Лазеры ..... 203
- Самое важное в главе 6 ..... 206

#### **Глава 7. Ядерная физика и элементарные частицы**

- § 35. Протонно-нейтронная модель строения ядра атома ..... 208
- § 36. Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях ..... 214
- § 37. Энергия связи ядра атома ..... 220
- § 38. Радиоактивность ..... 224
- § 39. Закон радиоактивного распада ..... 232
- § 40. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции ..... 235
- § 41. Ядерный реактор ..... 241
- § 42. Реакции ядерного синтеза ..... 246
- § 43. Ионизирующее излучение. Элементы дозиметрии ..... 251
- § 44. Элементарные частицы и их взаимодействия ..... 258
- Самое важное в главе 7 ..... 263

#### **Глава 8. Основы единой физической картины мира**

- § 45. Современная естественнонаучная картина мира ..... 266
- Приложение. Лабораторный эксперимент** ..... 274
- Ответы к упражнениям** ..... 284

(Название учреждения образования)

| Учебный год | Имя и фамилия учащегося | Состояние учебного пособия при получении | Оценка учащегося за пользование учебным пособием |
|-------------|-------------------------|--|--|
| 20 /        |                         |  |  |
| 20 /        |                         |  |  |
| 20 /        |                         |  |  |
| 20 /        |                         |  |  |
| 20 /        |                         |  |  |

Учебное издание

**Жилко** Виталий Владимирович  
**Маркович** Леонид Григорьевич  
**Сокольский** Анатолий Алексеевич

## **ФИЗИКА**

Учебное пособие для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения  
(с электронным приложением для повышенного уровня)

Гл. редактор *Е. В. Литвинович*. Редакторы *Г. А. Бабаева, Н. М. Алганова*.  
Художественный редактор *Е. А. Проволович*.

Техническое редактирование и компьютерная верстка *Г. А. Дудко*.  
Корректоры *О. С. Козицкая, Е. П. Тхир, А. В. Алешко*.

Подписано в печать 10.03.2021. Формат 70 × 90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,06 + 0,29 форз.

Уч.-изд. л. 15,2 + 0,4 форз. + 22,3 эл. прил.

Тираж 120 000 экз. Заказ .

Издательское республиканское унитарное предприятие  
«Народная асвета» Министерства информации Республики Беларусь.

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/2 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220004, Минск, Республика Беларусь.

Открытое акционерное общество «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/3 от 10.09.2018.

Ул. Корженевского, 20, 220024, Минск, Республика Беларусь.

Правообладатель Народная асвета